BUNDESGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG

Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung

Stand 28.03.2022

Geschäftszeichen: SG02303/97-2/2-2022#10 – Objekt-ID: 919256 – Revision: 00

Inhaltsverzeichnis

Deckblatt **1**

Revisionsblatt **2a**

Inhaltsverzeichnis **3**

Abbildungsverzeichnis **11**

Tabellenverzeichnis **23**

Verzeichnis der beispielhaften Anwendung **28**

Anhangsverzeichnis **33**

Abbildungsverzeichnis der Anhänge **35**

Tabellenverzeichnis der Anhänge **37**

Abkürzungsverzeichnis **38**

Begriffsbestimmung **46**

1 Einleitung **51**

1.1 Vorstellung der Gebiete zur Methodenentwicklung 52
1.1.1 Teilgebiet 035_00 (Salzstock Bahlburg) 53
1.1.2 Teilgebiet 078_02 (Thüringer Becken) 54
1.1.3 Teilgebiet 009_00 Kristallin (Saxothuringikum) 55
1.1.4 Teilgebiet 001_00 (Opalinuston) 56
1.2 Inhalte, Arbeitsschritte und Ablauf der rvSU 57
1.2.1 Prozessualer Ablauf der rvSU 59
1.2.2 Datenflussdiagramm – Zusammenspiel von Daten, Interpretationen und Bewertungen in den rvSU 66
1.3 Geogene Prozesse 68
1.4 Berücksichtigung der Mindestanforderungen und Ausschlusskriterien 69
1.4.1 Zielgerichtete Anwendung der Mindestanforderungen und Ausschlusskriterien im Rahmen der rvSU 69
1.4.2 Weiterentwickelte Anwendung der Ausschlusskriterien 70
1.4.3 Weiterentwickelte Anwendung der Mindestanforderungen 72

2 Inventardaten hochradioaktiver Abfälle für die rvSU (§ 4 EndlSiUntV) **74**

2.1 Zusammenstellung des Abfallinventars (§ 4 Abs. 2 EndlSiUntV) 74
2.2 Inventardatenbedarf für die rvSU 75
2.2.1 Veröffentlichte Referenzen für Inventardaten 75
2.2.1.1 Verzeichnis radioaktiver Abfälle (seit 2014/15) 76
2.2.1.2 Berichte zum Gemeinsamen Übereinkommen (seit 2001) 76

2.2.1.3 Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben (VSG, 2010 bis 2013) 76
2.2.1.4 Forschungsvorhaben LABRADOR (2011) 77
2.2.1.5 Forschungsvorhaben RESUS (2020) 77
2.2.2 Für die rvSU zusammengestellte Inventardaten 77
2.2.2.1 Brennelemente aus den Leistungsreaktoren 78
2.2.2.2 Abfälle aus der Wiederaufarbeitung 80
2.2.2.3 Abfälle aus den Forschungs-, Versuchs- und Prototypreaktoren 81
2.2.3 Diskussion der Inventardaten 83
2.2.3.1 Inventardaten zu Brennelementen aus den Leistungsreaktoren 84
2.2.3.2 Inventardaten zu Abfällen aus der Wiederaufarbeitung 84
2.2.3.3 Inventardaten zu Abfällen aus den Forschungs-, Versuchs- und Prototypreaktoren 85

3 Ausweisung von Untersuchungsräumen (§ 3 EndlSiUntV) 87

4 Vorläufiges Sicherheitskonzept und vorläufige Endlagerauslegung (§ 6 EndlSiUntV) 92

4.1 Vorläufiges Sicherheitskonzept 92
4.1.1 Regulatorische Vorgaben gemäß § 10 EndlSiAnfV 92
4.1.2 Vorläufiges Sicherheitskonzept im Rahmen der rvSU 93
4.1.3 Darstellung der Barrieren des Endlagersystems und ihrer Sicherheitsfunktionen (§ 10 Abs. 5 EndlSiAnfV) im Rahmen der rvSU 96
4.1.3.1 Das Endlagersystem 96
4.1.3.2 Der sichere Einschluss im Endlagersystem 97
4.1.3.3 Methodik zur Darstellung der Barrieren und ihrer Sicherheitsfunktionen in den rvSU 100
4.2 Vorläufige Auslegung des Endlagers 116
4.2.1 Einleitung 117
4.2.2 Zusammenfassende Beschreibung der Methodik für die vorläufige Auslegung des Endlagers 118
4.2.3 Grundlagen 123
4.2.3.1 Abfallinventar 123
4.2.3.2 Wirtsgesteinseigenschaften 123
4.2.3.3 Sicherheitskonzept 123
4.2.4 Beschreibung der wesentlichen und weiteren Barrieren des Endlagersystems 123
4.2.5 Geplante Art der Einlagerung 124
4.2.6 Endlagerbergwerk 126
4.2.6.1 Allgemeiner Aufbau des Endlagerbergwerks 126
4.2.6.2 Endlagerbehälter und Annahmen 129
4.2.6.3 Transport- und Einlagerungstechnik (Streckenlagerung) 133
4.2.6.4 Grundlagen für Bau und Betrieb 135
4.2.6.5 Mögliche Maßnahmen zur Rückholbarkeit 146

4.2.6.6	Mögliche Verschluss- und Versatzmaßnahmen	152
4.2.6.7	Mögliche Maßnahmen zur Geringhaltung der Schädigung der wesentlichen Barrieren	164
4.2.6.8	Flächenbedarfsbestimmung Infrastrukturbereich	182
4.2.6.9	Festlegung und Begründung wesentlicher Maße des Endlagerbergwerks	183
4.2.7	Gebirgsmechanische Auslegung	186
4.2.8	Vorläufige Prognose der Endlagerflächenbedarfe	195
4.2.8.1	Einführung	195
4.2.8.2	Abfallinventar und Wärmeleistung	196
4.2.8.3	Behälter- und Einlagerungskonzept	198
4.2.8.4	Auslegungsstrategie	204
4.2.8.5	Simulationsmodell	206
4.2.8.6	Behälterbeladungen für wärmeentwickelnde Abfälle	211
4.2.8.7	Kumulierte Endlagerflächenbedarfe	216
4.2.9	Optimierung des Endlagersystems gemäß § 12 EndlSiAnfV	220
4.2.10	Endlagerauslegung im Untersuchungsraum bzw. Teiluntersuchungsraum	222
5	**Geosynthese (§ 5 EndlSiUntV)**	**225**
5.1	Umgang mit heterogener Datenlage	229
5.1.1	Datentypen und ihre geologische Aussagefähigkeit	230
5.1.2	Bewertung der Datenlage und der geologischen Rahmenbedingungen	232
5.1.2.1	Kenngrößen	232
5.1.2.2	Ableitbarkeit der Untergrundbeschaffenheit	239
5.1.3	Maßnahmen in Zusammenhang mit heterogener Datenlage	240
5.1.3.1	Überarbeiteter Bewertungsansatz für Phase I Schritt 2	240
5.1.3.2	Repräsentative Profile	241
5.1.3.3	Umgang mit interpretativen Grundlagen für die rvSU	241
5.1.4	Umgang mit Gebieten ohne hinreichende Informationen nach § 14 StandAG	242
5.1.4.1	Grundlegende Definition von nicht hinreichenden Informationen	243
5.1.4.2	Umgang mit Gebieten mit nicht hinreichender Informationen	250
5.2	Herausforderung Internbauprognose Steinsalz „in steiler Lagerung“	250
5.2.1	Salzstrukturen in Norddeutschland	251
5.2.2	Lithologischer Aufbau der Salzstrukturen mit Wirtsgestein Steinsalz „in steiler Lagerung“	252
5.2.3	Charakterisierbarkeit von Salzstrukturen	254
5.2.4	Internbauprognose	255
5.2.5	Indikatoren für die Internbauprognose	256
5.2.5.1	Genese der Salzstruktur (inkl. tektonischer Überprägung) und die Lage innerhalb des Norddeutschen Beckens	256
5.2.5.2	Strukturaufbauende Ausgangsgesteine	257
5.2.5.3	Größe der Salzstruktur	258
5.2.5.4	Morphologie der Salzstrukturen	258

5.3	Geowissenschaftliche Langzeitprognose – Beschreibung geogener Prozesse	258
5.4	Beschreibung des Wirtsgesteinsbereichs mit Barrierefunktion in Hinblick auf die zielgerichtete Anwendung der Mindestanforderungen	264
5.4.1	Mindestanforderung „Mächtigkeit“	265
5.4.2	Beispiele zur Überprüfung der Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“	266
5.4.3	Minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs	275
5.4.4	Erhalt der Barrierewirkung	279
5.5	Zielgerichtete Anwendung der Ausschlusskriterien	281
5.5.1	Anwendung des Ausschlusskriteriums Aktive Störungszonen	281
5.5.2	Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit	287
5.5.3	Seismische Aktivität	291
5.5.4	Vulkanische Aktivität	291
5.5.5	Grundwasseralter	294
5.6	Unterteilung von Untersuchungsräumen in Teiluntersuchungsräume	294
5.6.1	Beispiele zur Unterteilung von Untersuchungsräumen in Teiluntersuchungsräume	295
5.7	Geosynthese auf Teiluntersuchungsraumebene	307
5.7.1	Räumliche Konfiguration der Gesteinskörper	307
5.7.1.1	Beschreibung der geologischen Barrieren des Endlagersystems für die Erstellung des vorläufigen Sicherheitskonzeptes und der vorläufigen Auslegung des Endlagers für Teiluntersuchungsräume	310
5.7.2	Kriterium zur Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper (Anlage 2 (zu § 24 Abs. 3) StandAG)	324
5.7.2.1	Beispiele zur Ausarbeitung und Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper (Anlage 2 (zu § 24 Abs. 3) StandAG)	327
5.7.3	Charakterisierung des Internbaus des Wirtsgesteinsbereiches mit Barrierefunktion	348
5.7.4	Kriterium zur Bewertung der räumlichen Charakterisierbarkeit Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG	348
5.7.4.1	Indikator 3.1a „Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich“	350
5.7.4.2	Beispiele zu Indikator 3.1a „Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich“	353
5.7.4.3	Indikator 3.1b „Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften“	369
5.7.4.4	Beispiele zur Bearbeitung des Indikators 3.1b „Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften“	370
5.7.4.5	Indikator 3.1 c „Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit“	385
5.7.4.6	Beispiele Indikator 3.1c „Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit“	390
5.7.4.7	Indikator 3.2 „Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)“	396

5.7.4.8 Beispiele zu Indikator 3.2 „Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)“ 398
5.7.5 Spezifizierung der geogenen Prozesse 407
5.7.6 Geologische Modelle für die quantitative Analyse des sicheren Einschlusses 411

6 Analyse des Endlagersystems (§ 7 EndlSiUntV) – qualitative Bewertung des sicheren Einschlusses 417

6.1 Bewertung der Anlagen 1 bis 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG 423
6.2 Begründung zur Anwendung der Anlagen 1 bis 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG im Rahmen der Analyse des Endlagersystems 423

7 Umfassende Bewertung anhand der qualitativen Bewertung des sicheren Einschlusses (§ 10 EndlSiUntV) 428

7.1 Ableitung und Definition eines Prüfschritts anhand der Anlagen 1 – 4 des StandAG 430
7.2 Zusammenfassende Begründung zur Einführung des Prüfschritts der Kategorie C im Rahmen der Umfassenden Bewertung 432
7.3 Übersicht zur Umfassenden Bewertung der GzME 433
7.4 Anwendungsbeispiele zur Einstufung einzelner Gebiete in die Kategorie C 438

8 Analyse des Endlagersystems (§ 7 EndlSiUntV) 452

8.1 Einleitung 452
8.2 Ableitungen von Entwicklungen 456
8.2.1 Zusammenfassung 456
8.2.2 Einleitung – Entwicklungen des Endlagersystems 459
8.2.3 FEP-Katalog 466
8.2.3.1 Auswahl relevanter FEP in den rvSU 467
8.2.3.2 Entwicklung des FEP-Katalogs für das Standortauswahlverfahren 469
8.2.3.3 Komponenten und Eigenschaften 472
8.2.3.4 Ereignisse und Prozesse 474
8.2.3.5 Verknüpfung zwischen Sicherheitsfunktionen und Komponenten und Prozessen 476
8.2.3.6 FEP-Screening 478
8.2.3.7 Wirtsgesteinsspezifische FEP-Kataloge 479
8.2.3.8 untersuchungsraumspezifische FEP-Kataloge 483
8.2.3.9 Qualitätsmanagement und Nachvollziehbarkeit 486
8.2.4 Ableitung von Entwicklungen 487
8.2.4.1 Ausgangspunkte der Ableitung von Entwicklungen 489
8.2.4.2 Wirtsgesteinsspezifische Entwicklungen 490
8.2.4.3 Von wirtsgesteinsspezifischen zu untersuchungsraumspezifischen Entwicklungen 494
8.2.5 Ergebnisse der Szenarienentwicklung 501
8.2.5.1 Umgang mit Ungewissheiten 501
8.2.5.2 Formulierung von Rechenfällen 501
8.2.5.3 Qualitative Aussagen 511

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

8.3	Der Aspekt b) im Zusammenspiel mit der Ableitung und Bewertung von Entwicklungen	511
8.4	Funktionsfähigkeit von technischen und geotechnischen Barrieren	513
8.5	Quantitative Bewertung des sicheren Einschlusses	514
8.5.1	Einleitung	514
8.5.2	Anforderungen	516
8.5.3	Strategie und Kennzahlen	517
8.5.4	Rechenfälle und Rechenläufe zur Bestimmung der Transportlänge $\mathbf{d1Ma}$	521
8.5.4.1	Sensitivitätsanalyse der Modellparameter	523
8.5.4.2	Monte-Carlo-Simulationen	525
8.5.5	Arbeitsablauf zur Bestimmung von Modellparameterwerten und Bandbreiten	528
8.5.6	Die Bestimmung des minimalen Abstands $\boldsymbol{dmin}$	530
8.5.6.1	Allgemeines Vorgehen	530
8.5.6.2	Besonderheiten für Steinsalz in steiler Lagerung	531
8.5.7	Die Bestimmung der Transportlänge $\boldsymbol{d1Ma}$	536
8.5.7.1	Detaillierungsgrad und Annahmen der numerischen Transportmodelle	536
8.5.7.2	Berechnungsansatz	538
8.5.7.3	Wirtsgesteinsspezifische Überlegungen	547
8.5.8	Auswertungen bezüglich der Transportlängen und Kennzahlen	551
8.5.9	Diskussion und Ungewissheiten bei der Bewertung der Möglichkeit des sicheren Einschlusses	553
8.5.10	Möglichkeit zur Ausweisung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs	555
8.5.10.1	Bewertung anhand der Möglichkeit des sicheren Einschlusses	555
8.5.10.2	Bewertung anhand der Betrachtung von Entwicklungen	556
8.6	Bewertung des Flächenbedarfs und der thermischen Verhältnisse	557
8.6.1	Einleitung und thematischer Hintergrund	557
8.6.1.1	Hintergrund zu den thermischen Verhältnissen im Endlagersystem	559
8.6.1.2	Hintergrund zur Betrachtung des Flächenbedarfs	561
8.6.2	Die Berechnung des Flächenbedarfs	562
8.6.3	Kombinierte Bewertung von thermischen Verhältnissen (Aspekt c)) und Flächen-bedarf (Aspekt d))	562
8.6.3.1	Allgemeines Vorgehen bei der kombinierten Bewertung	562
8.6.3.2	Vorgehen bei Steinsalz in steiler Lagerung	564
8.6.4	Ungewissheiten bei der kombinierten Bewertung der thermischen Verhältnisse und des Flächenbedarfs	566
8.7	Darstellung der Möglichkeit des sicheren Betriebs	567
8.7.1	Zusammenfassung der Methodik zur Betriebssicherheit im Rahmen der rvSU	568
8.7.2	Vorläufige Endlagerkonzepte und Teilsysteme	570
8.7.3	Erstellung eines abdeckenden Katalogs	572
8.7.4	Prüfung der Möglichkeit eines sicheren Betriebs für einen Untersuchungsraum	588
8.7.5	Bewertung der Robustheit der Betriebssicherheit in einem Untersuchungsraum	589

8.8	Relevanz der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien	590
8.8.1	Einleitung	590
8.8.2	Mögliche Vorgehensweise zur Bearbeitung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien Relevanz	591
8.8.2.1	Allgemeines Vorgehen	591
8.8.2.2	Bedeutung für die Sicherheitsfunktion	595
8.8.2.3	Aktuelle Kenntnis der lokalen Sachverhalte	595
8.8.2.4	Potenzial für den Erkenntnisgewinn	598
8.9	Beurteilung der zusätzlichen Einlagerung von schwach- und mittelradioaktiven Abfällen (SMA)	599
8.9.1	Mengengerüst für die zusätzliche Einlagerung größerer Mengen SMA	600
8.9.1.1	Rückzuholende Abfälle aus der Schachtanlage Asse II	600
8.9.1.2	Abfälle aus der Urananreicherung	600
8.9.1.3	Graphithaltige Abfälle	600
8.9.1.4	Sonstige Abfallvolumina	601
8.9.1.5	Zusammenfassung des SMA-Abfallmengengerüstes	601
8.9.2	Vorgehensweise bei der Beurteilung der zusätzlichen Einlagerung von SMA	602
9	**Umfassende Bewertung des Endlagersystems für jeden Untersuchungsraum (§ 10 EndlSiUntV)**	**604**
10	**Bewertung von Ungewissheiten (§ 11 EndlSiUntV)**	**607**
10.1	Gesetzliche Grundlagen	607
10.2	Definition und Verwendung des Begriffs „Ungewissheit“	608
10.3	Aktueller Wissensstand	610
10.3.1	Ursachen für Ungewissheiten und Kategorisierungsansätze	610
10.3.2	Etablierte Strategien zum Umgang mit Ungewissheiten	613
10.3.3	Möglichkeiten der Charakterisierung von Ungewissheiten	614
10.4	Umgang und Bewertung von Ungewissheiten in den rvSU	616
10.4.1	Überblick der Herangehensweise	616
10.4.2	Systematische Erfassung und Dokumentation von Ungewissheiten	618
10.4.3	Kategorisierung von Ungewissheiten	621
10.4.4	Umgang mit Ungewissheiten unterschiedlicher Kategorien	622
10.4.5	Ungewissheiten in Modellen	623
10.4.6	Auswirkungen von Ungewissheiten auf die Ergebnisse der rvSU	624
10.4.7	Reduktion von Ungewissheiten basierend auf den rvSU	626
10.5	Zusammenfassung und Ausblick	628
11	**Ableitung des Erkundungs-, Forschungs- und Entwicklungsbedarfs (§ 12 EndlSiUntV)**	**629**
11.1	Einleitung	629
11.2	Grundlagen	630

11.3 Ableitung des Erkundungs-, Forschungs- und Entwicklungsbedarfe 632

11.4 Priorisierung der abgeleiteten Erkundungs-, Forschungs- und Entwicklungsbedarfe 634

11.5 Erarbeitung standortbezogener Erkundungsprogramme 635

Anhang **637**

Literaturverzeichnis **714**

Anzahl der Blätter dieses Dokumentes **744**

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Lage des GzME im Teilgebiet 035_00TG_057_00IG_S_s_z. 54

Abbildung 2: Lage des GzME im Teilgebiet 078_02TG_197_02IG_S_f_z. 55

Abbildung 3: Lage des GzME im Teilgebiet 009_00TG_194_00IG_K_g_S. 56

Abbildung 4: Lage des GzME im Teilgebiet 001_00TG_032_01IG_T_f_jmOPT. 57

Abbildung 5: Schematische Darstellung der Arbeitsschritte der rvSU gemäß EndlSiUntV 58

Abbildung 6: Ablauf der Bearbeitungsschritte einer rvSU. 65

Abbildung 7: Datenflussdiagramm. Mit dem Begriff „geologische Barriere“ ist der Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion gemeint 67

Abbildung 8: Einordnung der Ausweisung von Untersuchungsräumen in den Kontext der rvSU in Phase I, Schritt 2 des Standortauswahlverfahrens 88

Abbildung 9: Untersuchungsraum des GzME „Opalinuston“ (Teilgebiet 001_00TG_032_01IG_T_f_jmOPT). 89

Abbildung 10: Einordnung des vorläufigen Sicherheitskonzeptes in den Kontext der rvSU 94

Abbildung 11: Vereinfachte graphische Darstellung der nach § 4 Abs. 3 EndlSiAnfV genannten Möglichkeiten zum Erreichen des sicheren Einschlusses der radioaktiven Abfälle im Bewertungszeitraum. 98

Abbildung 12: Schematische Darstellung der Barrieren in einem Endlagersystem Typ 1. 104

Abbildung 13: Die Abbildung stellt die Funktionsweise des gestaffelten Barrierensystems für das Endlagersystem Typ 1 dar. 105

Abbildung 14: Einordnung der vorläufigen Auslegung des Endlagers in den Kontext der rvSU. 116

Abbildung 15: Schematische Darstellung der Methodik zur wirtsgesteinsspezifischen vorläufigen Endlagerauslegung im Rahmen der rvSU (Teil 1 der Methodik) 119

Abbildung 16: Schematische Darstellung der Methodik zur (teil-)untersuchungsraumspezifischen vorläufigen Endlagerauslegung im Rahmen der rvSU (Teil 2 der Methodik) 122

Abbildung 17: Schematische Darstellung des Endlagerbergwerks für Streckenlagerung 128

Abbildung 18: Endlagerbehälter für Brennstäbe aus bis zu 10 DWR-, 30 SWR- oder 25 WWER- Brennelementen (Bollingerfehr et al. 2008) 130

Abbildung 19: Annahme zum Endlagerbehälter für Brennstäbe aus 3 DWR-, 9 SWR- oder 7,5 WWER-Brennelementen, nach (Bertrams et al. 2021) 131

Abbildung 20: Annahme zum Endlagerbehälter für CSD-V, nach (Bertrams et al. 2021) 132

Abbildung 21: Annahme zum Endlagerbehälter für Abfälle aus Forschungs- und Prototypreaktoren entsprechend den Behältern CASTOR® AVR/THTR, KNK und MTR2 (Bollingerfehr et al. 2012) 133

Abbildung 22: CAD-Modell für das Beispiel eines gleisgebundenen Transportwagens (Bertrams et al. 2021) 134

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

Abbildung 23: CAD Modell eines Beispiels für eine frei verfahrbare Einlagerungsvorrichtung mit angehobenem Endlagergebinde (Bertrams et al. 2021) 135

Abbildung 24: Skizze des Querschnitts der Einlagerungsstrecke für die Streckenlagerung im Opalinuston 139

Abbildung 25: Skizze des Sockels mit Endlagergebinde (links: Endlagergebinde mit Brennstäben aus Leistungsreaktoren, rechts: Endlagergebinde mit CSD-V) 140

Abbildung 26: Skizze des Querschnitts der Einlagerungsstrecke für die Streckenlagerung im steilen Steinsalz 141

Abbildung 27: Schematische Darstellung des Endlagerbergwerks im Betrieb 143

Abbildung 28: Schematische Darstellung der Bewetterung bei Streckenlagerung 144

Abbildung 29: Schematische Darstellung des Endlagerbergwerks für Streckenlagerung mit Bewetterungsströmen und exemplarischer Fluchtwegsituation 146

Abbildung 30: Darstellung der mELVIS im angehobenen Zustand mit Endlagerbehälter (Herold et al. 2018b) 151

Abbildung 31: Darstellung von Positionen von Streckenverschlüssen im Endlager 154

Abbildung 32: Beispiel für ein Konzept für einen Streckenverschluss im Opalinuston (Jobmann & Lommerzheim 2015) 159

Abbildung 33: Beispiel für ein Konzept für einen Schachtverschluss für ein Endlager im Opalinuston (Herold et al. 2020b) 160

Abbildung 34: Beispiel eines Schachtverschlusses für ein Endlager in Steinsalz in steiler Lagerung (Bertrams et al. 2020a) 163

Abbildung 35: Allgemeiner Aufbau des Endlagerbergwerks mit Bemaßung für die Ermittlung des Flächenbedarfs 183

Abbildung 36: Errechnete Mindestverhältnisse von Pfeilerbreiten zu Streckenbreiten im Zusammenhang mit der Teufe 192

Abbildung 37: Eingangsgrößen des kumulierten Endlagerflächenbedarfs 195

Abbildung 38: Zugrunde gelegte Wärmeleistung von bestrahlten Brennelementen und Kokillen in Abhängigkeit der Abklingzeit auf Basis der Daten der VSG (Peiffer et al. 2012) 198

Abbildung 39: Skizze des vereinfachten Behältermodells für die Simulationen 199

Abbildung 40: Beispielhafte Darstellung des Streckenquerschnitts (mit Ausbau) für ein Endlager im Tongestein und Gebinde mit bestrahlten Brennelementen (links) und Gebinde mit CSD-V Kokillen (rechts) 201

Abbildung 41: Beispielhafte Darstellung des Streckenquerschnitts für ein Endlager im Steinsalz und Gebinde mit bestrahlten Brennelementen oder CSD-V Kokillen 203

Abbildung 42: Veranschaulichung des im Rahmen der Simulation verwendeten Viertelmodells (grün) am Beispiel einer vorläufigen Endlagerauslegung im Steinsalz (steile Lagerung) 207

Abbildung 43: Schematische Darstellung der Position des Auswertungspunkts (für die maximale Temperatur an der Behälteraußenwand) am Beispiel des Viertelmodells für die vorläufige Endlagerauslegung im Steinsalz 207

Abbildung 44: Schematische Darstellung der Randbedingungen für das Simulationsmodell 208

Abbildung 45: Beispiel für die räumliche Diskretisierung für die vorläufige Endlagerauslegung im Tongestein (52 013 Elemente, 11 407 Knoten) 210

Abbildung 46: Beispiel für die räumliche Diskretisierung für die vorläufige Endlagerauslegung im Steinsalz (33 667 Elemente, 7 299 Knoten) 210

Abbildung 47: Beispiel der zeitlichen Temperaturentwicklung an der Behälteraußenwand für eine Endlagerauslegung im Tongestein für die Inventararten CSD-V und DWR-MOX (Teufe 600 m, initiale Temperatur im Einlagerungsbereich von 28 °C) 213

Abbildung 48: Beispiel der zeitlichen Entwicklung des Temperaturfeldes im Einlagerungsbereich für eine Endlagerauslegung im Tongestein für die Inventarart CSD-V (Teufe 600 m, initiale Temperatur im Einlagerungsbereich von 28 °C) 213

Abbildung 49: Beispiel der zeitlichen Entwicklung des Temperaturfeldes im Einlagerungsbereich für eine Endlagerauslegung im Tongestein für die Inventarart DWR-MOX (Teufe 600 m, initiale Temperatur im Einlagerungsbereich von 28 °C) 214

Abbildung 50: Beispiel der zeitlichen Temperaturentwicklung an der Behälteraußenwand für eine Endlagerauslegung im Steinsalz für die Inventararten CSD-V und DWR-MOX (Teufe 600 m, initiale Temperatur im Einlagerungsbereich von 28 °C) 215

Abbildung 51: Beispiel der zeitlichen Entwicklung des Temperaturfeldes im Einlagerungsbereich für eine Endlagerauslegung im Steinsalz für die Inventarart CSD-V (Teufe 600 m, initiale Temperatur im Einlagerungsbereich von 28 °C) 215

Abbildung 52: Beispiel der zeitlichen Entwicklung des Temperaturfeldes im Einlagerungsbereich für eine Endlagerauslegung im Tongestein für die Inventarart DWR-MOX (Teufe 600 m, initiale Temperatur im Einlagerungsbereich von 28 °C) 216

Abbildung 53: Prognostizierter Endlagerflächenbedarf für eine vorläufige Endlagerauslegung im Tongestein Opalinuston in Abhängigkeit des geothermischen Gradienten 217

Abbildung 54: Prognostizierter Endlagerflächenbedarf für eine vorläufige Endlagerauslegung im Tongestein Opalinuston in Abhängigkeit der initialen Temperatur im Einlagerungsbereich 218

Abbildung 55: Prognostizierter Endlagerflächenbedarf für eine vorläufige Endlagerauslegung im Steinsalz (steile Lagerung) in Abhängigkeit des geothermischen Gradienten 219

Abbildung 56: Prognostizierter Endlagerflächenbedarf für eine vorläufige Endlagerauslegung im Steinsalz (steile Lagerung) in Abhängigkeit der initialen Temperatur im Einlagerungsbereich 219

Abbildung 57: Beispielhafte Visualisierung der Endlagerauslegung im Teilgebiet 001_00TG_032_01IG_T_f_jmOPT (Opalinuston) in Nahaufnahme 223

Abbildung 58: Beispielhafte Visualisierung der Endlagerauslegung im Teilgebiet 035_00TG_057_00IG_S_s_z (Bahlburg) mit Ansicht des Salzstocks 224

Abbildung 59: Beispielhafte Visualisierung der Endlagerauslegung im Teilgebiet 035_00TG_057_00IG_S_s_z (Bahlburg) in Nahaufnahme 224

Abbildung 60: Schematische Darstellung des Ablaufs der rvSU gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung. 226

Abbildung 61: Übersicht über die übergeordneten Arbeitsschritte und vorläufigen Ergebnisse der Geosynthese (innerhalb des mit „Geosynthese“ markierten Kastens) sowie deren weiterer Verwendung innerhalb der rvSU. 227

Abbildung 62: Schematische Darstellung des Workflows zum Umgang mit einer heterogenen Datenlage 230

Abbildung 63: Schematische Darstellung der Ermittlung des Informationsgehalts und damit der Datenqualität von Bohrungen 234

Abbildung 64: Darstellung der Kategorisierung hinsichtlich des Informationsgehalts von Bohrungen am Beispiel der Teiluntersuchungsräume im GzME „Thüringer Becken“ 235

Abbildung 65: Beispiel für die Erstellung von Thiessen-Polygonen mit ArcGIS 236

Abbildung 66: Darstellung der Datenquantität bezogen auf Bohrungsinformationen über Thiessen-Polygone am Beispiel der Teiluntersuchungsräume im GzME „Thüringer Becken“ 237

Abbildung 67: Geologischer Ausschnitt aus der GK400 (LfULG, DokID_11839344_5) im Bereich der Lausitzer Grauwacken-Einheit und des Lausitzer Granodiorit-Komplexes. 245

Abbildung 68: Gravimetrische Daten (nach Wellenlängenfilterung Hochpass 50 km) im Bereich der GK100 LJK; Datenquelle Gravimetrie: LIAG; Skiba et al. (2010) 248

Abbildung 69: Magnetik-Daten im Bereich der GK100 LJK; dargestellt als magnetische Totalfeldanomalie ΔT in nT (Datenquelle: VEB Geophysik Leipzig) 249

Abbildung 70: Beispiel einer Salzstruktur (Hänigsen-Wathlingen) mit komplexem Internbau. 252

Abbildung 71: Schematisches stratigraphisches Profil des Zechstein im Bereich der Beckenfazies (Elsner 2016) 253

Abbildung 72: Seismisches Profil in Zeit [Zwei-Wege Laufzeit, TWT] mit einigen Interpretationen (oben) und einem geologischen Profilschnitt (in Tiefe) an gleichem Ort aus dem 3D-Modell TUNB (BGR 2021) (unten) über das GzME „Salzstock Bahlburg“. 255

Abbildung 73: Ausschnitt einer zeitbezogenen Zusammenstellung der großtektonischen Ereignisse und Auswirkung unterschiedlich orientierter Stressfelder auf die Beckenentwicklung sowie die Genese von Salzstrukturen in Norddeutschland und der deutschen Nordsee (Auszug aus Pollok et al. 2020). 257

Abbildung 74: Idealisiertes Normalprofil der salinaren und postsalinaren Schichtenfolge im Thüringer Becken (Quelle: BGE). 267

Abbildung 75: Vorläufiges Ergebnis der Überprüfung der Mächtigkeit für die Steinsalz-Horizonte der Werra- und Staßfurt-Formation im GzME „Thüringer Becken“ 269

Abbildung 76 Idealisiertes Normalprofil des Mitteljura in Süddeutschland (verändert nach UM BW 2018, Anlage 2.4; und BGE 2020j). 271

Abbildung 77: Vorläufiges Ergebnis der Überprüfung der Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ im GzME „Opalinuston“. 272

Abbildung 78: Mächtigkeitsinterpretation der kristallinen Wirtsgesteine im Tiefenbereich zwischen 0 m und 1 500 m u. GOK im östlichen Bereich des Gebietes zur Methodenentwicklung, dem Teilgebiet 009_00TG_194_00IG_K_g_SO „Saxothuringikum“. 274

Abbildung 79: Schematische Darstellung der vereinfachten Tiefeninterpretation 277

Abbildung 80: Darstellung der Tiefenlage der kristallinen Wirtsgesteine zwischen 0 m und 1 500 m u. GOK. 278

Abbildung 81: Ausgeschlossenes Gebiet durch das Ausschlusskriterium „Aktive Störungszonen – Atektonische Störungen“ im Bereich des Impaktkraters Nördlinger Ries in Schritt 2 der Phase I. 284

Abbildung 82: Erweiterte Anwendung des Auschlusskriteriums „Aktive Störungszonen – Atektonische Vorgänge“ im GzME „Thüringer Becken“. 286

Abbildung 83: Übersicht über die in Schritt 1 der Phase I vorgemerkten bergbaulichen Tätigkeiten, die in Schritt 2 der Phase I zu einem ausgeschlossenen Gebiet führen 290

Abbildung 84: Ausgeschlossene Gebiete im Vogtland und Nordostbayern durch die weiterentwickelte Anwendung des Ausschlusskriteriums „Vulkanische Aktivität“ nach Schreiber & Jentzsch (2021). 293

Abbildung 85: Lage der Teiluntersuchungsräume im GzME „Thüringer Becken“. 297

Abbildung 86: Darstellung der Gebiete, die die Mindestanforderungen „Flächenbedarf“ oder „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ nicht erfüllen und damit nicht weiter betrachtet werden 300

Abbildung 87: Lage der Teiluntersuchungsräume im GzME „Opalinuston“ 301

Abbildung 88: Unterteilung des östlichen Bereichs des GzME „Saxothuringikum“ in regionalgeologische Gebiete 302

Abbildung 89: Darstellung von Gebieten, welche die Mindestanforderungen nach § 23 StandAG erfüllen, sowie von Gebieten, in denen noch keine Bewertung erfolgt ist 303

Abbildung 90: Lage der Teiluntersuchungsräume im östlichen Bereich des GzME „Saxothuringikum“ 305

Abbildung 91: Ein Beispiel für ein repräsentatives Profil des Teiluntersuchungsraums 01_07UR, welches ermöglicht, den Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion (Opalinuston-Formation) zu identifizieren. 309

Abbildung 92: Für den Teiluntersuchungsraum 01_07UR sind fünf repräsentative Profile gezeigt, die den Aufbau des Untergrundes in verschiedenen Regionen widerspiegeln. 312

Abbildung 93: Tiefenlage der Opalinuston-Formation auf einem NW-SE-SW-Schnitt von der Schwäbischen Alb bis ins Molassebecken. 313

Abbildung 94: Synthetisches, repräsentatives Bohrprofil im Zentralbereich der Salzstruktur Bahlburg. 315

Abbildung 95: Bohrungskorrelation der Deckgebirgseinheiten in einem SW-NE verlaufenden Profil über den Salzstock Bahlburg. 317

Abbildung 96: Bohrungskorrelation der Deckgebirgseinheiten in einem WNW-ESE verlaufenden Profil über den Salzstock Bahlburg. 318

Abbildung 97: NW-SE gerichtetes seismisches Profil in Zeit [Zwei-Wege Laufzeit, TWT] (oben) und ein lagegleicher Profilschnitt (unten) aus dem geologischen 3D-Modell (BGR et al. 2021) über dem GzME „Salzstock Bahlburg“. 319

Abbildung 98: Profilschnitt (SW-NE) entlang von fünf Bohrungen aus dem geologischen 3D-Modell der Salzstruktur Bahlburg, ergänzt durch eine synthetische Bohrung im Zentralbereich der Salzstruktur 319

Abbildung 99: Variszische und cadomische kristalline Wirtsgesteine und Nebengesteine sowie Lage der repräsentativen Profile im Teiluntersuchungsraum 04_11UR (nach GK100 LJK, LfULG). 321

Abbildung 100: Repräsentative Profile im Teiluntersuchungsraum 04_11UR. 322

Abbildung 101: Geologischer Schnitt durch den Teiluntersuchungsraum 04_11UR („Meißener Pluton“), Lage siehe Abbildung 99. 323

Abbildung 102: Mächtigkeit der Opalinuston-Formation im Teiluntersuchungsraum 01_07UR. 329

Abbildung 103: Tiefenlage der oberen Begrenzung der Opalinuston-Formation im Teiluntersuchungsraum 01_07UR. 330

Abbildung 104: Hydrogeologische Gliederung des Mitteljura in Baden-Württemberg (LGRBwissen 2022b) 332

Abbildung 105: Übersicht zu den lithostratigraphischen Einheiten des Aalenium (Mittlerer Jura) in Südwestdeutschland (aus Franz & Nitsch 2009) 333

Abbildung 106: Mächtigkeit der Eisensandstein-Formation mit Lage des GzME „Opalinuston“ und Teiluntersuchungsraum 01_07UR. 335

Abbildung 107: Darstellung der Mächtigkeit des GzME „Salzstock Bahlburg“. 337

Abbildung 108: Teufenlage der oberen Begrenzung des Wirtsgesteinsbereiches mit Barrierefunktion des GzME „Salzstock Bahlburg“. 338

Abbildung 109: Schematische Darstellung der teufenabhängigen Flächenausdehnung des Teilgebietes in der Salzstruktur Bahlburg. 339

Abbildung 110: Bohrlokationen des GzME „ Salzstock Bahlburg“, an denen Abweichungen zwischen Bohrungsdaten und Modelldaten festgestellt wurden 340

Abbildung 111: Mächtigkeit des Staßfurt-Steinsalzes im Teiluntersuchungsraum 03_21UR. 343

Abbildung 112: Darstellung der Tiefenlage des Staßfurt-Steinsalzes im Teiluntersuchungsraum 03_21UR in Form repräsentativer Profile auf einem NW-SE-Schnitt. 344

Abbildung 113: Schematische Darstellung der Mächtigkeiten kristalliner Wirtsgesteinseinheiten im Teiluntersuchungsraum 04_11UR des GzME „Saxothuringikum“ 346

Abbildung 114: Schematische Darstellung der Teufenlage der oberen Begrenzung der kristallinen Wirtsgesteine im Teiluntersuchungsraum 04_11UR 347

Abbildung 115: Beispielhafte Darstellung eines Auszugs aus dem repräsentativen Profil der TB Donautherme Neu-Ulm im Opalinuston. 356

Abbildung 116: Bewertung des Indikators 3.1a „Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich“ im Teiluntersuchungsraum 01_07UR anhand relevanter Bohrungen. 357

Abbildung 117: Beispielhafte Darstellung eines Auszugs aus dem repräsentativen Profil im Staßfurt-Steinsalz im Teiluntersuchungsraum 03_21UR im Thüringer Becken. 360

Abbildung 118: Bewertung des Indikators 3.1a „Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich“ im Teiluntersuchungsraum 03_21UR 361

Abbildung 119: Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich durch das Vorkommen von vulkanischen Gängen im Teiluntersuchungsraum 04_11UR. 364

Abbildung 120: Vektorisierter Ausschnitt der GK25 des LfULG (Blatt 4747) im Raum nördlich von Priestewitz mit erkennbaren vulkanischen Ganggesteinen in kristallinen Wirtsgesteinen des Meißener Plutons 365

Abbildung 121: Darstellung des petrographischen Schichtenverzeichnisses von Bohrung B…95….1972; vulkanische Einheiten (Rhyolith, gangförmig und Dacit, gangförmig) durchschlagen kristallines Wirtsgestein (Biotit-Granodiorit) 366

Abbildung 122: Bohrung Bahlburg 1 im nördlichen Randbereich des GzME „Salzstock Bahlburg“ mit Informationen zu Stratigraphie und Lithologie. 369

Abbildung 123: Räumliche Korrelation von Bohrungen im GzME „Opalinuston“ 372

Abbildung 124: Bewertung des Indikators 3.1b „Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften“ im Teiluntersuchungsraum 01_07UR (Lage der Vulkanschlote aus Villinger & Franz 2011) 374

Abbildung 125: Räumliche Korrelation der repräsentativen Profile im Teiluntersuchungsraum 03_21UR im GzME „Thüringer Becken“. 376

Abbildung 126: Vereinfachte geologische Karte mit verschiedenen Gesteinstypen im Teiluntersuchungsraum 04_11UR 378

Abbildung 127: Darstellung der räumlichen Verteilung der Gesteinstypen und ihrer Eigenschaften im Teiluntersuchungsraum 04_11UR 380

Abbildung 128: Schematische Platzierung der Bohrungen Luhdorf 1 und Bahlburg 1 im Randbereich der Hauptaufstiegzone nach von Goerne et al. (2016) 382

Abbildung 129: Bohrungskorrelation innerhalb der Salzstruktur Bahlburg. 384

Abbildung 130: Schematische Darstellung von Gesteinen, die verschiedene Deformationszyklen durchlaufen haben. 387

Abbildung 131: Bewertung der Flexuren im Bereich der Finne-Störung für den Zechstein am Beispiel des Profilschnitts „Heldrungen“, verändert nach Malz & Kley (2012) 388

Abbildung 132: Schematische Darstellung von Diskontinuitäten im Wirtsgestein mit dem dazugehörigen „bedingt günstigen“ Bereich. 389

Abbildung 133: Lage des Teiluntersuchungsraums 01_06UR Hegau im Tektonischen Großraum der Freiburg-Bonndorf-Bodensee Scherzone (Störungszonen aus LGRB 2015) 392

Abbildung 134: Lage des Teiluntersuchungsraums 04_11UR zwischen den tektonischen Einheiten des Granulit-Erzgebirgs-Blocks und des Lausitzer Blocks im tektonischen Großraum Elbezone (GK400 verändert nach LfULG 2016). 395

Abbildung 135: Paläogeographische Situation zu Beginn der Ablagerung des Opalinustons. 400

Abbildung 136: Paläogeographische Situation zur Zeit der Staßfurt-Formation im Zechstein (Deutsche Stratigraphische Kommission 2020). 402

Abbildung 137: Darstellung der Gesteinsfazies im Teiluntersuchungsraum 04_11UR 404

Abbildung 138: Übersicht über die Faziesverteilung der Staßfurt-Formation (z2) im norddeutschen Raum mit dazugehörigen Verbreitungsgrenzen nach Deutsche Stratigraphische Kommission (2020). 406

Abbildung 139: Lage der tertiären Hegau-Vulkanite (nach LGRB 2015) 410

Abbildung 140: Beispiel für Modelleinheiten im GzME „Opalinuston“ am Beispiel des repräsentativen Profiles der TB Donautherme Neu-Ulm 414

Abbildung 141: Auszug aus dem geologischen 3D-Modell des GzME „Salzstock Bahlburg“ 416

Abbildung 142: Schematische Darstellung der Arbeitsschritte der rvSU gemäß EndlSiUntV 418

Abbildung 143: Schematische Darstellung der Arbeitsschritte der rvSU gemäß EndlSiUntV. 429

Abbildung 144: Einstufung von Gebieten in die Kategorie D und C im Untersuchungsraum des GzME „Opalinuston“. 435

Abbildung 145: Einstufung von Gebieten in die Kategorie D und C im östlichen Teil des Untersuchungsraum des GzME „Saxothuringikum“. 436

Abbildung 146: Einstufung von Gebieten in die Kategorie D und C im Untersuchungsraum des GzME „Thüringer Becken“. 437

Abbildung 147: Tiefenlage der oberen Begrenzung der Opalinuston-Formation im Teiluntersuchungsraum 01_06UR. 439

Abbildung 148: Tiefenlage der oberen Begrenzung der Opalinuston-Formation. 441

Abbildung 149: Lage der Bohrungen zur Erstellung der repräsentativen Profile des Teiluntersuchungsraums 04_02UR 443

Abbildung 150: Repräsentative Profile des Teiluntersuchungsraums 04_02UR. 444

Abbildung 151: Lage des Teiluntersuchungsraums 04_02UR im tektonischen Großraum Elbezone 446

Abbildung 152: Ausschnitt aus dem Composite Log der Bohrung E Erfurt 1/1964 im Bereich des Zechstein bis Endtiefe mit der Bewertung zu Indikator 3.1 a „Barrierenmächtigkeit“ 448

Abbildung 153: Bewertung des Indikators 3.1 c im Teiluntersuchungsraum 03_03UR mit Isolinien der Mächtigkeit des Werra-Steinsalzes (aus Seidel 2013) 449

Abbildung 154: Einordnung der Analyse des Endlagersystems (§ 7 EndlSiUntV) in den Kontext der rvSU 452

Abbildung 155: Schematischer Überblick der zu erarbeitenden Inhalte der Analyse des Endlagersystems gemäß § 7 Abs. 6 EndlSiUntV für die rvSU 454

Abbildung 156: Schematische Darstellung der Inhalte des Analyse des Endlagersystems mit Fokus der in Kapitel 8 beschriebenen Arbeitsschritte und der Reihenfolge der Bearbeitung von Aspekten a) bis f) 455

Abbildung 157 Schema der Ableitung der Entwicklungen vom Sicherheitskonzept bis zum abschließenden sicherheitsgerichteten Diskurs mit Leitfragen für jeden Arbeitsschritt. 458

Abbildung 158: Einordnung der Ableitung der Entwicklungen in den Kontext der rvSU 460

Abbildung 159: Entwicklungen im Endlagersystem. 462

Abbildung 160: Die systematisch abgeleiteten Entwicklungen des Endlagersystems sind zentral für die schrittweise Optimierung von Sicherheitskonzept und Endlagerauslegung. 463

Abbildung 161: Schema zur Darstellung der unterschiedlichen FEP-Kataloge. 470

Abbildung 162: Die geowissenschaftliche Langzeitprognose fasst alle geogenen Prozesse zusammen, die im Bereich der ausgewiesenen Teilgebiete auftreten (Screening). 471

Abbildung 163: Durch Änderungen der Werte ihrer Eigenschaften können Komponenten im Bewertungszeitraum verschiedene Zustände durchlaufen 473

Abbildung 164 Veranschaulichung der im FEP-Katalog dokumentierten Beeinflussungen zwischen Prozessen und den Eigenschaften von Komponenten. 477

Abbildung 165: Schematische Darstellung des wirtsgesteinsspezifischen FEP-Screenings 480

Abbildung 166: Schematische Darstellung des untersuchungsraumspezifischen Screenings 483

Abbildung 167: Auftreten und Ausprägung von Prozessen und Komponenten im wirtsgesteinsspezifischen Endlagersystem für Tongestein 484

Abbildung 168: Anpassung von Auftreten und Ausprägung von Prozessen und Komponenten für das untersuchungsraumspezifische Endlagersystem 485

Abbildung 169: Auftreten und Ausprägung von Prozessen und Komponenten im untersuchungsraumspezifischen Endlagersystem 485

Abbildung 170: Schematische Darstellung zur Einordnung der Wahrscheinlichkeiten von Entwicklungen 488

Abbildung 171: Mögliche Betrachtungsreihenfolge von Themenfeldern innerhalb der Beschreibung der Entwicklung eines Endlagersystems, geordnet nach Klimaphasen, mit getrennter Diskussion klimaunabhängiger Prozesse 491

Abbildung 172: Bespielhafte Entwicklung für ein Endlagersystem mit dem Wirtsgestein Steinsalz in steiler Lagerung (nähere Beschreibung im Text) 493

Abbildung 173: Bespielhafte Entwicklung für ein Endlagersystem mit dem Wirtsgestein Steinsalz in steiler Lagerung für das GzME „Salzstock Bahlburg“ (schematische Darstellung ohne Maßstab). 496

Abbildung 174: Modellvorstellung der räumlichen Differenzierung in der zu erwartenden Entwicklung in b) und c) und einer abweichenden Entwicklung in d) am Beispiel des GzME „Opalinuston“ (01_00UR, schematische Darstellung ohne Maßstab). 499

Abbildung 175: Die räumlichen Zusammenhänge, die für die Ableitung der Entwicklungen relevant sind, sind voraussichtlich nicht deckungsgleich mit den Teiluntersuchungsräumen innerhalb eines Untersuchungsraums. 500

Abbildung 176: Fiktiver Untersuchungsraum 503

Abbildung 177: Mächtigkeit des Wirtsgesteins im Untersuchungsraum (stärkere Farbe entspricht größerer Mächtigkeit) und repräsentative diskrete Werte (größeres Symbol entspricht größerer Mächtigkeit) 503

Abbildung 178: Gebirgsdurchlässigkeit des Wirtsgesteins im Untersuchungsraum (stärkere Farbe entspricht größerer Gebirgsdurchlässigkeit) und repräsentative diskrete Werte (größeres Symbol entspricht größerer Gebirgsdurchlässigkeit). 504

Abbildung 179: Radionuklidaustrag in Abhängigkeit der räumlich variablen Mächtigkeit und Gebirgsdurchlässigkeit (Norden ist oben). 504

Abbildung 180: Erosion verringert von Süden her die Mächtigkeit des Deckgebirges. 505

Abbildung 181: Aufgrund der Erosion verringert sich lokal die Mächtigkeit des Deckgebirges, was lokal zu einer Erhöhung der Gebirgsdurchlässigkeit des Wirtsgesteins führt. 506

Abbildung 182: Der Radionuklidaustrag ist nicht nur im Raum variabel, sondern zusätzlich über die Zeit 507

Abbildung 183: Um zu einer abdeckenden Aussage zu gelangen muss es nicht notwendig sein, aus allen Kombinationen von Mächtigkeit und Gebirgsdurchlässigkeit einen Radionuklidaustrag zu berechnen. 508

Abbildung 184: Beispielhafte Übersetzung einer Entwicklung in Rechenfälle um die Radionuklidausbreitung unter Berücksichtigung von Ungewissheiten zu bestimmen 510

Abbildung 185: Ablauf der rvSU nach EndlSiUntV. 515

Abbildung 186: Beispiel für $d1Ma$ und $dmin$ in einem stratiformen Wirtsgestein 518

Abbildung 187: 1D geologischen Profils mit Radionuklidaustrag analog zur ersten Beispielrechnung 520

Abbildung 188: Ausschnitt aus dem Ablaufdiagramm der rvSU (Details siehe BGE (2022a)) 521

Abbildung 189: Schematische Darstellung des Zusammenhangs von Entwicklungen und Rechenfällen. 522

Abbildung 190: Arbeitsschritte zur Quantifizierung von Parameterungewissheiten innerhalb des Radionuklid-Transportmodells 523

Abbildung 191: Exemplarische Sensitivitätsanalyse der Diffusionsparameter innerhalb des 1D-Radionuklidmodells. 524

Abbildung 192: Detailausschnitt aus Abbildung 191 (man beachte die Skalierung der y-Achse) 524

Abbildung 193: Exemplarische Sensitivitätsanalyse der nuklidspezifischen Sorptionsparameter innerhalb des 1D-Radionuklidmodells. 525

Abbildung 194: Mögliche Varianten für die Ermittlung des minimalen Abstands $dmin$ 530

Abbildung 195: Positionierung des Endlagers in einer fiktiven steilstehenden Salzstruktur 532

Abbildung 196: Teilgebiet Bahlburg (grün) mit hypothetischen Endlagerbereich (orange) innerhalb des Salzstruktur Bahlburg (weiss). 534

Abbildung 197: Laterale Lage des hypothetischen Endlagerbereiches (orange) innerhalb des Teilgebiets Bahlburg. 535

Abbildung 198: Schematische Darstellung eines repräsentativen Profils, für das die Ausbreitung der Radionuklide berechnet wird 538

Abbildung 199 Schematische Darstellung des Vorgehens bei der Berechnung des Radionuklidaustrags. 539

Abbildung 200: Beispielhaft modellierte Radionuklidkonzentrationen nach 1 Million Jahren basierend auf dem in Abbildung 198 dargestellten geologischen Profil 541

Abbildung 201: Darstellung zur Berechnung der Transportlänge anhand der modellierten kumulativen Stoffmenge nach 1 Million Jahren basierend auf dem in Abbildung 198 dargestellten geologischen Profil 543

Abbildung 202: Relativer Stoffmengenaustrag für verschiedene Realisierungen im Rahmen der Ungewissheitsanalyse der verwendeten Parameter (Rechenfall 1 aus Beispiel 92) 545

Abbildung 203: Prüfung des jährlichen Stoffmengenaustrags für das in Abbildung 198 dargestellte Profil des Opalinustons 546

Abbildung 204: Mögliche Modellpfade in Steinsalz in steiler Lagerung 549

Abbildung 205: Beispielrechnung (1 Millionen Jahre) für Nuklidausbreitung für Steinsalz in steiler Lagerung: Dargestellt ist der Konzentrationsverlauf nach einer Million Jahre. 550

Abbildung 206: Box-Whisker-Plots der fünf Rechenfälle, die in Beispiel 92 ausführlich beschrieben sind. 552

Abbildung 207: Unterschiedliche Einflüsse einer Entwicklung je nach betrachtetem Bereich innerhalb eines Teiluntersuchungsraums. 557

Abbildung 208: Ablauf der rvSV nach EndlSiUntV. 558

Abbildung 209: Auszug der ablaufenden Prozesse im Tongestein in Abhängigkeit von der Temperatur. 560

Abbildung 210: Auszug der ablaufenden Prozesse im Steinsalz in Abhängigkeit von der Temperatur. 561

Abbildung 211: Beispielgrafik für die Flächenbedarfskennzahl in einem Salzstock (zur Darstellungszwecken in 2D) 565

Abbildung 212: Ablauf der rvSU nach EndlSiUntV. 567

Abbildung 213: Zusammenfassende Darstellung der Methodik zur Darstellung der grundsätzlichen Möglichkeit eines sicheren Betriebs im Rahmen der rvSU nach § 7Abs. 6 Nr. 4 EndlSiUntV 569

Abbildung 214: Ableitung der Bewertung der lokalen Sachverhalte 597

Abbildung 215: Ableitung der Bewertung des Potenzials für einen Erkenntnisgewinn 599

Abbildung 216: Einordnung der umfassenden Bewertung in den Kontext der rvSU in Phase I, Schritt 2 des Standortauswahlverfahrens 604

Abbildung 217: Beispielhafte Darstellung der Bewertungen in die Kategorien A bis D nach § 10 EndlSiUntV eines fiktiven Untersuchungsraums 605

Abbildung 218: Einordnung der Betrachtung von Ungewissheiten in den übergeordneten Kontext der rvSU in Phase I, Schritt 2 des Standortauswahlverfahrens 608

Abbildung 219: Exemplarische Illustration aleatorischer und epistemischer Ungewissheiten anhand einer fiktiven Parameterverteilung. 611

Abbildung 220: Ausschnitt aus dem allgemeinen Arbeitsablauf der rvSU gemäß des übergeordneten Konzepts zur Durchführung der rvSU (verändert nach BGE 2022a) 616

Abbildung 221: Schematische Darstellung der Herangehensweise zum Umgang mit Ungewissheiten in den rvSU basierend auf den Anforderungen von § 11 EndlSiUntV mit Verweisen zu den jeweiligen Kapiteln in diesem Dokument 617

Abbildung 222: Ausschnitt aus der Erfassungstabelle, der die Eingabefelder zur Charakterisierung einer Ungewissheit zeigt 619

Abbildung 223: Ausschnitt aus der Erfassungstabelle, der die Eingabefelder zum Umgang mit Ungewissheiten und die Dokumentation ihrer Auswirkungen zeigt 620

Abbildung 224: Ausschnitt aus der Erfassungstabelle, der die Eingabefelder zur Reduktion einer Ungewissheit zeigt 620

Abbildung 225: Ausschnitt aus der Erfassungstabelle, der das Eingabefeld zur übergeordneten Priorisierung einer Ungewissheit sowie das Bemerkungsfeld zeigt 620

Abbildung 226: Schematische Darstellung des Umgangs mit Ungewissheiten unterschiedlicher Kategorien. 623

Abbildung 227: Wirkzusammenhang der verschiedenen Ungewissheits-Kategorien. 624

Abbildung 228: Fiktives Beispiel einer Ungewissheit, die je nach dem zu betrachtenden System eine unterschiedliche Auswirkung auf die Sicherheit des Systems hat. 626

Abbildung 229: Schematische Darstellung der Arbeitsschritte der rvSU gemäß EndlSiUntV 630

Abbildung 230: Schematische Darstellung der Ableitung des Erkundungs-, Forschungs- und Entwicklungsbedarfs 631

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Übersicht zur weiterentwickelten und zielgerichteten Anwendung der Ausschlusskriterien im Rahmen der rvSU	71
Tabelle 2:	Übersicht zur weiterentwickelten und zielgerichteten Anwendung der Mindestanforderungen im Rahmen der rvSU	73
Tabelle 3:	Zum Stichtag 31.12.2019 erzeugte und endzulagernde Abfallmengen aus den Leistungs-, Versuchs- und Prototypreaktoren.	74
Tabelle 4:	Anzahl und Schwermetallmasse der endzulagernden Brennelementen (BE) aus den Leistungsreaktoren: Gesamtprognose nach VSG und Ist-Stand zum 31.12.2019	79
Tabelle 5:	Endzulagernde Kokillen mit Abfällen aus der Wiederaufarbeitung nach VSG und aktueller Stand	81
Tabelle 6:	Endzulagernde hochradioaktive Abfälle aus den Forschungs-, Versuchs- und Prototypreaktoren und Verbleib.	82
Tabelle 7:	Stand der für die rvSU verfügbaren Inventardaten	83
Tabelle 8:	Auszug aus den Sicherheitsprinzipien und -anforderungen an ein Endlagersystem gemäß § 26 Abs. 2 StandAG i. V. m. EndlSiAnfV	101
Tabelle 9:	Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion	108
Tabelle 10:	Deckgebirge	110
Tabelle 11:	Versatz im Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion	111
Tabelle 12:	Verschlussbauwerke im Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion und im Deckgebirge	113
Tabelle 13:	Endlagerbehälter	114
Tabelle 14:	Abfallform	115
Tabelle 15:	Zuordnung der Maßnahmengruppen zur Geringhaltung der Schädigung der wesentlichen Barrieren zu den Betrachtungszeiträumen gemäß § 6 Abs.4 Nr. 6 EndlSiUntV	166
Tabelle 16:	Maße am Beispiel Opalinuston und Steinsalz (in steiler Lagerung)	185
Tabelle 17:	Planungsannahmen für Streckenquerschnitte und Ausbau im Opalinuston im Rahmen der rvSU	191
Tabelle 18:	Mengengerüst für Abfälle mit signifikanter Wärmeleistung	196
Tabelle 19:	Mengengerüst für Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeleistung	197
Tabelle 20:	Repräsentative Abklingdauer für die wärmeentwickelnden Abfallarten	197
Tabelle 21:	Geometriedaten für vereinfachtes Behältermodell in den Simulationen	199
Tabelle 22:	Thermophysikalische Materialparameter für das vereinfachte Behältermodell	200
Tabelle 23:	Technisch maximal mögliche Behälterbeladungen entsprechend der Behälterannahmen für Tongestein und Steinsalz	200
Tabelle 24:	Thermophysikalische Materialparameter, abgeschätzt für eine vorläufige Endlagerauslegung im Tongestein am Beispiel des Opalinuston	202

Tabelle 25: Thermophysikalische Materialparameter, abgeschätzt für eine vorläufige Endlagerauslegung im Steinsalz 204

Tabelle 26: Mindeststreckenabstände zwischen Einlagerungstrecken für eine vorläufige Endlagerauslegung im Tongestein Opalinuston (Abstand Streckenmitte zu Streckenmitte) 205

Tabelle 27: Beispiel der Behälterbeladungen für eine vorläufige Endlagerauslegungen im Tongestein und Steinsalz für eine initiale Temperatur im Einlagerungsbereich von 28 °C und bei einer Teufe von 600 m 212

Tabelle 28: Mögliche Einstufung der Bewertung der Datenqualität anhand einer Einschätzung der teiluntersuchungsraumspezifischen Datenqualität 236

Tabelle 29: Einstufung der Bewertung der interpretativen und weiteren (indirekten) Nachweise anhand einer subjektiven Einschätzung der teiluntersuchungsraumspezifischen Datenlage 238

Tabelle 30: Einschätzung und Einstufung der Bewertung der geologischen Komplexität 239

Tabelle 31: Vorläufige Grenzziehung zwischen den verschiedenen angrenzenden Teiluntersuchungsräumen für das Werra-Steinsalz 298

Tabelle 32: Vorläufige Grenzziehung zwischen den verschiedenen angrenzenden Teiluntersuchungsräumen für das Staßfurt-Steinsalz 298

Tabelle 33: Vorläufige Grenzziehung zwischen den verschiedenen angrenzenden Teiluntersuchungsräumen imTeilgebiet 001_00 301

Tabelle 34: Vorläufige Grenzziehung zwischen den verschiedenen angrenzenden Teiluntersuchungsräumen imTeilgebiet 009_00 306

Tabelle 35: Auszug aus Anlage 2 (zu § 24 Abs. 3) StandAG 324

Tabelle 36: Übersicht über die Bewertung der Eigenschaften bzw. Indikatoren der Anlage 2 (zu § 24 Abs. 3) StandAG für 01_07UR im GzME „Opalinuston“ 328

Tabelle 37: Übersicht über die Bewertung der einzelnen Indikatoren der Anlage 2 (zu § 24 Abs. 3) StandAG des GzME „Salzstock Bahlburg“ 336

Tabelle 38: Übersicht zu festgestellten Abweichungen der salzstrukturumhüllenden Fläche zwischen Bohrungsinformationen und den vorhandenen 3D-Modellen, durch Ungewissheiten in der Hutgesteinsmächtigkeit oder Ungenauigkeiten in den verwendeten Modelle. 340

Tabelle 39: Übersicht über die Bewertung der einzelnen Indikatoren der Anlage 2 (zu § 24 Abs. 3) StandAG des Teiluntersuchungsraums 03_21UR im GzME „Thüringer Becken“ 342

Tabelle 40: Übersicht der Bewertungen der einzelnen Indikatoren der Anlage 2 (zu § 24 Abs. 3) StandAG des Teiluntersuchungsraums 04_11UR im GzME „Saxothuringikum" 345

Tabelle 41: Auszug aus Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG 350

Tabelle 42: Wertungsgruppen des Indikators Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich und Beispielanwendungen der drei Wirtsgesteine 352

Tabelle 43: Übersicht über die Bewertung des Indikators 3.1a „Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich“ der Eigenschaft „Ermittelbarkeit der relevanten Gesteinstypen und ihrer Eigenschaften im vorgesehenen Endlagerbereich, insbesondere im vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereich“ der Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG für 01_07UR im GzME „Opalinuston“ 353

Tabelle 44: Darstellung der Wertungsgruppen mit zugehörigen lithologischen Beschreibungen im Schichtenverzeichnis, Tonanteilen in Prozent nach Hoth et al. (2007) und Beispielanwendungen 354

Tabelle 45: Übersicht über die Bewertung des Indikators 3.1a „Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich“ für den Teiluntersuchungsraum 03_21UR im GzME „Thüringer Becken“ 358

Tabelle 46: Darstellung der Wertungsgruppen mit zugehörigen lithologischen Beschreibungen im Schichtenverzeichnis (obere Zeile) und mit Bewertung von Nebenkomponenten anhand von bohrlochgeophysikalischen Daten (untere Zeile) 359

Tabelle 47: Übersicht über die Bewertung des Indikators 3.1a „Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich“ der Anlage (zu § 24 Abs. 3) StandAG des Teiluntersuchungsraums 04_11UR 362

Tabelle 48: Übersicht über die Bewertung des Indikators 3.1a „Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich“ der Anlage (zu § 24 Abs. 3) StandAG des GzME „Salzstock Bahlburg“ 367

Tabelle 49: Übersicht über die Bewertung des Indikators 3.1b „Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften“ der Anlage 3 zu § 24 StandAG für 01_07UR im GzME „Opalinuston“ 370

Tabelle 50: Übersicht über die Bewertung des Indikators 3.1b „Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften“ der Anlage 3 (zu § 24) StandAG für 03_21UR im GzME „Thüringer Becken“ 375

Tabelle 51: Übersicht über die Bewertung des Indikators 3.1b „Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften“ der Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG für den Teiluntersuchungsraum 04_11UR 377

Tabelle 52: Übersicht über die vorläufige Bewertung des Indikators „Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften“ der Anlage 3 (zu § 24) StandAG für das GzME „Salzstock Bahlburg“ 381

Tabelle 53: Wertungsgruppen der überregionalen und regionalen Störungszonen. 389

Tabelle 54: Übersicht über die Bewertung des Indikators „Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit“ der Eigenschaft „Ermittelbarkeit der Gesteinstypen und ihre charakteristischen Eigenschaften im vorgesehenen Endlagerbereich, insbesondere im vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereich“ der Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG für 01_07UR im GzME „Opalinuston“ 390

Tabelle 55: Übersicht über die Bewertung des Indikators „Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit“ der Eigenschaft „Ermittelbarkeit der Gesteinstypen und ihre charakteristischen Eigenschaften im vorgesehenen Endlagerbereich, insbesondere im vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereich“ der Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG für den Teiluntersuchungsraum 04_11UR im GzME „Saxothuringikum“ 393

Tabelle 56: Deformationsphasen und Bewertung des Tektonischen Großraums Elbezone 394

Tabelle 57: Beispiele der Wirtsgesteine zur Bewertung der Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies) (gem. Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG) 397

Tabelle 58: Übersicht über die Bewertung des Indikators 3.2 „Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)“ der Eigenschaft „Übertragbarkeit der Eigenschaften im vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereich“ der Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG für 01_07UR im GzME „Opalinuston“ 399

Tabelle 59: Übersicht über die Bewertung des Indikators „Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)“ der Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG für den Teiluntersuchungsraum 03_21UR im GzME „Thüringer Becken“ 401

Tabelle 60: Übersicht über die Bewertung des Indikators „Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)“ der Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG für den Teiluntersuchungsraum 04_11UR im GzME „Saxothuringikum“ 403

Tabelle 61: Übersicht über die Bewertung des Indikators 3.2 „Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)“ der Eigenschaft „Übertragbarkeit der Eigenschaften im vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereich“ der Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG im GzME „Salzstock Bahlburg“ 405

Tabelle 62: Physikalisch bestimmte Alter des Hegau-Vulkangebietes (aus Schreiber & Jentzsch (2021); Daten aus Geyer et al. (2011)) 409

Tabelle 63: Übersicht über die qualitative Bewertung des sicheren Einschlusses anhand der Anlagen 1 bis 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG zur Beurteilung der „erreichbare Qualität des Einschlusses und der zu erwartende Robustheit des Nachweises“ (§ 24 Abs. 3 StandAG) 419

Tabelle 64: Die Gegenüberstellung der Anlagen 1 bis 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG mit den Aspekt a) bis f) der Analyse des Endlagersystems § 7 EndlSiUntV zeigt fachlich eine große Übereinstimmung. 425

Tabelle 65: Qualitative Überprüfung des sicheren Einschlusses im Teiluntersuchungsraum 01_06UR anhand der nicht günstig bewerteten Indikatoren der Anlagen 1 bis 4 zu § 24 StandAG 440

Tabelle 66: Qualitative Überprüfung des sicheren Einschlusses im Teiluntersuchungsraum 04_02UR anhand der nicht günstig bewerteten Indikatoren der Anlagen 1 bis 4 zu § 24 StandAG 447

Tabelle 67: Qualitative Überprüfung des sicheren Einschlusses im Teiluntersuchungsraum 03_03UR anhand der nicht günstig bewerteten Indikatoren der Anlagen 1 bis 4 zu § 24 StandAG 450

Tabelle 68: Begriffserklärungen für die FEP-Methodik und Ableitung von Entwicklungen 465

Tabelle 69: Auszug von Komponenten aus dem ANSICHT SÜD FEP-Katalog 472

Tabelle 70: Beispiel zur Verknüpfung von Hauptsicherheitsfunktionen und Eigenschaften im FEP-Katalog 478

Tabelle 71: Auftreten und Ausprägung von Prozessen und Komponenten im Opalinuston 482

Tabelle 72: Beispiel für die Verknüpfung von Hauptsicherheitsfunktionen, Eigenschaften im FEP-Katalog und Parametern in den Rechenfällen 502

Tabelle 73 Parameter, die für die aufgelisteten Nuklide variiert wurden 525

Tabelle 74: Transportlängen im Opalinuston. Berechnungen basierend auf dem in Abbildung 198 dargestellten Profils. 543

Tabelle 75: Berechnete Kennzahlen I_R für die vorläufigen Rechenfälle (vgl. Beispiel 92) 552

Tabelle 76 Zusammenstellung aller atomrechtlich und strahlenschutzrechtlich relevanten Einwirkungen von außen (EVA) im Rahmen des abdeckenden Katalogs Betriebssicherheit 583

Tabelle 77 Zusammenstellung aller atomrechtlich und strahlenschutzrechtlich relevanten Einwirkungen von innen (EVI) im Rahmen des abdeckenden Katalogs Betriebssicherheit 585

Tabelle 78: Klassen zur Darstellung der Relevanz eines Indikators bzw. geowissenschaftlichen Abwägungskriteriums 591

Tabelle 79: Ableitung der Klassen zur Darstellung der generellen Relevanz eines Indikators bzw.geowissenschaftlichen Abwägungskriteriums, (G = generell) 594

Tabelle 80: Ableitung der Klassen zur Darstellung der lokalspezifischen Relevanz eines Indikators bzw. geowissenschaftlichen Abwägungskriteriums, (L = lokalspezifisch) 595

Tabelle 81: Übersicht der Abschätzungen zum zu erwartenden SMA-Inventar 601

Verzeichnis der beispielhaften Anwendung

Beispiel 1:	Ausweisung des Untersuchungsraums für das GzME „Opalinuston“ (Teilgebiet 001_00TG_032_01IG_T_f_jmOPT)	89
Beispiel 2:	Darstellung der Barrieren und ihrer Sicherheitsfunktionen eines Endlagersystems Typ 1.	107
Beispiel 3:	Wirtsgesteinsspezifische Abwägung der Art der Einlagerung für das Tongestein Opalinuston	126
Beispiel 4:	Wirtsgesteinsspezifische Abwägung der Art der Einlagerung für eine steile Salzformation	126
Beispiel 5:	Wirtsgesteinsspezifische Behälterannahmen für Opalinuston	131
Beispiel 6:	Wirtsgesteinsspezifische Behälterannahmen für steile Salzformationen	131
Beispiel 7:	Weitere generische Behälterannahmen	132
Beispiel 8:	Wirtsgesteinsspezifische Festlegungen für den Einlagerungsbereich im Opalinuston	139
Beispiel 9:	Wirtsgesteinsspezifische Festlegungen für den Einlagerungsbereich im steilen Steinsalz	141
Beispiel 10:	Mögliche Maßnahmen zur Entfernung oder Umfahrung etwaiger Streckenverschlüsse bei der Rückholung aus einem Endlager in Tongestein	148
Beispiel 11:	Mögliche Maßnahmen zum Freilegen der Querschläge, Richtstrecken und Einlagerungsstrecken bei der Rückholung aus einem Endlager in Tongestein	148
Beispiel 12:	Mögliche Maßnahmen zum Freilegen des Gebindes bei der Rückholung aus einem Endlager in Tongestein	150
Beispiel 13:	Mögliche Maßnahmen zur Wiederaufnahme des Gebindes bei der Rückholung aus einem Endlager in Tongestein	150
Beispiel 14:	Wirtsgesteinsspezifische Verschluss- und Versatzmaßnahmen im Opalinuston	155
Beispiel 15:	Wirtsgesteinsspezifische Verschluss- und Versatzmaßnahmen in steil lagerndem Steinsalz	161
Beispiel 16:	Ortsübergreifende Sammlung - Maßnahmen zur Geringhaltung der Schädigungen der wesentlichen Barrieren	167
Beispiel 17:	Festlegung/Beschreibung der Maße am Beispiel Opalinuston und Steinsalz (steile Lagerung)	185
Beispiel 18:	Wirtsgesteinsspezifische Ermittlung der Pfeilerbreiten im Tongestein Opalinuston	188
Beispiel 19:	Wirtsgesteinsspezifische Ermittlung der Pfeilerbreiten im Steinsalz (steile Lagerung)	194
Beispiel 20:	Einlagerungskonzept entsprechend der vorläufigen Endlagerauslegung im Tongestein Opalinuston	201

Beispiel 21:	Einlagerungskonzept entsprechend der vorläufigen Endlagerauslegung im Steinsalz (steile Lagerung)	203
Beispiel 22:	Strecken- und Behälterabstände entsprechend der vorläufigen Endlagerauslegung für das Tongestein Opalinuston und Steinsalz (steile Lagerung).	205
Beispiel 23:	Beispiel einer räumliche Diskretisierung für das Finite Elemente Modell für die vorläufige Endlagerauslegung im Tongestein Opalinuston und Steinsalz (steile Lagerung	209
Beispiel 24:	Beispiel zu Behälterbeladungen für vorläufige Endlagerauslegungen im Tongestein Opalinuston und Steinsalz (steile Lagerung)	211
Beispiel 25:	Beispiel zu Simulationsergebnissen für eine vorläufige Endlagerauslegung im Tongestein Opalinuston	212
Beispiel 26:	Beispiel zu Simulationsergebnissen für eine vorläufige Endlagerauslegung im Steinsalz (steile Lagerung)	214
Beispiel 27:	Beispiel von Simulationsergebnissen für eine vorläufige Endlagerauslegung im Tongestein Opalinuston	217
Beispiel 28:	Beispiel von Simulationsergebnissen für eine vorläufige Endlagerauslegung im Steinsalz (steile Lagerung)	218
Beispiel 29:	Beispielhafte Visualisierung der Endlagerauslegung im Teilgebiet 001_00TG_032_01IG_T_f_jmOPT (Opalinuston)	222
Beispiel 30:	Beispielhafte Visualisierung der Endlagerauslegung im Teilgebiet 035_00TG_057_00IG_S_s_z (Bahlburg)	223
Beispiel 31:	Bestimmung des Informationsgehalts der Bohrungen am Beispiel des GzME „Thüringer Becken“ (03_00UR)	234
Beispiel 32:	Darstellung der Quantität von Bohrungsdaten am Beispiel des GzME „Thüringer Becken“ (03_00UR)	237
Beispiel 33:	Kontaktmetamorphe Gesteine als mögliche Gebiete ohne hinreichende Informationen – Beispiel im GzME „Saxothuringikum“	244
Beispiel 34:	Auswahl von geogenen Prozessen, die in der geowissenschaftlichen Langzeitprognose berücksichtigt werden	260
Beispiel 35:	Darstellung des Wirtsgesteinsbereiches mit Barrierefunktion und Überprüfung der Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ im GzME „Thüringer Becken“ (03_00UR)	266
Beispiel 36:	Darstellung der wesentlichen Barriere im GzME „Opalinuston“ (01_00UR)	270
Beispiel 37:	Darstellung der geologischen Barrieren am Beispiel GzME „Saxothuringikum“ (04_00UR)	273
Beispiel 38:	Beispiel im GzME „Saxothuringikum“ (009_00TG)	277
Beispiel 39:	Beeinflussung der Barriereintegrität durch Erosionsprozesse im GzME „Opalinuston“ (01_00UR)	279
Beispiel 40:	Ausschlusskriterium „Aktive Störungszonen – Atektonische Vorgänge“ im GzME „Opalinuston“ (01_00UR)	283

Beispiel 41: Ausschlusskriterium „Aktive Störungszonen – Atektonische Vorgänge“ – im GzME „Thüringer Becken“ (03_00UR) 285

Beispiel 42: Vervollständigung der Datengrundlage zum Ausschlusskriterium „Bergwerke“ 289

Beispiel 43: Anwendung des Ausschlusskriteriums „Vulkanische Aktivität“ am Beispiel der Region Vogtland-Oberpfalz 292

Beispiel 44: Unterteilung des Untersuchungsraums 03_00UR „Thüringer Becken“ in Teiluntersuchungsräume 296

Beispiel 45: Unterteilung des Untersuchungsraums 01_00UR „Opalinuston“ in Teiluntersuchungsräume 300

Beispiel 46: Unterteilung des Untersuchungsraums 04_00UR „Saxothuringikum in Teiluntersuchungsräume 302

Beispiel 47: Anwendungsbeispiel Teiluntersuchungsraum 01_07UR im GzME „Opalinuston“ (01_00UR) 311

Beispiel 48 Anwendungsbeispiel GzME „Salzstock Bahlburg“ (02_00UR) 314

Beispiel 49: Räumliche Konfiguration der Gesteinskörper im Untergrund – Anwendungsbeispiel Teiluntersuchungsraum 04_11UR im GzME „Saxothuringikum“ (009_00TG) 320

Beispiel 50: Anwendungsbeispiel im GzME „Opalinuston“ (01_00UR) 327

Beispiel 51: Anwendungsbeispiel GzME „Bahlburg“ (02_00UR) 336

Beispiel 52: Anwendungsbeispiel GzME „Thüringer Becken“ (03_00UR) 341

Beispiel 53: Anwendungsbeispiel Teiluntersuchungsraum 04_11UR im GzME „Saxothuringikum“ (009_00TG) 345

Beispiel 54: Bearbeitung des Indikators 3.1a „Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich“ im GzME „Opalinuston“ (01_07UR) 353

Beispiel 55: Bearbeitung des Indikators 3.1a „Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich im GzME „Thüringer Becken“ (03_00UR) 357

Beispiel 56: Bearbeitung des Indikators 3.1a „Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen“ im Endlagerbereich im Teiluntersuchungsraum 04_11UR des GzME „Saxothuringikum“ 362

Beispiel 57: Bearbeitung des Indikators 3.1a „Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen“ im Endlagerbereich im GzME „Salzstock Bahlburg“ (02_00UR) 367

Beispiel 58: Bearbeitung des Indikators 3.1b „Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften“ im Teiluntersuchungsraum 01_07UR im GzME „Opalinuston“ 370

Beispiel 59: Bearbeitung des Indikators 3.1b „Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften“ im Teiluntersuchungsraum 03_21UR im GzME „Thüringer Becken“ (03_00UR) 374

Beispiel 60: Bearbeitung des Indikators 3.1b „Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften“ im Teiluntersuchungsraum 04_11UR des GzME „Saxothuringikum“ (04_00UR) 377

Beispiel 61: Bearbeitung des Indikators 3.1b „Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften“ im GzME „Salzstock Bahlburg“ (02_00UR) 380

Beispiel 62: Bewertung des Teiluntersuchungsraums 01_06UR im GzME „Opalinuston“ (01_00UR) 390

Beispiel 63: Bewertung des Teiluntersuchungsraums 04_11UR im GzME „Saxothuringikum“ 393

Beispiel 64: Bearbeitung des Indikators 3.2 „Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)“ am Beispiel des Teiluntersuchungsraums 01_07UR im GzME „Opalinuston“ (01_00UR) 398

Beispiel 65: Bearbeitung des Indikators 3.2 „Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)“ am Beispiel des GzME „ Thüringer Becken“ (03_00UR) 400

Beispiel 66: Bearbeitung des Indikators 3.2 „Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)“ am Beispiel des Teiluntersuchungsraums 04_11UR im GzME „Saxothuringikum“ 402

Beispiel 67: Bearbeitung des Indikators 3.2 „Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)“ am Beispiel des GzME „Salzstock Bahlburg“ (02_00UR) 405

Beispiel 68: Beeinflussung der langfristige Stabilität der günstigen Verhältnisse durch den Vulkanismus des Hegau im Teiluntersuchungsraum 01_06UR im GzME „Opalinuston“ (01_00UR) 408

Beispiel 69: Modellbildung für die quantitative Analyse am Beispiel des GzME „Opalinuston“ (01_00UR) 413

Beispiel 70: Anwendung am Beispiel GzME „Salzstock Bahlburg“ (02_00UR) 415

Beispiel 71: Übersicht zur umfassenden Bewertung im GzME „Opalinuston“ 434

Beispiel 72: Übersicht zur umfassenden Bewertung im GzME „Saxothuringikum“ 436

Beispiel 73: Übersicht zur umfassenden Bewertung im GzME „Thüringer Becken“ 437

Beispiel 74: Anwendungsbeispiel im Teiluntersuchungsraum 01_06UR im GzME „Opalinuston“ 438

Beispiel 75: Anwendungsbeispiel im Teiluntersuchungsraum 01_07UR im GzME „Opalinuston“ 441

Beispiel 76: Anwendungsbeispiel im Teiluntersuchungsraum 04_02UR im GzME „Saxothuringikum 443

Beispiel 77: Anwendungsbeispiel im Teiluntersuchungsraum 03_03UR im GzME „Thüringer Becken“ 448

Beispiel 78: Komponenten des FEP-Katalogs 472

Beispiel 79: Geogene Prozesse im FEP-Katalog 475

Beispiel 80: Beispiel zur Verknüpfung von Hauptsicherheitsfunktionen und Eigenschaften im FEP-Katalog 478

Beispiel 81: Auftreten von Prozessen 481

Beispiel 82: Ausprägung von Prozessen und Komponenten 482

Beispiel 83: Wirtsgesteinsspezifische und untersuchungsraumspezifische Beeinflussungen im Endlagersystem 484

Beispiel 84: Entwicklung eines wirtsgesteinsspezifischen Endlagersystems in Steinsalz in steiler Lagerung 492

Beispiel 85: Entwicklung eines untersuchungsraumspezifischen Endlagersystems, Anwendungsbeispiel GzME „Salzstock Bahlburg (02_00UR) 494

Beispiel 86: Entwicklung eines untersuchungsraumspezifischen Endlagersystems GzME „Opalinuston“ (01_00UR) 497

Beispiel 87: Zusammenhänge zwischen Sicherheitskonzept, FEP-Katalog und Rechenfällen 502

Beispiel 88: Ableitung von Rechenfällen 503

Beispiel 89: Fortpflanzung von Ungewissheiten bezüglich einer Eigenschaft 509

Beispiel 90: Zur Kennzahl IM 519

Beispiel 91: Zur Durchführung einer lokalen Sensitivitätsanalyse für den Opalinuston für das in Abbildung 198 dargestellte Profil 524

Beispiel 92: Zur Durchführung vorläufiger Monte-Carlo-Simulationen für den Opalinuston für das in Abbildung 198 dargestellte Profil 526

Beispiel 93: Zur Positionsoptimierung eines hypothetischen Einlagerungsbereichs für den Salzstock Bahlburg 532

Beispiel 94: Repräsentatives Profil des Opalinustons für den Teiluntersuchungsraum „01_07UR_001_00TG_032_01IG_T_f_jmOPT“ 538

Beispiel 95: Zur Berechnung der Radionuklidkonzentration nach einer Million Jahren 541

Beispiel 96: Zur Berechnung des Gesamtaustrags an Radionukliden über eine Million Jahre 542

Beispiel 97: Zur Parametervariation der Transportlängenberechnung 544

Beispiel 98: Zur Überprüfung des Kriteriums für den jährlichen Stoffmengenaustrag 545

Beispiel 99: zur Abschätzung des Transports in Steinsalz in steiler Lagerung 549

Beispiel 100: zur Auswertung der berechneten Transportlängen auf Grundlage der durchgeführten Monte-Carlo-Simulationen. 551

Beispiel 101: Exemplarische Detailbearbeitung der Aspekte „Strahlenschutz und Freisetzung radioaktiver Stoffe“ des abdeckenden Katalogs Betriebssicherheit für fünf ausgewählte Einwirkungen 574

Anhangsverzeichnis

Anhang 1	**Untersuchung zum günstigen Teufenbereich für die Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen im Wirtsgestein Opalinuston**	**637**
Anhang 1.1	Vorüberlegungen zur Teufe des Einlagerungsbereichs im Tongestein	638
Anhang 1.2	Arbeiten zu Tongestein im Rahmen des AkEnd	640
Anhang 1.3	Endlagerteufe im Opalinuston in der Schweiz	643
Anhang 1.3.1	Etappe 1 der Standortsuche	643
Anhang 1.3.2	Etappe 2 bis 3 der Standortsuche	644
Anhang 1.3.2.1	Allgemeines Vorgehen	644
Anhang 1.3.2.2	Datenlage und Modelle	645
Anhang 1.4	F&E Vorhaben AGEnT der BGE TECHNOLOGY GmbH	648
Anhang 1.5	Analyse des Stands von Wissenschaft und Technik in Hinblick auf die Anforderungen	651
Anhang 1.5.1	Herstellbarkeit des Endlagerbergwerks	651
Anhang 1.5.2	Durchführbarkeit der Endlagerung	651
Anhang 1.6	Rückholbarkeit	652
Anhang 1.7	Bergbarkeit	653
Anhang 1.7.1	Ausgewogenheit der Maßnahmen von Betriebs- und Langzeitsicherheit	653
Anhang 1.8	Zusammenfassung und Schlussfolgerung	653
Anhang 2	**Herausforderungen bei der Entwicklung von Endlagerkonzepten in kristallinem Wirtsgestein**	**655**
Anhang 2.1	Einleitung	655
Anhang 2.2	Kristalline Gesteinsformationen als Wirtsgestein für die Endlagerung	657
Anhang 2.2.1	Datenlage zu kristallinen Wirtsgesteinsformationen	657
Anhang 2.2.2	Gebirgsdurchlässigkeit in kristallinen Wirtsgesteinsformationen	658
Anhang 2.2.3	Hydrochemie von tiefen Grundwässern in kristallinen Wirtsgesteinsformationen	660
Anhang 2.3	Kristallines Wirtsgestein mit einschlusswirksamem Gebirgsbereich (Endlagersystem Typ 1)	664
Anhang 2.3.1	Einschlusswirksamer Gebirgsbereich als wesentliche Barriere	664
Anhang 2.4	Kristallines Wirtsgestein ohne einschlusswirksamen Gebirgsbereich (Endlagersystem Typ 2)	665
Anhang 2.4.1	Langzeitintegrität des Endlagerbehälters	665
Anhang 2.4.1.1	Einwirkungen durch Korrosion	665
Anhang 2.4.1.2	Schutzwirkung durch geotechnische und geologische Barrieren	666
Anhang 2.4.1.3	Fertigungs- und Prüfverfahren	668
Anhang 2.4.2	Nachweis der Behälterintegrität über den Bewertungszeitraum	668
Anhang 2.4.3	Annahmen für das Endlagersystem Typ 2	669
Anhang 3	**Numerisches Radionuklid-Transportmodell TransPyREnd: Theoretischer Hintergrund und numerische Implementierung**	**670**
Anhang 3.1	Einleitung	670
Anhang 3.2	Mathematische Darstellung von Transportprozessen	671

Anhang 3.3	Numerische Implementierung	672
Anhang 3.4	Beispielhafter Modelllauf	672
Anhang 3.5	Vergleich mit veröffentlichten Modellergebnissen	674
Anhang 4	**Quantifizierung von Parameterwerten und Bandbreiten für Modelle des Radionuklidtransports im Untergrund**	**676**
Anhang 4.1	Einführung	676
Anhang 4.2	Detaillierte Beschreibung des Arbeitsablaufs	677
Anhang 4.2.1	Allgemeines	677
Anhang 4.2.2	Sorption	678
Anhang 4.2.3	Effektiver Diffusionskoeffizient	683
Anhang 4.2.3.1	Allgemeines	683
Anhang 4.2.3.2	Diffusionskoeffizienten von Nukliden	683
Anhang 4.2.3.3	Die Abhängigkeit der Diffusion von Temperatur und Salzgehalt	683
Anhang 4.2.3.4	Die Auswirkungen von Porosität und Tortuosität	685
Anhang 4.2.3.5	Anionen-Ausschlusseffekt	689
Anhang 4.2.3.6	Diffusion von sorbierten Kationen	689
Anhang 4.3	Zusammenfassung des Arbeitsablaufs	690
Anhang 5	**Bestmögliche Einschätzung der Parameterwerte für den Nuklidtransport**	**692**
Anhang 6	**Begriffsbestimmung der Wirtsgesteine**	**707**
Anhang 6.1	Anpassung der Begriffsbestimmung „Steinsalz“	707
Anhang 6.2	Begriffsbestimmung „Steinsalz“	707
Anhang 6.2.1	Anwendung Steinsalz „in stratiformer Lagerung“	707
Anhang 6.2.2	Anwendung Steinsalz „in steiler Lagerung“	708
Anhang 6.3	Begriffsbestimmung „Tongestein“ (unverändert) (BGE 2020j)	709
Anhang 6.4	Begriffsbestimmung „Kristallines Wirtsgestein“ (unverändert) (BGE 2020j)	710

Abbildungsverzeichnis der Anhänge

Abbildung A. 1: Zuweisung günstiger, bedingt günstiger und weniger günstiger gebirgsmechanischer Verhältnisse in Abhängigkeit von Teufe und Gebirgsdruckfestigkeit für nicht bis gering kriechfähige Gesteine; nach Lux & Eberth (2002) 641

Abbildung A. 2: Druckfestigkeiten von Tongesteinen; verändert nach Nagra (2002d) 641

Abbildung A. 3: Einschätzung verschiedener Tongesteine; basierend auf Lux & Eberth (2002), Czaikowski et al. (2005) und Daten aus Nagra (2002d) sowie BGE-Daten (Fladentonstein, Schachtanlage Konrad) 642

Abbildung A. 4: Ergebnisse von zuverlässig deutbaren Triaxialversuchen und Modellvorhersagen über die Verwendung von Parameterbandbreiten (min, ref, max) (Nagra 2016a) 646

Abbildung A. 5: Einschätzung verschiedener Tongesteine, basierend auf Lux & Eberth (2002), Czaikowski et al. (2005), Daten aus Nagra (2002d), BGE Daten (Fladentonstein, Schachtanlage Konrad) und der Modellvorhersage GM_{ref} aus Nagra (2016a) im blauen Kasten 647

Abbildung A. 6: Gebirgsdurchlässigkeit im deutschen Erzgebirge (Ore mountains) (Achtziger-Zupančič et al. 2017). 659

Abbildung A. 7: Geologische Modellvorstellung zur Gebirgsdurchlässigkeit in kristallinen Wirtsgesteinen in Deutschland. 660

Abbildung A. 8: Histogramm der Gebirgsdurchlässigkeit in kristallinen Gesteinsformationen des Erzgebirges [log Skalierung der x-Achse]. 665

Abbildung A. 9: Beispielhafte Modellergebnisse, die die Verteilung von Nukliden um ein Endlager nach einer Million Jahren zeigen. 673

Abbildung A. 10: Vergleich der Transportraten von Radionukliden. 675

Abbildung A. 11: Vergleich des kumulativen Radionuklidverlusts. 675

Abbildung A. 12: Abhängigkeit des Diffusionskoeffizienten in Wasser von der Temperatur gemäß den von Simpson & Carr (1958) und Van Loon et al. (2005) vorgeschlagenen Beziehungen. 685

Abbildung A. 13: Beziehung zwischen Tortuosität und zugänglicher Porosität in einer Zusammenstellung von Daten und theoretischen (Weissberg 1963; Tsai & Strieder 1986) und empirischen (Van Loon 2014) Gleichungen 687

Abbildung A. 14: Abhängigkeit der effektiven Diffusivität von der zugänglichen Porosität in einer Zusammenstellung von Daten und theoretischen (Weissberg 1963; Tsai & Strieder 1986) sowie empirischen (Van Loon 2014) Gleichungen. 688

Abbildung A. 15: Das Verhältnis von zugänglicher und gesamter Porosität in einer Zusammenstellung von 32 Datenpunkten von Xiang et al. (2013) und Van Loon (2014) 689

Abbildung A. 16: Effektive Diffusionskoeffizienten der Nuklide (bestmögliche Einschätzungen, B.E.) 692

Abbildung A. 17: Sorptionskoeffizienten der Nuklide (bestmögliche Einschätzungen, B.E.) 693

Abbildung A. 18: IUGS-Klassifikation der Plutonite im Streckeisen-Diagramm; aus (Okrusch & Matthes 2014). 711

Abbildung A. 19: Druck-Temperatur-Diagramm der metamorphen Mineralfazies (nach Bucher & Grapes (2011)). 712

Tabellenverzeichnis der Anhänge

Tabelle A. 1: Auswahl an Analysen des Gesamtlösungsinhalts (TDS) von tiefen Grundwässern in kristallinen Gesteinsformationen (Stober et al. 2014; Achtziger-Zupančič et al. 2017; Röckel & Stober 2017) 661

Tabelle A. 2: Hydrochemische Analysedaten aus der Tiefbohrung Weißenstadt (verändert nach Röckel & Stober 2017); n.b. bedeutet nicht bestimmt 663

Tabelle A. 3 Referenzwerte sowie Mindest- und Maximalwerte der Sorptionskoeffizienten in reinem Illit, berechnet nach Baeyens et al. (2014) 680

Tabelle A. 4: Referenzwerte sowie minimale und maximale Schätzungen der Sorptionskoeffizienten in reinem Calcit, nach Bradbury et al. (2010) 681

Tabelle A. 5: Mächtigkeit, Matrixdichte, Porosität und Durchlässigkeitsbeiwerte der Modelleinheiten für die Radionuklidtransportmodellierung im Teiluntersuchungsraum 01_07UR_001_00TG_032_01IG_T_f_jmOPT im GzME "Opalinuston“ (bestmögliche Einschätzungen, B.E.) 693

Tabelle A. 6: Nuklideigenschaften (bestmögliche Einschätzungen, B.E.) 694

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

Abkürzungsverzeichnis

1 Mio.	Eine Million
1D, 2D bzw. 3D	Ein-, zwei- bzw. dreidimensional
ABBergV	Allgemeine Bundesbergverordnung
Abs.	Absatz
ABVO	Allgemeine Bergverordnung über Untertagebetriebe, Tagebaue und Salinen
AGEnT	Forschungsvorhaben „Ausbau von Grubenbauen für ein HAA-Endlager in Tongestein“
AK	Ausschlusskriterium/Ausschlusskriterien
AkEnd	Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte
ALZ	Auflockerungszone
Andra	Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs
AnSichT	Projekt „Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein“
ArcGIS/ ArcGis Pro	Oberbegriff für verschiedene Geoinformationssystem-Softwareprodukte des Unternehmens ESRI
ASK	Anlagen, Systeme und Komponenten
AtG	Atomgesetz
AVR	Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor Jülich; Versuchsreaktor eines Kugelhaufenreaktors
B.E.	Best Estimate - Bestmögliche Einschätzung
BE	Brennelement, Brennelemente
BER II	Berliner Experimentier-Reaktor II; Forschungsreaktor am Helmholtz-Zentrum Berlin
BfS	Bundesamt für Strahlenschutz
BGE	Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (06.06.1986 – 17.12.2013) bzw. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (14.03.2018 – 08.12.2021). Zum Zeitpunkt der Veröffentlichung als BMUV.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (17.12.2013 – 14.03.2018). Zum Zeitpunkt der Veröffentlichung als BMUV.
BMUV	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (seit 08.12.2021)
BSt.	Brennstab, Brennstäbe
CAD	Computer-aided design (Englisch für: rechnerunterstütztes Konstruieren)
CASTOR	Cask for storage and transport of radioactive material (Englisch für: Transport- und Lagerbehälter für Brennelemente) Markenbezeichnung der GNS Gesellschaft für Nuklearservice mbH.
CSD-B	Colis standard de déchets boues (Französisch für: „Standardbehälter für schlämmige Abfälle“; Standardkokille mit verglasten mittelaktiven Prozess- und Dekontaminationslösungen)
CSD-C	Colis standard de déchets compactés (Französisch für: „Standardbehälter für kompaktierte Abfälle“; Standardkokille mit verpressten Metallteilen)
CSD-V	Colis standard de déchets vitrifiés (Französisch für: „Standardbehälter für verglaste Abfälle“; Standardkokille mit verglasten hochaktiven Spaltproduktlösungen)
DBE TEC	Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern TECHNOLOGY (seit 21.06.2018 BGE TEC)
DQL	Kenngröße: Datenqualität
DQN	Kenngröße: Datenquantität
DSI	Discrete-Smooth-Interpolation-Algorithmus eines Workflow von SKUA-GOCAD™
DWR	Druckwasserreaktor
Einwirkungs BergV	Bergverordnung über Einwirkungsbereiche
ElBergV	Bergverordnung für elektrische Anlagen
EndlSiAnfV	Endlagersicherheitsanforderungsverordnung
EndlSiUntV	Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung
ENSI	Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (Aufsichtsbehörde in der Schweiz)
ESK	Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (Endlagerkommission)
EVA	Einwirkungen von außen

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

EVI	Einwirkungen von innen
ewG	Einschlusswirksamer Gebirgsbereich
EWN	*Entsorgungswerk für Nuklearanlagen GmbH.* Betreiber des *ZLN.*
F&E	Forschung und Entwicklung
FBBS	Freiburg-Bonndorf-Bodensee-Scherzone (bzw. –Störungszone)
FEM	Finite Elemente Methode
FEP	Features, Events and Processes (Englisch für: „Komponenten, Ereignisse und Prozesse“)
Fm.	Formation
FRM II	Forschungsreaktor München II; Forschungsreaktor am Heinz Maier-Leibnitz Zentrum (MLZ) in Garching bei München
FRMZ	Forschungsreaktor Mainz; Forschungsreaktor an der Johannes-Gutenberg-Universität Mainz
geoWK	Geowissenschaftliche Abwägungskriterien
GM_{max}	Günstiges Ende der Parameterbandbreite
GM_{min}	Ungünstiges Ende der Parameterbandbreite
GM_{ref}	Referenzmodel zwischen GM_{max} und GM_{min}
GNS	Gesellschaft für Nuklear-Service mbH
GOK	Geländeoberkante
GÜK	Geologische Übersichtskarte (der Bundesrepublik Deutschland)
GW	Grundwasser
GWL	Grundwasserleiter
GzME	Gebiet(e) zur Methodenentwicklung
HAA	hochaktive Abfälle
HASZ	Hegau-Albstadt-Scherzone
HAW	high-activity waste(s) (Englisch für: „hochaktive Abfälle“)
HTO	Tritiiertes Wasser
HTR	Hochtemperaturreaktor (heliumgekühlter Kugelhaufenreaktor)
i. V. m.	In Verbindung mit
IAEA	International Atomic Energy Agency (Englisch für: „Internationale Atomenergie-Organisation“, IAEO)

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

IDN	Kenngröße: Interpretative Daten und Nachweise
IEC	International Electrotechnical Commission (Englisch für: Internationale Elktrotechnische Kommission)
InSpEE	Informationssystem Salzstrukturen: Planungsgrundlagen, Auswahlkriterien und Potenzialabschätzung für die Errichtung von Salzkavernen zur Speicherung von Erneuerbaren Energien
InSpEE-DS	Informationssystem Salz: Planungsgrundlagen, Auswahlkriterien und Potenzialabschätzungen für die Errichtung von Salzkavernen zur Speicherung von Erneuerbaren Energien (Wasserstoff und Druckluft) – Doppelsalinare und flach lagernde Salzschichten
JEN	*Jülicher Entsorgungsgesellschaft für Nuklearanlagen mbH.*
jmAC	Mittlerer Jura, Achdorf-Formation
jmDT	Mittlerer Jura, Dentalienton-Formation
jmES	Mittlerer Jura, Eisensandstein-Formation
jmGOS	Mittlerer Jura, Gosheim-Formation
jmHT	Mittlerer Jura, Hamitenton-Formation
jmOK	Mittlerer Jura, Ostreenkalk-Formation
jmOPT	Mittlerer Jura, Opalinuston-Formation
jmOR	Mittlerer Jura, Ornatenton-Formation
jmS	Mittlerer Jura, Mittlerer Jura, Sengenthal-Formation
jmV	Mittlerer Jura, Variansmergel-Formation
jmWS	Mittlerer Jura, Mittlerer Jura, Wedelsandstein-Formation
jmWU	Mittlerer Jura, Wutach-Formation
KfK	Kernforschungszentrum Karlsruhe; bis 1995 Name der Vorgängerorganisation des heutigen Karlsruher Institutes für Technologie, KIT
KKW	Kernkraftwerk
KlimaBergV	Klima-Bergverordnung
KNK II	Kompakte Natriumgekühlte Kernreaktoranlage Karlsruhe; Versuchsreaktor eines natriumgekühlten Schnellen Brüters
KOSINA	Forschungsvorhaben „Konzeptentwicklung für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle in flach lagernden Salzschichten in Deutschland sowie Entwicklung und Überprüfung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes“.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

KTA	Kerntechnischer Ausschuss
KX	Kenngröße: Geologische Komplexität
LABRADOR	Forschungsvorhaben „Status quo der Lagerung ausgedienter Brennelemente aus stillgelegten/rückgebauten deutschen Forschungsreaktoren und Strategie (Lösungsansatz) zu deren künftigen Behandlung/Lagerung“.
LfULG	Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
LWR	Leichtwasserreaktor.
MA	Mindestanforderung(en)
Ma	Megaannum, Megajahr; 1 Ma entspricht 1 Million Jahre
mELVIS	Modifizierte Einlagerungsvorrichtung in Strecken
Mio.	Million / Millionen
MOX	Mischoxid
MTR	Materialtestreaktor
N, S, W, E	Himmelsrichtungen: Nord, Süd, West, Ost (eng. „East“)
Nagra	Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle; Schweizerische nationale Entsorgungsgesellschaft
NE, SE, SW, NW	Himmelsrichtungen: Nordost, Südost, Südwest, Nordwest
NNE, ENE, ESE, SSE, SSW, WSW, WNW, NNW	Himmelsrichtungen: Nordnordost, Ostnordost, Ostsüdost, Südsüdost, Südsüdwest, Westsüdwest, Westnordwest, Nordnordwest
Nr.	Nummer
ONDRAF/NIRAS	Nationale Einrichtung für Radioaktive Abfälle und angereicherte Spaltmaterialien (Belgien)
planWK	Planungswissenschaftliche Abwägungskriterien
RA	Relevanzaspekt
RESUS	Forschungsvorhaben „Grundlagenentwicklung für repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen und zur sicherheitsgerichteten Abwägung von Teilgebieten mit besonders günstigen geologischen Voraussetzungen für die sichere Endlagerung hochradioaktiver Abfälle“.
RFR	Rossendorfer Forschungsreaktor; Ehemaliger Forschungsreaktor am Forschungszentrum Dresden-Rossendorf
RSK	Reaktor-Sicherheitskommision

rvSU	Repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen
RWTH Aachen	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen
S.	Satz
SEWD	Störmaßnahmen oder sonstige Einwirkungen Dritter
SF	Sicherheitsfunktion
Sfm.	Subformation
SGD	Staatliche Geologische Dienste
SKB	Svensk Kärnbränslehantering AB
SKUA-GO-CAD™	3D-Geomodellier-Softwarepaket der Firma Paradigm
SM	Schwermetallmasse, z. B. in der Einheit [t_{SM}] („Tonne Schwermetall“).
SMA	Schwach- und mittelradioaktive Abfälle
STA	Bereich Standortauswahl der BGE
StandAG	Standortauswahlgesetz
StrlSchV	Strahlenschutzverordnung
SV	Schichtenverzeichnis (einer Bohrung)
SWR	Siedewasserreaktor
SZ	Störungszone
TB	Tiefbohrung(en)
TDS	total dissolved solids
T_{EB}	Initiale Temperatur im Einlagerungsbereich
TG	Teilgebiet
THM	Thermo-hydro-mechanisch (gekoppelt)
THTR	Thorium-Hochtemperaturreaktor; Prototypkraftwerk eines Kugelhaufenreaktors in Hamm-Uentrop
TLB	Transport- und Lagerbehälter
TLUNB	Thüringer Landesamt für Umwelt, Bergbau und Naturschutz
TransPyREnd	Transportmodell in Python für Radionuklide aus einem Endlager
TSM	Teilschnittmaschine
TUNB	Tieferer Untergrund Norddeutsches Becken (digitales strukturgeologisches 3D-Modell des Norddeutschen Beckens)

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

TUR	Teiluntersuchungsraum
TWT	Two-way travel time (Englisch für: „Zweiwegelaufzeit")
u. GOK	Unter Geländeoberkante
UFZ	Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung
UK-HAW	United Kingdom – high-activity waste(s); Englisch für: „Vereinigtes Königreich – hochaktive Abfälle" (Bezeichnung für aus der Wiederaufarbeitung in Großbritannien zurückgeführte Kokillen mit verglasten hochaktiven Spaltproduktlösungen)
UOX	Uranoxid, Uran(IV)-oxid. (üblicher Kernbrennstoff für LWR)
UR	Untersuchungsraum
URL	Underground Research Laboratory (Englisch für: „untertägiges Forschungslabor")
URS	Unterbrechungsfreie Stromversorgung
URS	Forschungsvorhaben „Ungewissheiten und Robustheit mit Blick auf die Sicherheit eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle"
uvSU	Umfassende vorläufige Sicherheitsuntersuchungen
VCLGR	Volume Clay from Gamma Ray Log (Englisch für: Tonmineralanteil aus dem Gamma-Ray-Log)
VSG	Forschungsvorhaben „Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben"
VSHGR	Volume Shale from Gamma Ray Log (Englisch für: Anteil Tonminerale plus silikatisches Feinkorn aus dem Gamma-Ray-Log)
vSU	Vorläufige Sicherheitsuntersuchungen
WAK	Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe; auch Kurzbezeichnung für die dort verglasten hochaktiven Abfälle
WbB	Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion
WG	Wirtsgestein
WKP	Wiederkehrende Prüfungen
wvSU	Weiterentwickelte vorläufige Sicherheitsuntersuchungen
WWER	Водо-водяной энергетический реактор, Russisch für: „Wasser-zu-Wasser-Energiereaktor". Sowjetisch/russische DWR-Baulinie.
ZBTG	Zwischenbericht Teilgebiete

ZLN Zwischenlager Nord. Zentrales Zwischenlager in Rubenow, Mecklenburg-Vorpommern.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

Begriffsbestimmung

Ein berichtsübergreifendes Glossar ist der Unterlage „Glossar der BGE zum Standortauswahlverfahren“ (BGE 2020af) zu entnehmen.

Abbrand Maß für die im Kernbrennstoff freigesetzte Wärmeenergie aus Kernspaltungen, bezogen auf die eingesetzte Schwermetallmasse des Kernbrennstoffes. Einheit z. B. „Gigawatttage je Tonne Schwermetall“ [GWd/t_{SM}]

Abfallinventar Gesamtheit der zu entsorgenden hochradioaktiven Abfälle

Abklingzeit Zeit nach dem Entladen von Brennelementen aus dem Reaktor, während der Wärmeleistung und Aktivität abnehmen („abklingen“).

Abweichende Entwicklungen Entwicklungen, die nicht zu erwarten sind, aber eintreten können.

Aktivität Maß für den Zerfall von Radionukliden. Einheit: Bequerel (1 Bq = 1 Zerfall je Sekunde)

Analogiebetrachtung Eine Analogiebetrachtung beschreibt den Prozess des Informationsgewinns indem Daten und Kenntnisse von einem Sachverhalt auf einen anderen, ähnlichen Sachverhalt übertragen werden. Dadurch können fachlich begründet für ein Gebiet Informationen gewonnen werden, auch wenn keine ortsspezifischen Daten vorliegen. Dies betrifft einerseits die räumliche Übertragung von Daten und Informationen und andererseits die Anwendung von Modellvorstellungen, die aus praktischen Erfahrungen, der Analyse von übergeordneten Datensätzen oder einem Prozessverständnis qualitativ oder quantitativ abgeleitet werden.

Anreicherung
1) Prozess der Erhöhung des Anteils bestimmter Nuklide eines Nuklidgemisches bzw. Elements über die natürliche Konzentration hinaus
2) Maßzahl (in Gewichts- oder Stoffanteilen) der Konzentration eines bestimmten Nuklids in einem Nuklidgemisch bzw. in einem Element (z. B. „4 m-% U-235“)

Behälter Dicht verschließbare Hülle der radioaktiven Abfälle zum Zweck des Transportes und/oder der Lagerung. Dient als technische Barriere und erfüllt Sicherheitsfunktionen.

Bestmögliche Einschätzung Wohlbegründeter Schätzwert, etwa für Parameter, Mächtigkeiten, etc., die mit signifikanten Ungewissheiten verbunden sein können, beispielsweise durch Expertenurteil.

Betrachtungsraum Ein die rvSU unterstützender räumlicher Bereich um ein Teilgebiet.

Buffer	Als Buffer wird das die Endlagergebinde umgebende Versatzmaterial in der Einlagerungsstrecke oder im Bohrloch bezeichnet.
Druckwasserreaktor	Kernreaktor mit Wasser als Kühlmittel und Moderator, das durch den hohen Betriebsdruck im Primärkreislauf auch unter hohen Temperaturen nicht siedet. Dampferzeugung im Sekundärkreislauf.
FEP-Katalog	Zusammenstellung aller relevanten Komponenten und Prozesse um ein Endlagersystem zu beschreiben.
Forschungsreaktor	Kernreaktor für die Bereitstellung von Neutronen oder Isotopen für Forschung und medizinische und/oder industrielle Anwendungen, z B. FRM II.
Gebinde	Das Gebinde besteht aus dem Endlagerbehälter und seiner Beladung, den radioaktiven Abfällen.
Geowissenschaftliche Langzeitprognose	Entwicklung eines Standortes auf Basis geogener Prozesse ohne Einfluss eines Endlagers.
Hypothetische Entwicklungen	Entwicklungen, die selbst unter ungünstigen Annahmen nach menschlichem Ermessen auszuschließen sind.
Kokille	Standardisiertes Stahlgefäß, hier zur Aufnahme von verglasten hochradioaktiven Spaltproduktlösungen aus der Wiederaufarbeitung
Leichtwasserreaktor	Kernreaktor mit leichtem Wasser (H_2O) als Kühlmittel und Moderator.
Leistungsreaktor	Kernreaktor zur Energiegewinnung in einem Kernkraftwerk.
Maßnahmengruppen	Eine Maßnahmengruppe beschreibt einen wesentlichen Schutzmechanismus, mit dem die Geringhaltung der Schädigung der wesentlichen Barrieren gewährleistet werden soll. Die Maßnahmengruppen enthalten Maßnahmen, die auf Grundlage dieser Schutzziele die Schädigung der wesentlichen Barrieren geringhalten sollen.
Materialtestreaktor	Typ von Hochfluss-Forschungsreaktoren mit Anwendungsmöglichkeiten für die Materialforschung, z. B. BER II
Mischoxid	Kernbrennstoff aus Uran-Plutonium-Mischoxid aus der Wiederaufarbeitung
Nuklid	Durch Ordnungszahl (Elementangabe), Massenzahl und Anregungszustand eindeutig identifizierbare Sorte von Atomkernen.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

Nuklidvektor Darstellung aller Nuklide eines Nuklidgemisches (Materials) durch Auflistung der Nuklide und ihrer jeweiligen Massen, Aktivitäten, Stoffmengen oder Konzentrationen

Präventionsmaßnahmen Maßnahmen, die im Rahmen der grundsätzlichenDarstellung der grundsätzlichen Möglichkeit des sicheren Betriebs des Endlagers bei der rvSU für Einwirkungen formuliert und den Anlagenzustand „bestimmungsgemäßer Betrieb“ aufrecht erhalten sollen.

Prototypreaktor Kernreaktor zur maßstäblichen Demonstration von Funktion und Leistung eines Reaktortyps für industrielle Anwendungen, z. B. THTR-300. Auch „Demonstrationsreaktor“.

Proxy Eine Proxy-Variable (von lat.: proximus „der Nächste“) bzw. kurz „ein Proxy“ ist eine Stellvertreter-Variable und damit eine quantitative Ersatzgröße, durch deren Bestimmung anhand einer Transferfunktion eine Auskunft über eine andere quantitative Größe möglich ist. Diese ist gewöhnlich durch eine Messung nicht objektiv, nicht reliabel, nicht valide und / oder nicht mit vertretbarem Aufwand zugänglich.

Radionuklid Ein instabiles Nuklid, das durch radioaktiven Zerfall in andere Nuklide übergeht.

Rechenfall Übersetzung einer Entwicklung in eine numerisch lesbare Struktur

Rechenlauf Eine Modellrechnung mit einer spezifischen Parametrisierung als Teil eines Rechenfalls

Schwermetall Im Sinne der Massenangabe für Kernbrennstoffe (z. B. Einheit „Tonne Schwermetall“) die vor dem Reaktoreinsatz im Brennstoff insgesamt enthaltene Masse an Uran-, Plutonium- und Thoriumisotopen.

Siedewasserreaktor Typ eines Leichtwasserreaktors mit Dampferzeugung im Primärkreislauf

Teilsystem Teilsysteme eines Endlagers sind dadurch gekennzeichnet, dass die enthaltenen Bereiche und Komponenten ähnliche Hauptfunktionen und ähnliche Betriebsabläufe aufweisen. Zudem kann unter Umständen erwarten werden, dass die Folgen einer Einwirkung im Bereich eines Teilsystems auf die Betriebssicherheit des Endlagers vergleichbar sind, weshalb gleiche Sicherheitssysteme sowie technische und organisatorische Maßnahmen innerhalb eines Teilsystems betrachtet werden können.

Teiluntersuchungsraum Ein Teiluntersuchungsraum ist ein definiertes Gebiet, welches einen Teil eines Untersuchungsraumes räumlich abdeckt. Untersuchungsräume können innerhalb einer repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchung in Teiluntersuchungsräume unterteilt werden. Dadurch können einzelne Arbeitsschritte und Bewertungen, die Rahmen einer repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen durchgeführt werden, kleinräumig auf Ebene der Teiluntersuchungsräume dargestellt werden.

Transport- und Lagerbehälter Sammelbegriff für Behälter, die für den Transport radioaktiver Abfälle zugelassen sind und zusätzlich eine zeitlich begrenzte Genehmigung für die trockene Zwischenlagerung radioaktiver Abfälle besitzen

Transportmodell Rechenmodell des Radionuklidtransports über den Bewertungszeitraum

Überschlägige Abschätzung Eine vereinfachte, aber fachlich nachvollziehbare realistische Abschätzung, welche entweder zur Vereinfachung komplexer Zusammenhänge oder aufgrund fehlender spezifischer Eingangsgrößen erforderlich ist.

Ungewissheiten Ungewissheit ist ein Mangel an Gewissheit und / oder Informationen zur Beschreibung des Systems und somit zur Einschätzung möglicher negativer Konsequenzen. Ungewissheiten können sowohl durch fehlendes Wissen, als auch durch natürliche Variabilität entstehen.

Untersuchungsraum Der Begriff des Untersuchungsraumes wird in § 3 Abs. 1 der EndlSIUntV erläutert: *Untersuchungsräume sind diejenigen räumlichen Bereiche, die zur Bewertung als möglicher Endlagerstandort vorgesehen sind.* Bei den repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen wird zunächst für jedes Teilgebiet ein Untersuchungsraum ausgewiesen. Die Fläche des Teilgebiets entspricht dabei der Fläche des Untersuchungsraumes.

Versuchsreaktor Kleiner Kernreaktor zur Erprobung eines Reaktortyps, z. B. Versuchskraftwerk Kahl

Wiederaufarbeitung Prozess zur chemischen Auftrennung bestrahlter Brennelemente mit dem Ziel der Abtrennung hochradioaktiver Abfallstoffe und der Rückgewinnung von Uran und Plutonium für die Fertigung von MOX-Brennelementen

Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion

Bis zum Zeitpunkt der konkreten räumlichen Festlegung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs in einem Untersuchungsraum, wird der Wirtsgesteinsbereich, der den einschlusswirksamen Gebirgsbereich aufnehmen kann, als Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion bezeichnet. Innerhalb eines Wirtsgesteinsbereichs mit Barrierefunktion kann theoretisch überall ein einschlusswirksamer Gebirgsbereich platziert werden. Die räumliche Ausdehnung des Wirtsgesteinsbereichs mit Barrierefunktion entspricht zu Beginn der rvSU den im Rahmen der Arbeiten zu § 13 StandAG ausgewiesenen endlagerrelevanten Wirtsgesteinsabfolgen oder -formationen (BGE 2020g). Im Rahmen der rvSU kann es im Zuge der räumlich differenzierten Bewertungen dazu kommen, dass der Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion im Vergleich zu seiner ursprünglichen Ausdehnung schrittweise verkleinert wird.

Zu erwartende Entwicklungen

Entwicklungen, die sicher oder in der Regel eintreten werden.

1 Einleitung

Die Durchführung von repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (rvSU) ist ein wesentlicher Schritt im Rahmen der Arbeiten zur Ermittlung von Standortregionen für die übertägige Erkundung (§ 14 StandAG). Zur Umsetzung der Anforderungen, die im Standortauswahlgesetz (StandAG) und insbesondere in der Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung (EndlSiUntV) definiert sind, ist die Entwicklung von methodischen Vorgehensweisen notwendig. Diese dienen der Übersetzung der gesetzlichen Anforderungen in konkrete Arbeitsschritte und bilden damit die Grundlage für die sicherheitsgerichtete und vergleichbare Bewertung von Gebieten.

Das vorliegende Dokument ergänzt als Anlage das „Konzept für die methodische Bearbeitung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen“ (kurz: rvSU-Konzept). Der im rvSU-Konzept (BGE 2022a) dargestellte prozessuale Arbeitsablauf („Workflow“, siehe auch Abbildung 6) bildet die Brücke zu diesem Bericht und gleichzeitig die Grundlage für die nachfolgende Kapitelstruktur. Mit Angabe der zugehörigen Vorschriften der EndlSiUntV ist ein Bezug zur rechtlichen Grundlage für die jeweiligen Arbeitsschritte hergestellt.

Ziel dieses Berichts ist die vertiefte Darstellung der im rvSU-Konzept (BGE 2022a) übergeordnet beschriebenen Methoden. Anhand von detaillierten Beschreibungen sollen die einzelnen Arbeitsschritte präzisiert und durch Anwendungsbeispiele nachvollziehbar dargestellt werden. Dafür ist der Bericht so aufgebaut, dass auf eine theoretische Grundlagenbeschreibung der jeweiligen Arbeitsschritte praktische Anwendungsbeispiele folgen.

Die in der rvSU durchzuführenden Arbeitsschritte der Geosynthese (§ 5 EndlSiUntV), der Erstellung vorläufiger Sicherheitskonzepte sowie vorläufiger Auslegungen des Endlagers (§ 6 EndlSiUntV) und der Analyse des Endlagersystems (§ 7 EndlSiUntV) bilden den inhaltlichen Schwerpunkt dieses Berichts. Für die Arbeitsschritte zur umfassenden Bewertung (§ 10 EndlSiUntV), Bewertung von Ungewissheiten (§ 11 EndlSiUntV) sowie der Ableitung des Erkundungs-, Forschungs- und Entwicklungsbedarfs (§ 12 EndlSiUntV) wird jeweils ein Ausblick gegeben.

Die in dem vorliegenden Bericht dargestellten Anwendungsmethoden und Beispiele wurden anhand von vier Gebieten zur Methodenentwicklung (GzME) erarbeitet (siehe Kapitel 1.1). Die GzME, eine Auswahl möglichst repräsentativer und gleichzeitig verschiedenartiger Beispiele für die jeweiligen Wirtsgesteine bzw. Wirtsgesteinstypen, haben die Funktion, den für die Methodenentwicklung erforderlichen Bezug zur realen Situation (Daten, Geologie etc.) sicherzustellen. Dies bezieht sich sowohl auf den Umgang mit großflächigen Teilgebieten (TG) als auch mit einer deutschlandweit heterogenen Datengrundlage. Sämtliche in diesem Dokument aufgeführten Beispiele repräsentieren aktuelle Arbeitsstände der Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) und es ist zu erwarten, dass sie im Rahmen der laufenden Arbeiten zur Ermittlung von Standortregionen weitere Änderungen erfahren werden.

Im Rahmen von Schritt 2 der Phase I des Standortauswahlverfahrens (§ 14 StandAG) wird es zu einer signifikanten Verkleinerung der im Verfahren zu bewertenden Gebiete kommen. Aus Teilgebieten, die – an die Erdoberfläche projiziert – etwa 54 % der Fläche Deutschlands bedecken, müssen Standortregionen in einer für die übertägige Erkundung handhabbaren Anzahl und räumlichen

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

Ausdehnung ermittelt werden. Die rvSU bilden dafür den ersten wesentlichen Eingrenzungsprozess und führen im Rahmen der umfassenden Bewertung des Endlagersystems zu einer Differenzierung von Gebieten in verschiedene Eignungskategorien. Je nach Kategorie findet entweder eine Eingrenzung (d. h. Flächen werden nicht weiter detailliert betrachtet) oder eine weitere Bearbeitung in Form von detaillierteren Beschreibungen und Bewertungen von Gebieten statt.

Die räumliche Bewertungsgrundlage für die Durchführung der rvSU sind Teilgebiete. Für das Ziel, die jeweils günstigsten Bereiche innerhalb geologisch heterogener Teilgebiete im Rahmen der rvSU herauszuarbeiten, ist eine räumlich differenzierte Bewertung erforderlich, wenn dies aufgrund der Datenlage möglich ist. Sämtliche im Rahmen der rvSU getroffenen Bewertungen sollen daher einen klaren Raumbezug haben, welcher sich aus der dafür verwendeten Datengrundlage bzw. den geologischen Gegebenheiten ergibt. Um den Prozess der Eingrenzung von Teilgebieten im Rahmen der rvSU nachvollziehbar und räumlich differenziert zu gestalten, werden die Teilgebiete (als Untersuchungsräume (UR)) im Laufe des Workflows in einzelne Gebietsteile (Teiluntersuchungsräume (TUR)) aufgeteilt, beschrieben und bewertet. Diese Aufteilung orientiert sich an geologischen Gegebenheiten, welche im Einklang mit Aspekten einer perspektivischen Endlagerauslegung stehen. Durch die Verkleinerung der Bezugsräume ermöglicht dieses Vorgehen eine höhere Nachvollziehbarkeit der für die jeweiligen Gebiete getroffenen Bewertungen. Gleichzeitig soll auch innerhalb von Teiluntersuchungsräumen eine weitere räumliche Differenzierung erfolgen, sobald es die vorhandene Datenlage zulässt. Die Prämisse der räumlich differenzierten Bewertung im Rahmen der rvSU ist ein zentraler Bestandteil des von der BGE entwickelten Workflows und wird in dem vorliegenden Bericht anhand von Karten aus den GzME beispielhaft für eine Reihe von Bewertungen illustriert.

1.1 Vorstellung der Gebiete zur Methodenentwicklung

Erst durch die praxisnahe Testung der entwickelten Methoden kann sichergestellt werden, dass diese unter den aktuellen Rahmenbedingungen (z. B. große Flächen, heterogene Datenlage) von Schritt 2 der Phase I durchführbar sind und den Anforderungen der Verordnungen und Gesetze entsprechen. Dafür entwickelt die BGE das rvSU-Konzept (BGE 2022a) direkt an praktischen Beispielen d. h. an Teilgebieten, die für die Methodenentwicklung ausgewählt wurden.

Die BGE trifft damit keine Aussage bezüglich einer möglichen Eignung als Standortregion. Die wissenschaftliche Methodenentwicklung auf Basis von bestehenden Teilgebieten, mit steter Rückkopplung an die Praxis, dient einer validen, praxisnahen sowie robusten, an realen Daten entwickelte Methode, die auf alle Teilgebiete übertragbar sein soll.

Diese GzME sind:

- Teilgebiet 035_00 (Steinsalz in steiler Lagerung, Salzstock Bahlburg)
- Teilgebiet 078_02 (Steinsalz in flacher Lagerung, Thüringer Becken)
- Teilgebiet 001_00 (Tongestein, Opalinuston)
- Teilgebiet 009_00 (kristallines Wirtsgestein, Saxothuringikum)

Die vier ausgewählten GzME, jeweils eins für jedes einzelne Wirtsgestein werden im Weiteren kurz vorgestellt (Kapitel 1.1.1; 1.1.2; 1.1.3; 1.1.4). Zusätzliche Informationen zu den GzME sind in Form von Steckbriefen abrufbar.[1]

1.1.1 Teilgebiet 035_00 (Salzstock Bahlburg)

Das GzME für das Wirtsgestein **Steinsalz in steiler Lagerung**

- Teilgebiet. 035_00TG_057_00IG_S_s_z,
- Untersuchungsraum. 02_00UR_035_00TG_057_00IG_S_s_z

befindet sich im Zechstein der Salzstruktur Bahlburg und weist eine Mächtigkeit von 860 m auf. Das Gebiet befindet sich in einer Tiefenlage von 640 m bis 1 500 m unterhalb der Geländeoberkante und ist etwa 19 Quadratkilometer groß (Abbildung 1). Der Salzstock Bahlburg ist ausgewählt worden, weil er bezüglich der Form (Fläche/Umfang) den Median unter den 60 Salzstöcken darstellt. Auch die Tiefe des Salzstockdaches unter Geländeoberkante ist bei diesem Salzstock durchschnittlich – es gibt viele Salzstöcke, die höher oder tiefer liegen. Zudem besteht der Salzstock Bahlburg überwiegend aus Zechsteinsalzen und ist kein Doppelsalinar mit einem zu erwartenden komplizierten Internbau. Mit der Auswahl des Salzstocks Bahlburg als GzME wird keine Aussage über die potenzielle Eignung dieser Struktur als Standortregion getroffen.

[1] unter: https://www.bge.de/de/endlagersuche/meldungen-und-pressemitteilungen/meldung/news/2021/7/619-endlagersuche/

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

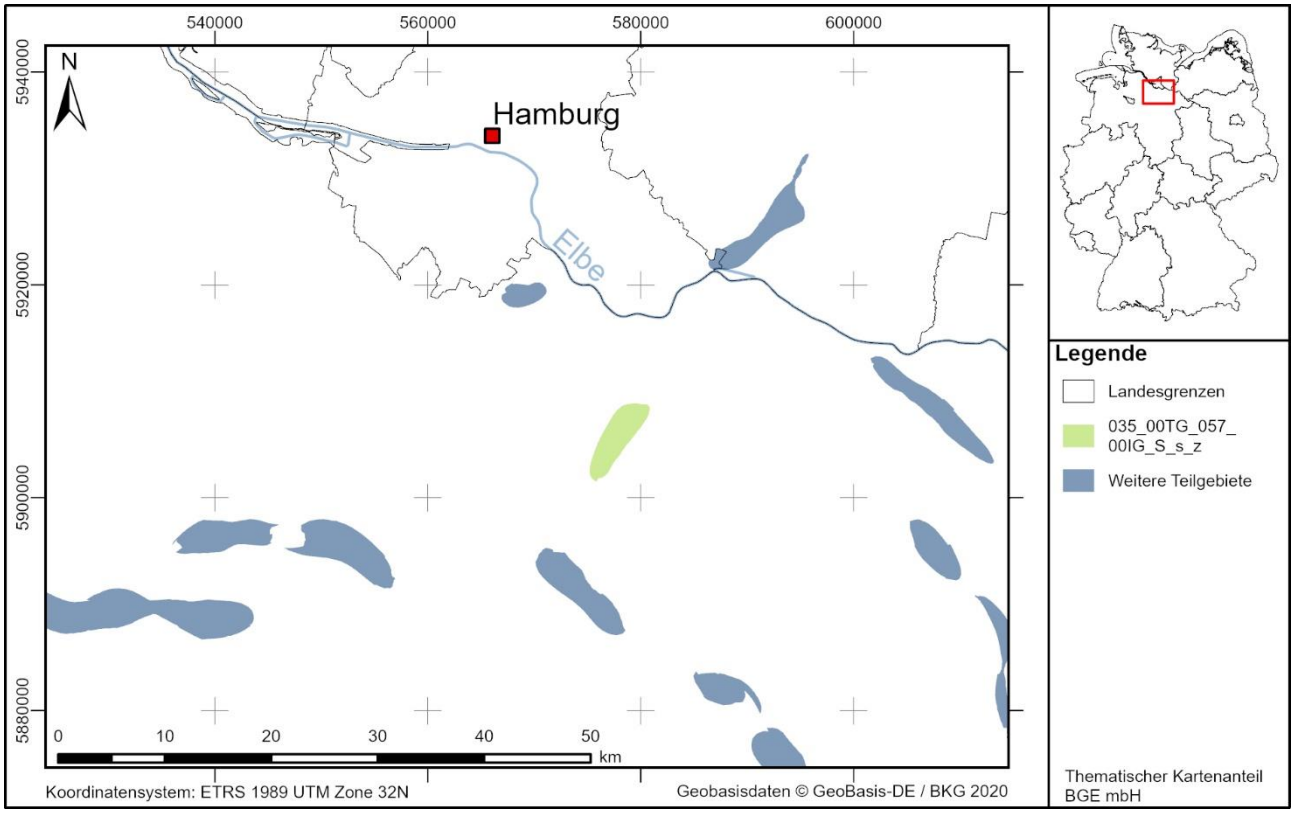


Abbildung 1: Lage des GzME im Teilgebiet 035_00TG_057_00IG_S_s_z. Das GzME befindet sich im Bundesland Niedersachsen, etwa 8 Kilometer südlich des Bundeslandes Hamburg.

1.1.2 Teilgebiet 078_02 (Thüringer Becken)

Das GzME für das Wirtsgestein **Steinsalz in flacher Lagerung**

- Teilgebiet. 078_02TG_197_02IG_S_f_z,
- Untersuchungsraum 03_00UR_078_02TG_197_02IG_S_f_z

bezieht sich auf den Zechstein im Thüringer Becken, der unter anderem die endlagerrelevanten Steinsalzhorizonte der Werra-, Staßfurt- und Leine-Formation enthält. Im Thüringer Becken weist der gesamte Zechstein eine Mächtigkeit von bis zu 1200 m auf. Die Teufenlage der Strukturbasis befindet sich im Teilgebiet zwischen 400 m und 1 500 m unterhalb der Geländeoberkante. Das Teilgebiet ist etwa 6151 Quadratkilometer groß (Abbildung 2). Das Thüringer Becken weist den typischen geologischen Aufbau des Zechsteins mit mehreren flach gelagerten Steinsalzhorizonten der Werra-, Staßfurt-, Leine- und Aller-Formationen auf. Für dieses relativ große Teilgebiet liegt eine unterschiedlich gute Datenlage vor. Durch Rohstofferkundungen in einigen Teilen Thüringens und Sachsen-Anhalts ist die Datendichte sehr hoch, während in anderen Bereichen nur wenige Daten vorliegen. Auf diese Weise kann hier z. B. getestet werden, wie methodisch mit solch einer unterschiedlichen Datenlage umgegangen werden kann. Mit der Auswahl des Thüringer Beckens als GzME wird keine Aussage über die potenzielle Eignung dieses Gebiets als Standortregion getroffen.

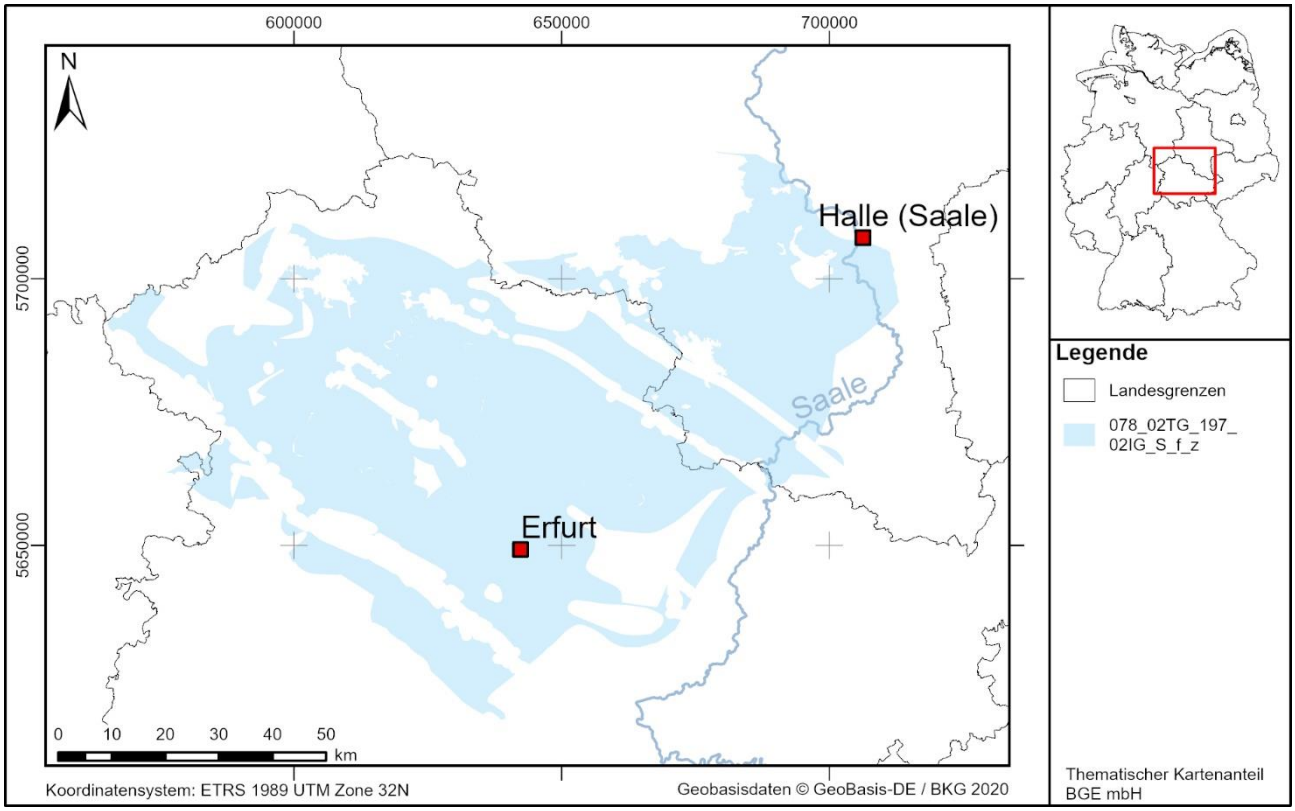


Abbildung 2: Lage des GzME im Teilgebiet 078_02TG_197_02IG_S_f_z. Das GzME befindet sich in den Bundesländern Thüringen, Sachsen-Anhalt, Niedersachsen und Hessen.

1.1.3 Teilgebiet 009_00 Kristallin (Saxothuringikum)

Das GzME für das **kristalline** Wirtsgestein

- Teilgebiet 009_00TG_194_00IG_K_g_SO (Saxothuringikum),
- Untersuchungsraum 04_00UR_009_00TG_194_00IG_K_g_SO

lässt sich grob in drei Gruppen unterteilen; (i) kristalline Wirtsgesteinseinheiten, die in der cadomischen Orogenese im Neoproterozoikum (ca. 580 bis 540 Millionen Jahre) entstanden sind, (ii) Granite und Ausgangsgesteine von variszischen hochgradig regionalmetamorphen Gesteinen, die im Ordovizium (ca. 485 bis 460 Millionen Jahre) gebildet wurden und (iii) hochgradig regionalmetamorphe Gesteine und Granite, die während oder nach der variszischen Orogenese im Oberkarbon und Perm (ca. 340 bis 280 Millionen Jahre) entstanden sind. Die Gesamtfläche des Teilgebiets beträgt etwa 32 655 Quadratkilometer (Abbildung 3). Aufgrund der Diversität der geologischen Verhältnisse wurde das Teilgebiet 009_00TG_194_00IG_K_g_SO als GzME ausgewählt. In vielen Bereichen ist kristallines Wirtsgestein oberflächennah aufgeschlossen, in anderen Gebieten sind die kristallinen Einheiten von Sedimentgesteinen überdeckt. Kristalline Gesteine treten in Form von Metamorphiten und Plutoniten in stark und weniger stark gestörten Bereichen auf. Im vorliegenden Bericht wurden

die entwickelten Methoden aufgrund der Größe dieses Teilgebiets im nordöstliche Teil des Saxothuringikums entwickelt und getestet. Mit der Auswahl des Saxothuringikum als GzME wird keine Aussage über die potenzielle Eignung dieses Gebiets als Standortregion getroffen.

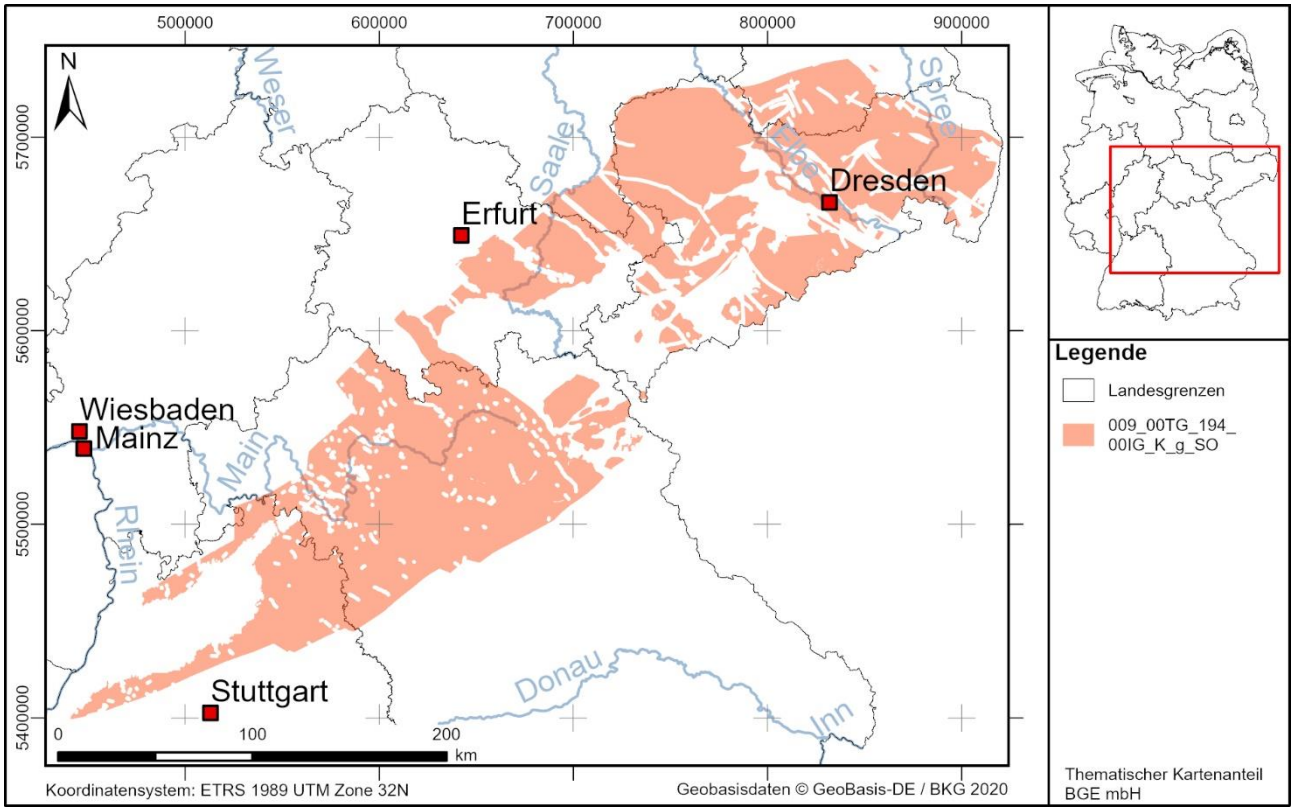


Abbildung 3: Lage des GzME im Teilgebiet 009_00TG_194_00IG_K_g_S. Das Teilgebiet befindet sich in den Bundesländern Baden-Württemberg, Bayern, Brandenburg, Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen.

1.1.4 Teilgebiet 001_00 (Opalinuston)

Das GzME im Wirtsgestein **Tongestein**

- Teilgebiet 001_00TG_032_01IG_T_f_jmOPT (Opalinuston),
- Untersuchungsraum 01_00UR_00TG_032_01IG_T_f_jmOPT

bezieht sich auf die stratigraphische Einheit Mittlerer Jura. Es hat eine maximale Mächtigkeit von 300 m. Die Basisfläche des Teilgebiets befindet sich in einer Teufenlage von 400 m bis 1 500 m unterhalb der Geländeoberkante und es ist etwa 4 241 Quadratkilometer groß (Abbildung 4). Das Teilgebiet 001_00TG_032_01IG_T_f_jmOPT (Opalinuston-Formation) wurde als GzME im Tongestein ausgewählt, da es im Vergleich zu den anderen Teilgebieten des Wirtsgesteins Tongestein eine überschaubare Größe aufweist. Gesteinseigenschaften der Opalinuston-Formation können aus dem bereits gut untersuchten, südlich gelegenen analogen Opalinuston abgeleitet werden. Die Herangehensweise an die Bewertung dieser Eigenschaften soll an diesem Teilgebiet erprobt und auf andere Teilgebiete im Tongestein übertragen werden. Eine Herausforderung ist die ungleich verteilte, stellenweise geringe Dichte an Bohrungen innerhalb des Teilgebiets. Mit der

Auswahl des Opalinustons als GzME wird keine Aussage über die potenzielle Eignung dieses GzME als Standortregion getroffen.

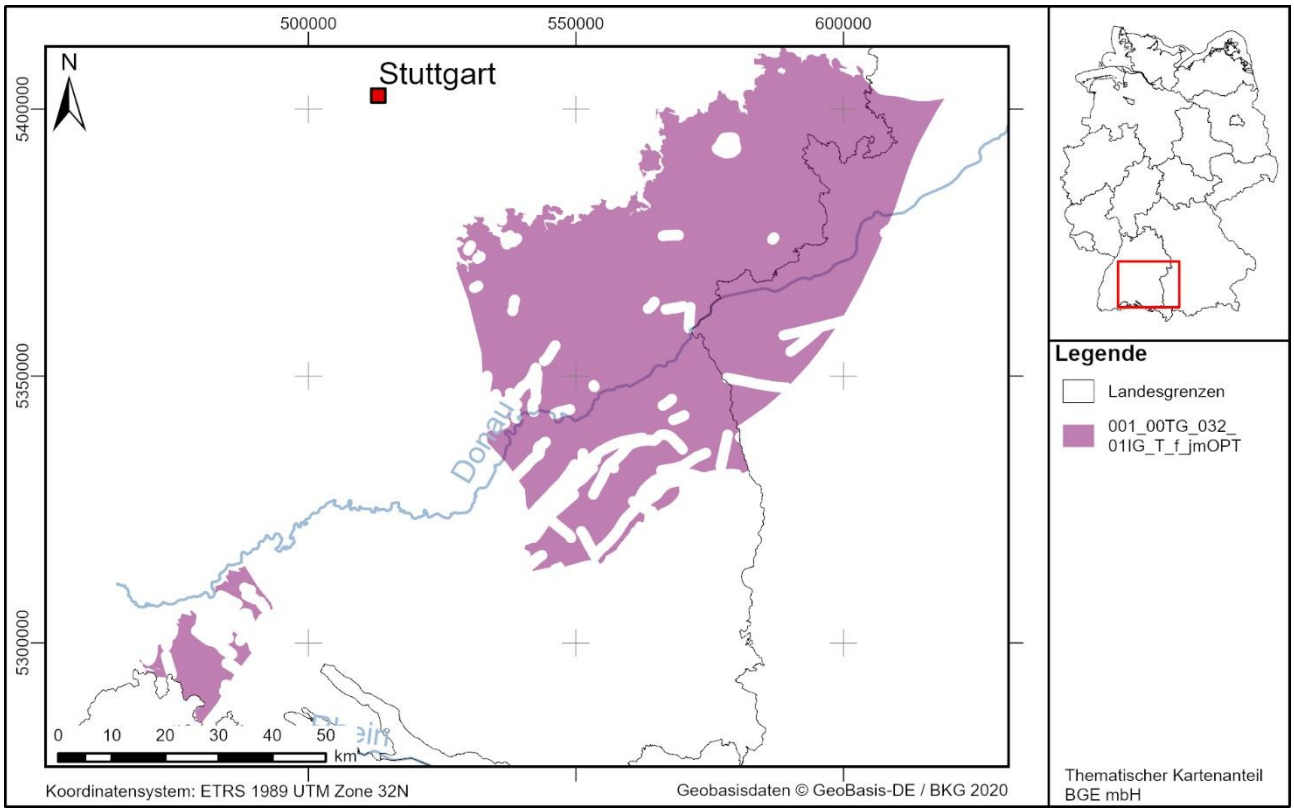


Abbildung 4: Lage des GzME im Teilgebiet 001_00TG_032_01IG_T_f_jmOPT. Das GzME erstreckt sich über Gebiete der Bundesländer Baden-Württemberg und Bayern.

1.2 Inhalte, Arbeitsschritte und Ablauf der rvSU

Die Anforderungen an die Sicherheit der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle und die Durchführung der rvSU im Standortauswahlverfahren sind in der Endlagersicherheitsanforderung (EndlSiAnfV) und der EndlSiUntV geregelt. Dabei werden die einzelnen Inhalte der rvSU, die zugleich Arbeitsschritte darstellen, in den Vorschriften der EndlSiUntV aufgeführt. Diese übergeordneten Arbeitsschritte aus der EndlSiUntV sind in Abbildung 5 schematisch dargestellt und stellen die Grundlage für die nachfolgende Kapitelstruktur dar. Damit dient Abbildung 5 als Orientierungshilfe durch dieses Dokument und wird am Anfang eines jeden Kapitels als Erinnerungshilfe dazu genutzt, die jeweiligen Inhalte in den Gesamtkontext zu setzen.

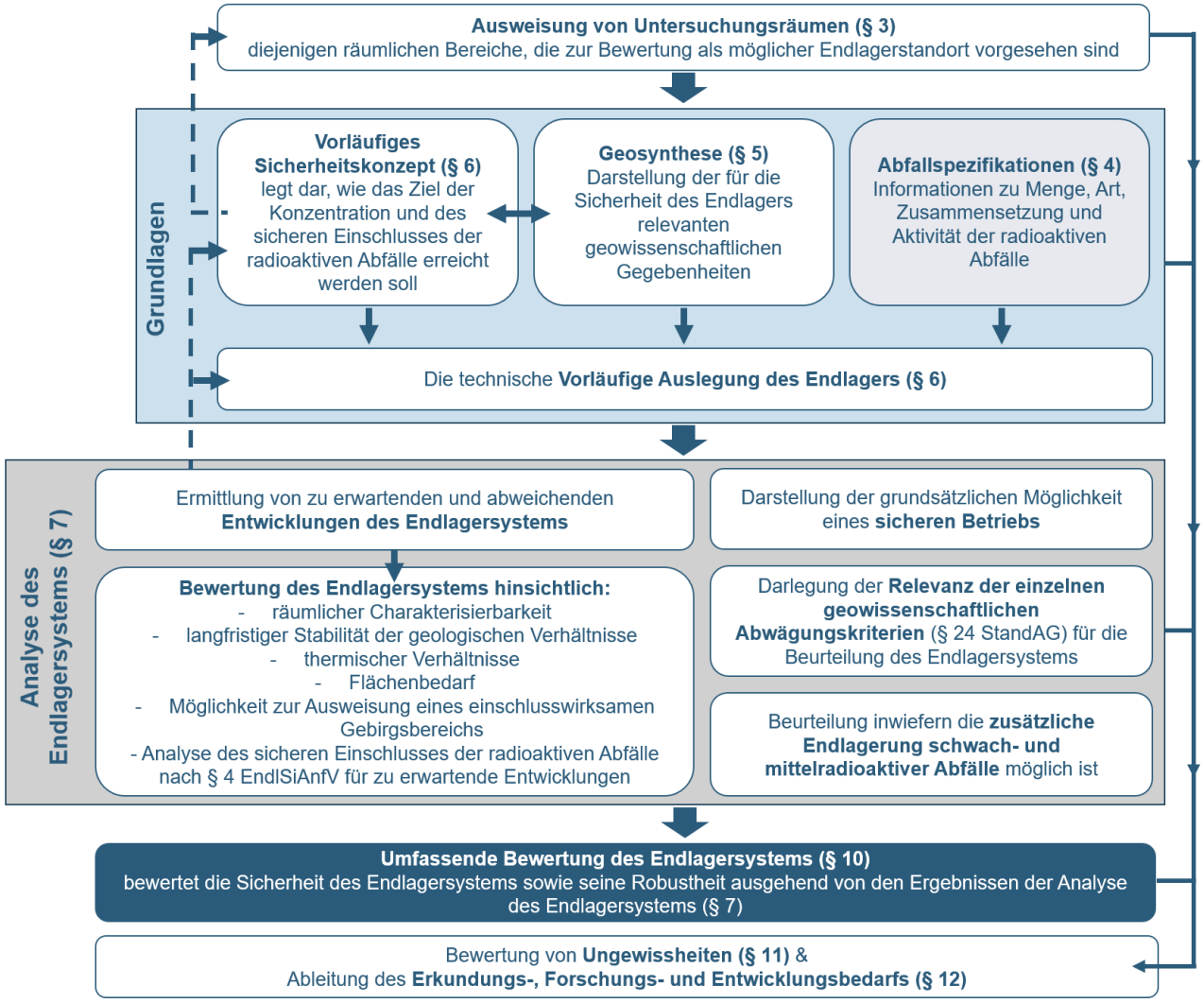


Abbildung 5: Schematische Darstellung der Arbeitsschritte der rvSU gemäß EndlSiUntV

Die Arbeitsschritte, die gemäß EndlSiUntV in den rvSU durchzuführen sind, gliedern sich folgendermaßen: Zunächst müssen die Abfallspezifikationen als einheitliche Grundlage für alle rvSU zusammengestellt werden (Menge, Art, Zusammensetzung und Aktivität gemäß § 4 Abs. 2 EndlSiUntV, Kapitel 2). Für die Bearbeitung der rvSU wird für jedes Teilgebiet mindestens ein Untersuchungsraum ausgewiesen (§ 3 EndlSiUntV; siehe Kapitel 3). Für jeden dieser Untersuchungsräume ist anschließend eine eigene rvSU durchzuführen (§ 3 Abs. 4 EndlSiUntV), die die folgenden Inhalte umfasst:

- Vorläufiges Sicherheitskonzept (§ 6 Abs. 1 EndlSiUntV; Kapitel 4.1)
- Vorläufige Auslegung des Endlagers (§ 6 Abs. 4 EndlSiUntV; Kapitel 4.2)
- Geosynthese (§ 5 EndlSiUntV; Kapitel 5)
- Analyse des Endlagersystems (§ 7 Abs. 4, 6 EndlSiUntV; Kapitel 6 und 8)
- Umfassende Bewertung des Endlagersystems (§ 10 EndlSiUntV; Kapitel 7 und 9)

- Bewertung von Ungewissheiten (§ 11 EndlSiUntV; Kapitel 10)
- Ableitung des Erkundungs-, Forschungs- und Entwicklungsbedarfs (§ 12 EndlSiUntV; Kapitel 11)

Das methodische Vorgehen zu den hier genannten Arbeitsschritten ist ausführlich in den jeweiligen Kapiteln beschrieben und wird dort anhand detaillierter Beschreibungen präzisiert und durch Anwendungsbeispiele nachvollziehbar dargestellt.

1.2.1 Prozessualer Ablauf der rvSU

Der zeitliche Ablauf der rvSU, also die Reihenfolge der Arbeitsschritte, entspricht nicht strikt der Paragrafenreihenfolge der EndlSiUntV. Dies ergibt sich aus der starken Verzahnung der einzelnen Arbeitsschritte einer rvSU. Darüber hinaus ist für diejenigen Bereiche eines Untersuchungsraums, bei denen schon bei der Bewertung eines oder weniger Aspekte eine fehlende Eignung als mögliche Standortregion während der Bearbeitung festgestellt wird, eine vollständige Erfassung und Analyse der übrigen Aspekte der EndlSiUntV nicht erforderlich. Daher wird der Bearbeitungsablauf in vier Prüfschritte untergliedert, in denen die Kriterien der Verordnungen (EndlSiUntV, EndlSiAnfV) sowie des StandAG mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad geprüft werden. Die systematische Einhaltung der jeweiligen Anforderungen der Prüfschritte stellt sicher, dass es nachvollziehbar ist wieso Gebiete zu aussichtsreichen Kandidaten für den bestmöglichen Standort werden. Es wird weiterhin sichergestellt, dass der Fokus der Bearbeitung stets auf den Gebieten liegt, die potenziell als Standortregion in Frage kommen.

Der prozessuale Ablauf der rvSU in der Bearbeitung ist nachfolgend beschrieben und schematisch in Abbildung 6 dargestellt. Die vier Prüfschritte sind in dem Ablaufdiagramm als Rauten dargestellt.

- Der Prüfschritt der zielgerichteten Prüfung von Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen[2].
- Der Prüfschritt der qualitativen Bewertung des sicheren Einschlusses (Aspekte a) und b)[3] aus § 7 Abs. 6 Nr. 3 EndlSiUntV sowie Anlage 1 und 2 (zu § 24 Abs. 3) StandAG).
- Der Prüfschritt der quantitativen Bewertung des sicheren Einschlusses (Aspekte e) und f) aus § 7 Abs. 6 Nr. 3 EndlSiUntV).
- Der Prüfschritt des sicherheitsgerichteten Diskurses.

Der prozessuale Ablauf erzeugt eine Kategorisierung von Gebieten in vier Gütebereiche von A bis D, die sich flächendifferenziert in Form von Karten darstellen lassen. Die Kategorien ermöglichen einerseits ein transparentes Nachvollziehen des Abprüfens der rvSU-Anforderungen an den Gebieten

[2] Die Prüfung einzelner Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen hängt von den lokalen geologischen Gegebenheiten und der aktuellen Bearbeitungstiefe ab. Geprüft wird situativ angepasst an die Arbeitsschritte, die in einem Untersuchungsraum durchgeführt werden.

[3] In der EndlSiUntV sind in § 7 Abs. 6 Nr. 3 Buchst. a) bis f) zu bewertende Aspekte aufgeführt. Diese werden Aspekte a) bis f) genannt

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

und andererseits eine sukzessive Fokussierung auf aussichtsreiche Gebiete. Die Bearbeitung erfolgt, wenn möglich, stets flächendifferenziert und im nachfolgenden wird dies durch den Begriff „Bereiche“ bezeichnet (Untersuchungsräume, Teiluntersuchungsräume oder Teilbereiche davon, siehe auch Kapitel 5.6).

Die Kategorisierung leitet sich aus der Bearbeitung der Prüfschritte folgendermaßen ab (siehe Abbildung 6):

- **Kategorie D**: enthält auf Grund des Vorliegens von Ausschlusskriterien oder der Nichteinhaltung von Mindestanforderungen ungeeignete Bereiche (Prüfschritt der zielgerichteten Anwendung der Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen).
- **Kategorie C**: enthält Bereiche, die auf Grund der qualitativen oder quantitativen Bewertung ungeeignet sind oder keine überwiegend gute Bewertung vorweisen (Prüfschritt der qualitativen Bewertung des sicheren Einschlusses und Prüfschritt der quantitativen Bewertung des sicheren Einschlusses).
- **Kategorie B**: enthält Bereiche, die auf Grund der quantitativen Bewertung genauer untersucht werden, aber weniger gut geeignet sind als die Bereiche in Kategorie A (Prüfschritt des sicherheitsgerichteten Diskurses).
- **Kategorie A**: enthält die am besten geeigneten Bereiche (Prüfschritt des sicherheitsgerichteten Diskurs). Ausschließlich die Bereiche aus Kategorie A werden im Anschluss an die rvSU im Rahmen von § 14 StandAG mit den geowissenschaftlichen Abwägungskriterien weiterbearbeitet.

Der prozessuale Ablauf enthält vier Ebenen von (1) bis (4), deren Inhalte von Ebene zu Ebene entweder detaillierter oder räumlich spezifischer werden (vgl. Abbildung 6):

- In **Ebene 1** werden Grundlagen geschaffen, die gebietsübergreifend (für mehrere oder alle Teilgebiete bzw. Untersuchungsräume) angewendet werden.
- Auf **Ebene 2** finden Arbeitsschritte statt, die für jeden Untersuchungsraum grundlegend durchgeführt werden. Ein Untersuchungsraum umfasst in der Regel ein gesamtes Teilgebiet (siehe Kapitel 3).
- **Ebene 3** enthält spezifische (detailliertere) Arbeitsschritte, die jeweils für Untersuchungsräume oder Teilbereiche von Untersuchungsräumen (sogenannte Teiluntersuchungsräume, siehe Kapitel 5.6) oder Teilbereiche von Teiluntersuchungsräumen, durchgeführt werden.
- Weitere Arbeitsschritte werden in Abhängigkeit von der Bewertung der jeweiligen Prüfschritte durchgeführt. Darunter fallen die Arbeitsschritte der **Ebene 4**. Hier werden die abschließenden Untersuchungen für die Bereiche der Kategorie A (nachfolgend erläutert) durchgeführt. Dies führt dazu, dass alle Inhalte der rvSU vollumfänglich bearbeitet werden.

Im Folgenden werden die einzelnen Arbeitsschritte für jede der vier Ebenen ausführlicher beschrieben.

Ebene 1 – Grundlagen für sämtliche Untersuchungsräume:

- Zu den für alle Untersuchungsräume gültigen Grundlagen gehört die Zusammenstellung des Abfallinventars (§ 4 Abs. 2 EndlSiUntV, siehe Kapitel Kapitel 2), welches für die Auslegung des Endlagers sowie die Prüfung des Massen- und Stoffmengenkriteriums zugrunde zu legen ist.
- Des Weiteren werden das vorläufige Sicherheitskonzept (§ 6 Abs. 1 EndlSiUntV, siehe Kapitel 4.1) sowie die vorläufige Auslegung des Endlagers (§ 6 Abs. 2 und 4 EndlSiUntV, siehe Kapitel 4.2) jeweils wirtsgesteinsspezifisch erarbeitet.
- Auch eine erste allgemeine Beschreibung der geogenen Prozesse (auch geowissenschaftliche Langzeitprognose genannt, siehe Kapitel 5.3) sowie die Ableitung der Entwicklungen für wirtsgesteinsspezifische Endlagersysteme auf Basis von FEP(*Features, Events and Processes;* Engl. „Komponenten, Ereignisse und Prozesse“)-Katalogen (§ 7 Abs. 6 Nr. 1 EndlSiUntV, siehe Kapitel 8.2) und der vorläufigen Endlagerauslegung (siehe Kapitel 4.2) erfolgt einheitlich für alle Untersuchungsräume eines Wirtsgesteins. Die geogenen Prozesse werden dabei überregional dargestellt.

Ebene 2 – Allgemein gültige Arbeitsschritte für den gesamten Untersuchungsraum:

- Zuerst wird ein Untersuchungsraum ausgewiesen, der das gesamte Teilgebiet umfasst (siehe Kapitel 3).
- Für den Untersuchungsraum wird dann im Rahmen der Geosynthese (§ 5 EndlSiUntV, siehe Kapitel 5) eine geologische Übersicht erstellt, die für die Bearbeitung weiterer Arbeitsschritte benötigt wird. Der Fokus liegt hier auf der Interpretation der räumlichen Konfiguration/Geometrie der Gesteinskörper im Untersuchungsraum.
- Die allgemeinen Arbeitsschritte können mit einer Unterteilung des Untersuchungsraums in Teiluntersuchungsräume enden (siehe Kapitel 5.6), um nach Möglichkeit Gebiete mit einheitlichen geowissenschaftlichen Charakteristika (z. B. stratigraphisch, lithologisch, tektonisch) für die weitere Bearbeitung zu erhalten. Liegen innerhalb eines Untersuchungsraums mehrere Wirtsgesteinsbereiche desselben Wirtsgesteins mit Barrierefunktion (siehe Kapitel 4.1) vertikal übereinander, die jeweils einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich aufnehmen können, werden diese in separate Teiluntersuchungsräume unterteilt. Dies geschieht im Rahmen der Geosynthese (§ 5 EndlSiUntV, siehe Kapitel 5).
- Voraussichtlich werden nicht alle Untersuchungsräume in Teiluntersuchungsräume unterteilt werden, bspw. Untersuchungsräume in Steinsalz in steiler Lagerung (je nach Ausprägung). In diesen Fällen erfolgen die Arbeitsschritte der nachfolgenden Ebene 3 für den Untersuchungsraum.

Ebene 3 – Spezifische Arbeitsschritte für einzelne Teiluntersuchungsräume:

- Die folgenden Arbeitsschritte werden für Teiluntersuchungsräume durchgeführt. Die Anzahl der Arbeitsschritte für den individuellen Teiluntersuchungsraum hängt davon ab, ob die Prüfschritte sukzessive positiv durchlaufen werden können.
- Für die jeweilige Bearbeitung eines Prüfschritts sind jeweils Teilaspekte aus verschiedenen Paragrafen der EndlSiUntV notwendig.
- Der erste Prüfschritt ist die zielgerichtete Prüfung von Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen. Soweit dieser Prüfschritt negativ ist (Ausschlusskriterien erfüllt oder Mindestanforderungen nicht erfüllt), wird der entsprechende Bereich umgehend bewertet (§ 10 EndlSiUntV) und in Kategorie D eingestuft (siehe Kapitel 5.4 und Kapitel 5.5). Dieser Prüfschritt ist begleitend zu der Bearbeitung der Arbeitsschritte in der Geosynthese (§ 5 EndlSiUntV) und Analyse des Endlagersystems (§ 7 Abs.6 EndlSiUntV) angelegt. Er kann auch in den Ebenen 2 und 4 geprüft werden, wenn im Rahmen der dort durchgeführten Arbeiten entsprechende Informationen vorliegen. Es ist möglich, dass ein Bereich eines Teiluntersuchungsraums diesen Prüfschritt nicht besteht, und damit in Kategorie D eingestuft wird, aber der übrige Bereich des Teiluntersuchungsraums den Prüfschritt besteht. In diesem Fall wird der positiv bewertete Bereich des Teiluntersuchungsraums mit den folgenden Arbeitsschritten weiter bewertet und geprüft.
- Bereiche, die nicht in Kategorie D eingeordnet worden sind, werden anschließend durch eine qualitative Bewertung des sicheren Einschlusses systematisch geprüft. Diese Bewertung basiert auf den Aspekten der räumlichen Charakterisierbarkeit und langfristigen Stabilität (§ 7 Abs. 6 Nr. 3 Buchst. a) und b) EndlSiUntV), die in Anlehnung an die beinahe wortgleichen Anlagen 3 und 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG bewertet werden, sowie auf einer Bewertung der Anlagen 1 und 2 (zu § 24 Abs. 3) StandAG. Darüber hinaus können ggf. im Prüfschritt der qualitativen Bewertung weitere Aspekte, die auf eine geringe Eignung schließen lassen, Berücksichtigung finden. Bspw. eine ungünstige Tiefenlage bezüglich bautechnischer Aspekte im Tongestein (zu Details hierzu siehe Kapitel 6). Wenn für diesen Prüfschritt keine überwiegend gute Bewertung erfolgt (vgl. Kapitel 7.1), wird der entsprechende Bereich direkt über die umfassende Bewertung (§ 10 EndlSiUntV) in Kategorie C eingestuft. Die übrigen Arbeits- und Prüfschritte (vgl. Abbildung 6) werden für den Bereich nicht durchlaufen. Es ist möglich, dass ein Bereich eines Teiluntersuchungsraums diesen Prüfschritt nicht besteht, und damit in Kategorie C gelangt, aber der übrige Bereich des Teiluntersuchungsraums den Prüfschritt besteht. In diesem Fall wird der positiv bewertete Bereich des Teiluntersuchungsraums nicht in Kategorie C sortiert, sondern mit den folgenden Arbeits- und Prüfschritten weiter bewertet und geprüft.

- Für die verbleibenden Bereiche werden nun weitere Arbeitsschritte in der Geosynthese erarbeitet oder inhaltlich vertieft (§ 5 EndlSiUntV, siehe Kapitel 5). Hier erfolgt u. a. die Erstellung von geologischen Modellen (z. B. repräsentative Profile, konzeptionelle oder parametrisierte 1 D-, 2 D- oder 3 D-Modelle) sowie die Erarbeitung von Parametern für die quantitative Bewertung des sicheren Einschlusses.
- Anschließend wird nun, aufbauend auf dem vorangegangenen Prüfschritt der qualitativen Bewertung des sicheren Einschlusses, zur Beurteilung der Aspekte des § 7 Abs. 6 Nr. 3 Buchst. e) und f) EndlSiUntV der sichere Einschluss quantitativ geprüft und die damit einhergehende Möglichkeit zur Ausweisung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs abgeleitet (siehe Kapitel 8.5).
- Die zu erwartenden und abweichenden Entwicklungen werden für den Untersuchungsraum abgeleitet, indem auf Basis der übergeordneten wirtsgesteinsspezifischen Entwicklungen, die für den Teiluntersuchungsraum relevanten Entwicklungen ausgearbeitet werden. Da insbesondere die geogenen Prozesse unabhängig von den Teiluntersuchungsraum-Grenzen ausgeprägt sein werden, werden repräsentative Konfigurationen erarbeitet, deren weitere Ergebnisse auf die Teiluntersuchungsräume übertragen werden.
- Nach Ableitung der zu erwartenden und abweichenden Entwicklungen erfolgt deren Umsetzung in numerischen 1D-Transportmodelle für den Radionuklidtransport für die zu erwartenden Entwicklungen.
- Die Ergebnisse dieser Radionuklidtransportberechnungen werden mit den Anforderungen bezüglich des Massen- und Stoffmengenkriteriums (vgl. § 4 Abs. 5 EndlSiAnfV) abgeglichen. Auf Basis dieser Ergebnisse wird eine Kennzahl berechnet (siehe Kapitel 8.5). Diese geht in den nächsten Prüfschritt ein. Ist die Bewertung überwiegend gut, dann wird der entsprechende Bereich in den weiteren Arbeitsschritten, wie in Abbildung 6 dargestellt, behandelt. Ist dies nicht der Fall, wird der entsprechende Bereich über die umfassende Bewertung (§ 10 EndlSiUntV) in Kategorie C eingestuft.
- Bei positiven Durchlauf des vorangegangenen Prüfschritts wird die wirtsgesteinsspezifische Endlagerauslegung an vorhandene Daten zu Tiefe und entsprechender Gebirgstemperatur an den vorliegenden Bereich angepasst sowie die Beurteilung zur Möglichkeit des sicheren Betriebs vorgenommen (§ 7 Abs. 6 Nr. 4 EndlSiUntV, siehe Kapitel 4.2). Außerdem werden die thermischen Verhältnisse und der Flächenbedarf (§ 7 Abs. 6 Nr. 3 Buchst. c) und d) EndlSiUntV; siehe Kapitel 8.6) bewertet und in einer Kennzahl quantifiziert.

- In einem letzten Prüfschritt, einem sicherheitsgerichteten Diskurs, werden im Rahmen von § 10 EndlSiUntV alle bislang erfolgten qualitativen und quantitativen Bewertungen gemeinsam betrachtet (siehe Kapitel 9). Dieser Diskurs wird verbalargumentativ erfolgen, aber ergänzend die Miteinbeziehung von entsprechenden Kennzahlen enthalten. Ziel ist es, die Bereiche, die nicht in Kategorie D oder C eingestuft wurden, bezüglich ihrer Eignung in einer integralen Sichtweise zu diskutieren und die am besten geeigneten Bereiche zu identifizieren. Diese werden in Kategorie A eingestuft, die übrigen, weniger guten Bereiche in Kategorie B.

Ebene 4 – Arbeitsschritte für Bereiche der Kategorie A

- Bei allen spezifischen Arbeitsschritten der rvSU werden bestehende Ungewissheiten erfasst, dies geschieht bereits begleitend auf den Ebenen (1) bis (3). Aufgrund der unterschiedlichen Detailtiefe erfolgt für die Bereiche der Kategorie A die Bewertung von Ungewissheiten nach § 11 EndlSiUntV (siehe Kapitel 10).
- Für die Bereiche der Kategorie A erfolgt die Bewertung der Relevanz der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien (§ 7 Abs. 4 EndlSiUntV, siehe Kapitel 8.8) sowie die Ableitung des Erkundungs-, Forschungs- und Entwicklungsbedarfs (§ 12 EndlSiUntV, siehe Kapitel 11). Außerdem wird die Möglichkeit zur zusätzlichen Endlagerung von schwach- und mittelradioaktiven Abfällen durch ein separates Bergwerk im gleichen Teiluntersuchungsraum anhand einer Volumenabschätzung beurteilt (§ 7 Abs. 6 Nr. 6 EndlSiUntV, siehe Kapitel 8.9).
- Die Bereiche der Kategorie A gehen nun als Eingangsgrößen in die Bearbeitung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien ein.

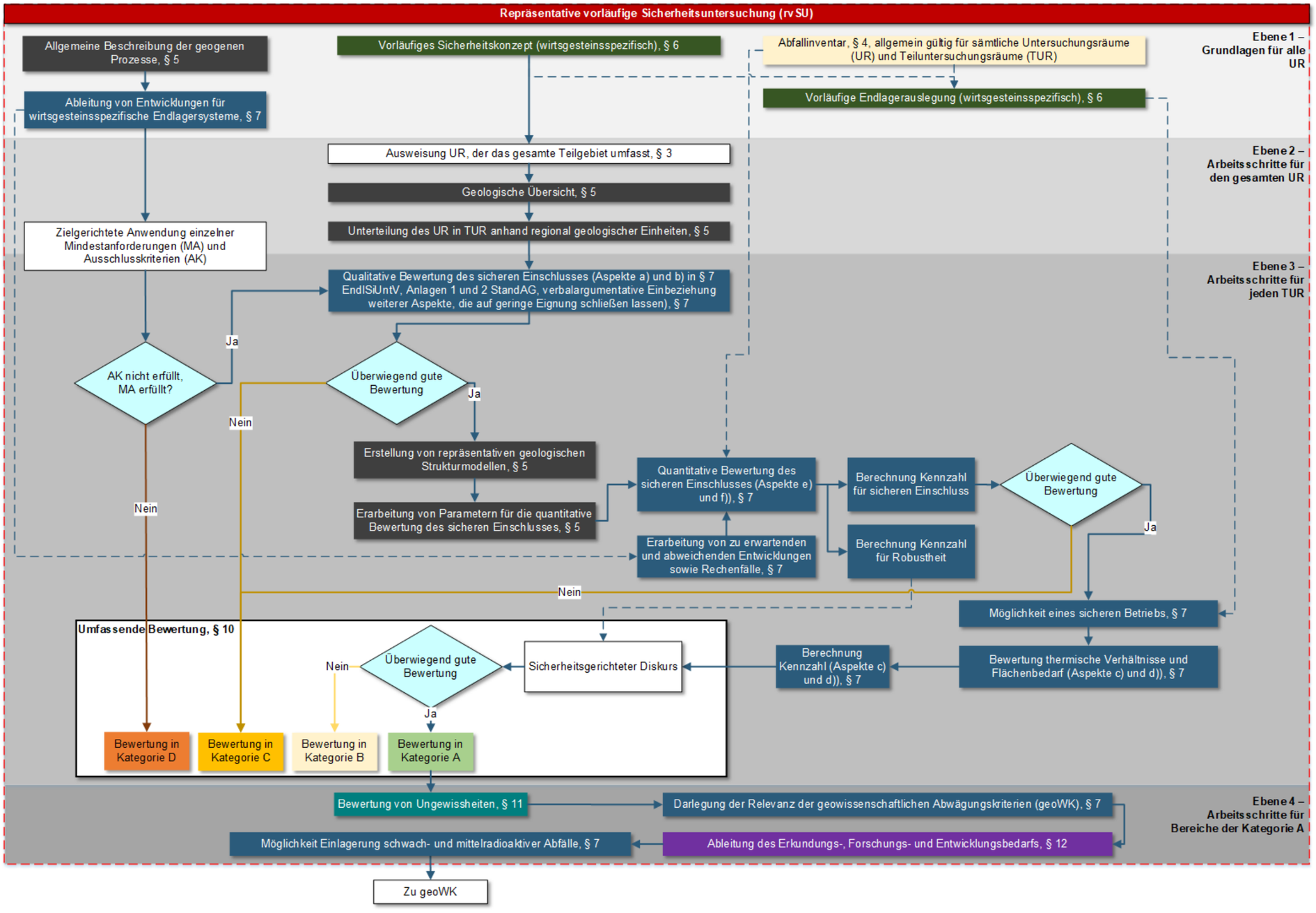


Abbildung 6: *Ablauf der Bearbeitungsschritte einer rvSU.*
Prüfschritte sind als Rauten dargestellt. Pfeile stellen die Bearbeitungsreihenfolge inklusive einer Informationsweitergabe und gestrichelte dünnere Pfeile eine Informationsweitergabe dar. Die farbliche Kodierung der Arbeitsschritte spiegelt die einzelnen Paragrafen der EndlSiUntV wider.

1.2.2 Datenflussdiagramm – Zusammenspiel von Daten, Interpretationen und Bewertungen in den rvSU

Innerhalb der rvSU werden Daten unterschiedlichster Datenquellen und Fachdisziplinen zusammengeführt, um anhand von Eingangsdaten zu einer sicherheitsgerichteten Bewertung zu gelangen. Zusätzlich zur Durchführung der rvSU stellen diese Daten die Grundlage für die Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien und den Vorschlag zu den Standortregionen für die übertägige Erkundung dar (§ 14 StandAG).

Abbildung 7 zeigt ein Datenflussdiagramm, welches den Zusammenhang zwischen den Datenquellen, Daten, Interpretationen, sicherheitsrelevanten Aspekten und deren Bewertung vereinfacht darstellt. Gleichzeitig illustriert das Diagramm die Hauptarbeitsschritte der fachlichen Bearbeitung: es zeigt, von links nach rechts, wie aus Rohdaten, durch unterschiedliche Stadien der interdisziplinären Interpretation, Synthese und Modellierung, die für die Bewertung der Sicherheit des Endlagers relevanten Aspekte herausgearbeitet werden. Anhand der in der EndlSiUntV, der EndlSiAnfV und dem StandAG festgelegten Kriterien können dann Bewertungen und Entscheidungen getroffen werden.

Übergeordnete Datenkategorien und Fachrichtungen sind durch unterschiedliche Farben in der zweiten Spalte zusammengefasst, wobei zu beachten ist, dass nicht immer Kategorien scharf voneinander getrennt werden können. Die Hauptkategorien sind (von oben nach unten): Geologie und Struktur, Gesteinseigenschaften und Parameter, Hydrologie und Hydrochemie, geogene Prozesse sowie Eigenschaften des Abfallinventars. Daten unterschiedlicher Kategorien werden interpretiert und in multidisziplinären Modellen zusammengeführt, wobei die Modelle sowohl numerische Rechenmodelle als auch konzeptioneller Art sein können. Ebenso sind, je nach Bedarf, Modelle unterschiedlichen Detailgrades möglich. Die Modelle, einzeln oder gekoppelt, erlauben die Bewertung der für ein Endlager sicherheitsrelevanten Aspekte.

Das hier gezeigte Diagramm stellt eine Vereinfachung der komplexen fachlichen Bearbeitung anhand der Methodenentwicklung und des aktuellen Kenntnisstandes dar (beispielsweise sind in der Abbildung nicht alle möglichen Verbindungen eingetragen) und es wird nicht der Anspruch einer vollumfänglichen Darstellung erhoben.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

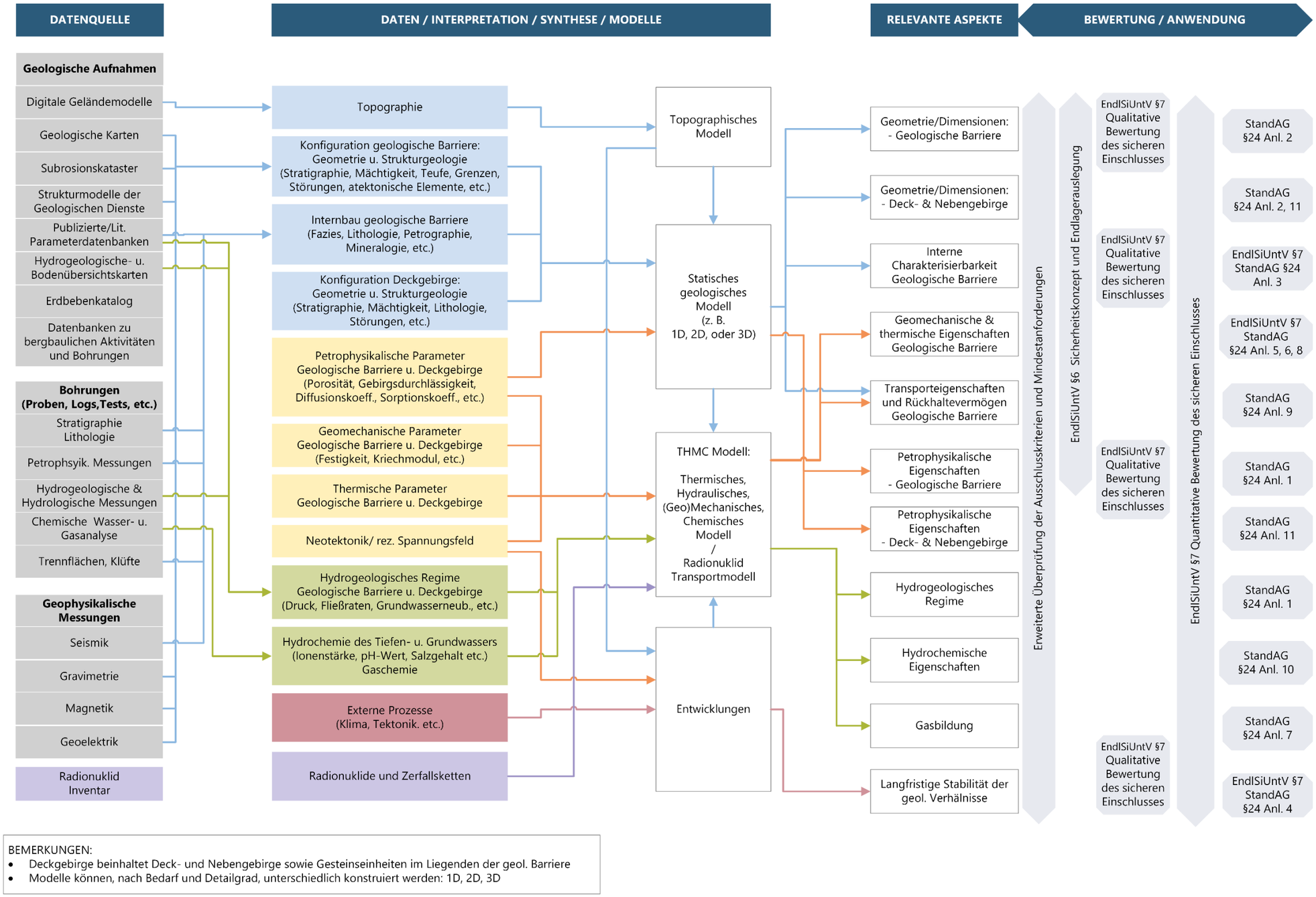


Abbildung 7: Datenflussdiagramm. Mit dem Begriff „geologische Barriere“ ist der Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion gemeint

1.3 Geogene Prozesse

Im Rahmen der Arbeiten zur Ermittlung der Standortregionen spielen geogene Prozesse und deren Auswirkungen auf das Endlagersystem an unterschiedlichen Stellen der rvSU eine Rolle. Ferner sind geogene Prozesse im Rahmen der Bewertung einzelner Kriterien des StandAG, z. B. Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen und geowissenschaftliche Abwägungskriterien (geoWK), relevant. Dabei finden die grundlegenden Arbeiten in der geowissenschaftlichen Langzeitprognose im Rahmen der Geosynthese statt (§ 5 EndlSiUntV), wohingegen die Bewertung der möglichen Auswirkungen auf das Endlagersystem in der Analyse des Endlagersystems (§ 7 EndlSiUntV) erfolgt. Darauf basierend oder im Rahmen dieser Arbeiten können auch bestimmte Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen und geowissenschaftliche Abwägungskriterien bewertet werden.

Die Grundlage dieser Arbeiten wird durch die **geowissenschaftliche Langzeitprognose** (siehe Kapitel 5.3) gelegt. In der geowissenschaftlichen Langzeitprognose wird für alle Untersuchungsräume der Kenntnisstand zu den geogenen Prozessen zusammengestellt.

Der Begriff „geogene Prozesse“ ist in den Geowissenschaften unüblich und ist bisher nicht für die Standortauswahl definiert. Er dient hier zur Abgrenzung zu den technogenen Prozessen, d. h. zu denjenigen Prozessen, die von den technischen Elementen im Endlagerbauwerk ausgehen oder zur Beschreibung ihrer Entwicklung im Allgemeinen notwendig sind (z. B. Korrosion)[4].

Geogene Prozesse umfassen exogene Prozesse (z. B. Erosion) und endogene Prozesse (z. B. Diagenese). Das Auftreten dieser Prozesse ist unabhängig von der Existenz des Endlagers und beschreibt die Entwicklung eines möglichen Endlagerstandorts ohne das Endlager selbst. Die geogenen Prozesse sind von besonderer Relevanz für die Standortauswahl, da sie nicht durch technische Maßnahmen verhindert oder beherrscht, sondern höchstens in ihrer Wirkung abgemildert werden können. Gleichzeitig können sie einen großen Einfluss auf die Langzeitsicherheit eines Endlagers haben.

Speziell in Phase I des Standortauswahlverfahrens ist die lokale Ausprägung der geogenen Prozesse ein wichtiges Entscheidungsmerkmal, um die Sicherheit verschiedener Standorte zu beurteilen und zu vergleichen. Die geowissenschaftliche Langzeitprognose beschreibt, ob und mit welcher Intensität diese Prozesse in der Vergangenheit aufgetreten sind und prognostiziert, ob die Prozesse auch im Nachweiszeitraum auftreten werden. Dabei werden mögliche Unterschiede in der Ausprägung oder Intensität der betrachteten Prozesse räumlich differenziert beschrieben. Eine Bewertung von geogenen Prozessen und ihre Auswirkung auf die Langzeitsicherheit findet grundsätzlich im Rahmen der rvSU statt.

[4] Die Begriffe „geogen“ und „technogen“ finden sich sonst nur im Text für die Wertungsgruppe „günstig“ für die bewertungsrelevante Eigenschaft „Veränderbarkeit der vorhandenen Gebirgsdurchlässigkeit“ zum Kriterium zur Bewertung zur Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten (Anlage 6 (zu § 24 Abs. 3) StandAG): „*Die Gebirgsformation/ der Gesteinstyp wird unmittelbar oder mittelbar anhand eines oder mehrerer Erfahrungsbereiche als gering durchlässig bis geologisch dicht identifiziert, auch unter geogener oder technogener Beanspruchung.*“

Anhand der geowissenschaftlichen Langzeitprognose werden für die möglichen Endlagersysteme in Tongestein, Steinsalz und kristallinem Wirtsgestein FEP-Kataloge erstellt (Kapitel 8.2), die zusätzlich zu den Prozessen aus der Langzeitprognose die relevanten Komponenten (z. B. das Wirtsgestein) des Endlagersystems enthalten. Darauf basierend werden die geogenen Prozesse bezüglich ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit und Auswirkung auf das Endlagersystem und den sicheren Einschluss bewertet. Dies kann bei ungünstiger Ausprägung dazu führen, dass Gebiete ein bestimmtes Ausschlusskriterium (z. B. Vulkanische Aktivität, Kapitel 0) erfüllen oder eine Mindestanforderung (z. B. Erhalt der Barrierewirkung, Kapitel 5.4.4) nicht gegeben ist.

Die Auseinandersetzung mit geogenen Prozessen erfolgt, obwohl es sich oftmals um die gleichen Prozesse handelt, an verschiedensten Stellen, welche durch das StandAG und die geltenden Verordnungen vorgegeben sind.

1.4 Berücksichtigung der Mindestanforderungen und Ausschlusskriterien

Die erneute Anwendung der Ausschussкriterien (§ 22 StandAG) und Mindestanforderungen (§ 23 StandAG) wird für die Ermittlung der Standortregionen nach § 14 StandAG nicht explizit erwähnt. Dennoch muss für die ermittelten Standortregionen abgeprüft werden, dass in Standortregionen für die übertägige Erkundung kein Ausschlusskriterium vorliegt und alle Mindestanforderungen erfüllt sind. Dementsprechend werden Flächen eines Untersuchungsraums die eine Mindestanforderung nicht erfüllen oder bei denen ein Ausschlusskriterium zutrifft, während der Bearbeitung der rvSU als für die Endlagerung ungeeignet identifiziert. Die Anwendung der Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen erfolgt zielgerichtet, d. h. angepasst an die Arbeitsschritte, die in den Untersuchungsräumen der rvSU sukzessiv durchgeführt werden.

Unabhängig davon wird die Anwendungsmethodik einzelner Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen weiterentwickelt, um sie an die schrittweise Erhöhung der Bearbeitungstiefe von Schritt 1 zu Schritt 2 der Phase I anzupassen. Dies kann bei der Anwendung zur weiteren Identifizierung von Gebieten führen, bei denen entweder ein Ausschlusskriterium zutrifft oder eine Mindestanforderung nicht erfüllt ist. Im Folgenden werden die weiterentwickelten Anwendungen sowie der zielgerichtete Ansatz für alle Ausschlusskriterien (Kapitel 1.4.2) und Mindestanforderungen (Kapitel 1.4.3) beschrieben und gezeigt, an welcher Stelle im Dokument hierzu weiterführende Informationen zu finden sind.

1.4.1 Zielgerichtete Anwendung der Mindestanforderungen und Ausschlusskriterien im Rahmen der rvSU

Die BGE hat im Schritt 1 der Phase I für das gesamte Bundesgebiet zunächst die Ausschlusskriterien nach § 22 StandAG und auf das verbleibende Gebiet die Mindestanforderungen nach § 23 StandAG angewendet. Im Schritt 2 ist zunächst keine systematische Prüfung der Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen bezüglich der gesamten Teilgebietsflächen aus Schritt 1 vorgesehen. Die Anwendung der einzelnen Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen erfolgt stattdessen zielgerichtet, d. h. abhängig von den lokalen geologischen Gegebenheiten und der aktuellen

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

Bearbeitungstiefe, die angepasst an die Arbeitsschritte der rvSU in einem Untersuchungsraum sukzessiv erhöht wird.

Neue Erkenntnisse, die innerhalb der Geosynthese gesammelt werden, können bereits am Anfang der rvSU berücksichtigt werden. Zum Beispiel im Rahmen der Überprüfung der Mindestanforderung „Mächtigkeit“, da so großflächig Gebiete identifiziert werden können, die ungeeignet und damit frühzeitig von der weiteren Bearbeitung ausgeschlossen sind (Kapitel 1.2). Für andere Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen ist eine Überprüfung und mögliche zielgerichtete Anwendung ggf. erst in späteren Arbeitsschritten von Bedeutung. So wird im Rahmen der rvSU das Endlagersystem analysiert und gemäß der in § 7 Abs. 6 Nr. 3 EndlSiUntV genannten Aspekte bewertet, wodurch eine im Vergleich zu Schritt 1 detailliertere Bearbeitung stattfindet. Daraus können neuere Erkenntnisse resultieren, die eine erneute Anwendung einzelner Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen erfordern. Zusätzlich ist eine detaillierte Bewertung von einzelnen Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen, die nur zum Ausschluss sehr kleiner Gebiete führt, nur sinnvoll, wenn sich dies auf die Bewertung des Endlagersystems als Ganzes in einem Gebiet auswirkt oder zur genauen Grenzziehung für Gebiete führt. Eine genaue Grenzziehung ist insbesondere dann zielführend, wenn hier besonders für die Endlagerung geeignete Gebiete betrachtet werden (insbesondere Gebiete, die im Ergebnis der rvSU in die erneute Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien gehen). Eine detaillierte Festlegung eines individuellen Sicherheitsabstandes um einzelne Bohrungen im Meterbereich ist beispielsweise zunächst nicht sinnvoll in Gebieten, die diese Ausschlussfläche um ein Vielfaches übersteigen. In solchen Fällen kann der Sicherheitsabstand auch nachträglich noch angepasst werden ohne dass dies die grundsätzliche Bewertung des Endlagersystems als Ganzes verändert. Auch Gebiete, die durch die fortschreitenden Arbeiten keine ausreichend großen und zusammenhängenden Flächen mehr beinhalten und damit die Mindestanforderung Fläche des Endlagers nach § 23 Abs. 4 StandAG nicht erfüllen, werden zielgerichtet geprüft.

1.4.2 Weiterentwickelte Anwendung der Ausschlusskriterien

Die Ausschlusskriterien sind in § 22 Abs. 2 Nr. 1 bis 6 StandAG definiert und umfassen Nr. 1) „großräumige Vertikalbewegungen“, Nr. 2) „aktive Störungszonen“, Nr. 3) „Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit“, Nr. 4) „seismische Aktivität“, Nr. 5) „vulkanische Aktivität“ und Nr. 6) „Grundwasseralter“. In Schritt 2 der Phase I wird zunächst für jedes Ausschlusskriterium geprüft, ob in den Teilgebieten neue Informationen vorliegen, die über den Kenntnisstand der im Zwischenbericht Teilgebiete (ZBTG) verwendeten Informationen hinausgehen. Weiterhin wird geprüft, ob eine weiterentwickelte Methodik zur Anwendung der Ausschlusskriterien sinnvoll erscheint oder ob neue Erkenntnisse zu erwarten sind. Hierbei ist zu bemerken, dass diese weiterentwickelte Anwendung des Ausschlusskriteriums sich lediglich vergrößernd auf ausgeschlossene Gebiete auswirkt. Eine Verkleinerung im Vergleich zu vorausgegangen Schritten im Standortauswahlverfahren findet nicht statt. Die daraus abgeleitete Einschätzung zur weiterentwickelten Anwendung der Ausschlusskriterien in Schritt 2 der Phase I ist in Tabelle 1 zusammengefasst. Die Begründungen für diese Einschätzung, die methodischen Weiterentwicklungen, Anwendungsbeispiele sowie geplanten Arbeiten zu allen Ausschlusskriterien werden detailliert in den weiterführenden Kapiteln gezeigt (Kapitel5).

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

Tabelle 1: Übersicht zur weiterentwickelten und zielgerichteten Anwendung der Ausschlusskriterien im Rahmen der rvSU

Ausschluss-kriterium	Weiterentwicklungen im Schritt 2 Phase I	Zielgerichtete Anwendung
Großräumige Vertikalbewegung	Großräumige Vertikalbewegungen von mehr als 1 000 m werden mit Bezug auf Jähne-Klingberg et al. (2019) im Nachweiszeitraum in Deutschland als nicht wahrscheinlich eingeschätzt. Im Schritt 2 der Phase I liegen für das Ausschlusskriterium „großräumige Vertikalbewegungen“ derzeit keine neuen Informationen vor und eine weiterentwickelte Anwendung wird basierend auf den Erkenntnissen aus Schritt 1 nach aktuellem Stand als nicht notwendig erachtet.	Findet voraussichtlich keine erweiterte Anwendung.
Aktive Störungszonen	Systematische Weiterentwicklung der Anwendungsmethode und eine zielgerichtete Einzelfallbetrachtung relevanter Störungsspuren, Identifikation weiterer Objekte und Erweiterung der Sicherheitsabstände.	Identifikation weiterer Objekte im UR. Einzelfallbetrachtungen finden zielgerichtet nur in besonders geeigneten Gebieten statt oder wenn sich eine Anwendung voraussichtlich negativ auf die Gesamtbewertung des Endlagersystems auswirkt (siehe Kapitel 5.5.1).
Einflüsse aus gegenwärtiger und früherer bergbaulicher Tätigkeit	Einzelfallbetrachtung relevanter Objekte und Erweiterung der Sicherheitsabstände.	Einzelfallbetrachtungen finden zielgerichtet nur in besonders geeigneten Gebieten statt oder wenn sich eine Anwendung voraussichtlich negativ auf die Gesamtbewertung des Endlagersystems auswirkt (siehe Kapitel 5.5.2).
Seismische Aktivität	Entfällt durch den statischen Verweis im StandAG an den Nationalen Anhang der (DIN EN 1998-1/NA:2011-01).	Findet voraussichtlich keine erweiterte Anwendung (siehe Kapitel 5.5.3).
Vulkanische Aktivität	Einzelfallbetrachtung von quartärem und tertiärem Vulkanismus in Anlehnung an den Bericht zur vulkanischer Gefährdung von Schreiber & Jentzsch (2021). Identifikation zusätzlicher Objekte, Erweiterung der Sicherheitsabstände.	Zielgerichtete Anwendung im Rahmen der Bearbeitung der geogenen Prozesse (siehe Kapitel 0).

Ausschluss-kriterium	Weiterentwicklungen im Schritt 2 Phase I	Zielgerichtete Anwendung
Grundwasseralter	Einzelfallbetrachtung relevanter Datenpunkte.	Da voraussichtlich keine Datenpunkte in relevanten Gebieten vorhanden sind ist es möglich, dass keine erweiterte Anwendung stattfindet (siehe Kapitel 5.5.5).

1.4.3 Weiterentwickelte Anwendung der Mindestanforderungen

Die Mindestanforderungen sind in § 23 Abs. 5 Nr. 1 bis 5 StandAG beschrieben: Nr. 1) „Gebirgsdurchlässigkeit“, Nr. 2) „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“, Nr. 3) „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“, Nr. 4) „Fläche des Endlagers“ und Nr. 5) „Erhalt der Barrierewirkung“. Zunächst wird für jede Mindestanforderung in Schritt 2 Phase I geprüft, ob eine Weiterentwicklung der Methode zur Anwendung mit einer Erhöhung des Detailgrades im Vergleich zu der Methode die für den Zwischenbericht Teilgebiete angewendet wurde, sinnvoll ist (Tabelle 2). Zusätzlich wird geprüft, ob Hinweise oder ggf. neue Informationen zu den Mindestanforderungen in den Teilgebieten vorliegen, die während der Bearbeitung in Schritt 2 berücksichtigt werden müssen.

Die Mindestanforderungen beziehen sich auf den einschlusswirksamen Gebirgsbereich. In Sicherheitskonzepten mit einschlusswirksamem Gebirgsbereich des Endlagersystems Typ 1 wird davon ausgegangen, dass der sichere Einschluss innerhalb der geologischen Barriere bzw. dem Wirtsgestein liegt. Für die praktische Anwendung der Mindestanforderungen bedeutet dies zunächst eine Identifizierung von Abfolgen, welche die Wirtsgesteinsdefinition und die Ansprüche an die Barrierewirkung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs voraussichtlich erfüllen, solange der einschlusswirksame Gebirgsbereich nicht festgelegt ist (Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion). Wie auch im Schritt 1 der Phase I geschehen, ist die Anwendung der Mindestanforderungen somit auch vor der Ausweisung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs möglich. Sollte im Rahmen der rvSU in § 7 Abs. 6 Nr. 3 Buchst. e) EndlSiUntV nachträglich nachgewiesen werden, dass die Möglichkeit zur Ausweisung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht besteht (z. B. durch Ausbreitungsrechnungen), so wird das Gebiet als ungeeignet für die Endlagerung identifiziert. Im Fall des Wirtsgesteins Kristallin kann gemäß § 23 Abs. 4 StandAG auch ein Sicherheitskonzept mit Endlagersystem Typ 2 in Betracht gezogen werden, wo der sichere Einschluss durch technische und geotechnische Barrieren sichergestellt wird. Der Umgang mit den vorläufigen Sicherheitskonzepten im kristallinen Wirtsgestein wird im rvSU-Konzept (BGE 2022a) Kapitel 8.3.1 „Umgang mit den vorläufigen Sicherheitskonzepten im kristallinen Wirtsgestein“, näher erläutert.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

Tabelle 2: Übersicht zur weiterentwickelten und zielgerichteten Anwendung der Mindestanforderungen im Rahmen der rvSU

Mindestanforderungen	Weiterentwicklungen im Schritt 2 Phase I	Zielgerichtete Anwendung
Gebirgsdurchlässigkeit	Keine Weiterentwicklung	Im Rahmen der Geosynthese gemäß § 5 EndlSiUntV; Beschreibung des Wirtsgesteinsbereichs mit Barrierefunktion. Sofern ortsspezifische Informationen zur Gebirgsdurchlässigkeit vorliegen werden diese geprüft.
Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs	Lithostratigraphischer Ansatz	Im Rahmen der Geosynthese gemäß § 5 EndlSiUntV; Beschreibung des Wirtsgesteinsbereichs mit Barrierefunktion (siehe Kapitel 5.4.1).
Minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs	Zusätzliche Berücksichtigung von exogenen Prozessen	Im Rahmen der Geosynthese gemäß § 5 EndlSiUntV (Kapitel 5.4.3) und Analyse des Endlagersystems § 7 EndlSiUntV; Beschreibung des Wirtsgesteinsbereichs mit Barrierefunktion (Kapitel 5.4.3) und Analyse relevanter geogener Prozesse (Kapitel 8.2).
Fläche des Endlagers	Ggf. Berücksichtigung der Ergebnisse aus der Bewertung des Flächenbedarfs (§ 7 EndlSiUntV)	Überprüfung nach Ausweisung der TUR und anhand der Bewertung des Flächenbedarfs in der Analyse des Endlagersystems § 7 EndlSiUntV. Erneute Prüfung sobald es anhand der Einordnung in Kategorie D oder C zu Flächenverkleinerung gekommen ist.
Erhalt der Barrierewirkung	Basiert auf den Ergebnissen der Analyse des Endlagersystems § 7 EndlSiUntV	Im Rahmen der Analyse des Endlagersystems § 7 EndlSiUntV (siehe Kapitel 8.2, 8.5).

2 Inventardaten hochradioaktiver Abfälle für die rvSU (§ 4 EndlSiUntV)

2.1 Zusammenstellung des Abfallinventars (§ 4 Abs. 2 EndlSiUntV)

Die hochradioaktiven Abfälle aus dem Betrieb der deutschen Kernkraftwerke sowie aus dem Betrieb der Forschungs-, Versuchs- und Prototypreaktoren und die Notwendigkeit, Mensch und Umwelt vor ionisierender Strahlung und den weiteren schädlichen Wirkungen dieser Abfälle zu schützen, bilden den Ausgangspunkt für das Standortauswahlverfahren (§ 1 Abs. 2StandAG). Die sichere Endlagerung dieser Abfälle in tiefen geologischen Formationen ist Gegenstand der Entwicklung von Endlager- und Sicherheitskonzepten, die in den vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen bewertet werden. Die Sicherheitsanforderungen an das Endlagersystem, die u. a. Grenzwerte für die Freisetzung von Massen und Stoffmengen aus dem Endlagerbereich (§ 4 EndlSiAnfV) und Kriterien für den Kritikalitätsausschluss (§ 8 EndlSiAnfV) definieren, stellen dabei die Grundlage der Konzeptentwicklung dar, und sind gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung auch Maßstab für die Bewertung der untersuchten Endlagersysteme.

Insgesamt wurden in Deutschland bis zum 31.12.2019 in Kernkraftwerken 15 777 t_{SM} an bestrahlten Brennelementen (BE) erzeugt und weitere ca. 190 t_{SM} in Forschungs-, Versuchs- und Prototypreaktoren (BMU 2020). Bis zum Ende der Kernenergieerzeugung in Deutschland wird eine weitere Masse von 1 009 t_{SM} an bestrahlten Brennelementen aus den Kernkraftwerken erwartet, womit abzüglich der in die Wiederaufarbeitung bzw. ins Ausland abgegebenen Abfallmengen (siehe Tabelle 3) insgesamt 10 113 t_{SM} an Brennelementen aus den Leistungsreaktoren (BMU 2020), ca. 10 bis 12 t_{SM} aus den Forschungs-, Versuchs- und Prototypreaktoren (BMU 2021b) und 3.864 Kokillen mit Abfällen aus der Wiederaufarbeitung (BMU 2021b, 2021a) endgelagert werden müssen.

Tabelle 3: Zum Stichtag 31.12.2019 erzeugte und endzulagernde Abfallmengen aus den Leistungs-, Versuchs- und Prototypreaktoren. Werte berechnet nach Angaben aus (BMU 2020).

Abfallmenge [t_{SM}]	… aus Leistungsreaktoren	… aus Versuchs- und Prototypreaktoren	Summe
… erzeugt	15 777	189,6	ca.15 967
… in die Wiederaufarbeitung gegeben	6 346	125,4	ca. 6 471
… exportiert	327	54,6	ca. 384
… endzulagern	**9 104**	**9,6**	**ca. 9 114**

Das endzulagernde Abfallinventar stammt dabei aus dem Betrieb von Kernreaktoren in Deutschland und aus der Wiederaufarbeitung von dabei entstandenen Abfällen. Es ist somit unabhängig von Endlagerkonzepten und Wirtsgesteinen.

Aus der Rückholung der in der Schachtanlage Asse II eingelagerten Abfallgebinde sowie, falls hier keine weitere Verwendung erfolgen sollte, aus den verbliebenen Abfällen aus der Urananreicherung fallen weitere Bestände schwach- und mittelaktiver Abfälle (SMA) an. Für die Endlagerung von SMA-Beständen, die nicht in das Endlager Konrad verbracht werden können, ist nach § 1 Abs. 6 StandAG eine Endlagerung am gleichen Standort wie dem des Endlagers für hochradioaktive Abfälle zulässig, „*wenn die gleiche bestmögliche Sicherheit wie bei der alleinigen Endlagerung hochradioaktiver Abfälle gewährleistet ist*“. Diese Möglichkeit ist nach § 7 Abs. 5 EndlSiUntV im Rahmen der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen ebenfalls zu beurteilen (vgl. Kapitel 8.9).

2.2 Inventardatenbedarf für die rvSU

Der unmittelbare Inventardatenbedarf für die rvSU ergibt sich aus den für die vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen nach § 6 EndlSiUntV zu entwickelnden vorläufigen Endlagerauslegungen und den zu erstellenden vorläufigen Sicherheitskonzepten, aus der in § 7 Abs. 6 EndlSiUntV geforderten Bewertung der thermischen Verhältnisse des Endlagersystems, dem Flächenbedarf des Endlagerbergwerkes und der Möglichkeit des sicheren Einschlusses der Radionuklide nach § 4 EndlSiAnfV. Hierzu sind gemäß § 4 Abs. 2 EndlSiUntV alle erforderlichen Informationen zu den endzulagernden Abfällen heranzuziehen.

Die radiologisch-thermischen Eigenschaften der Abfälle resultieren aus dem fortlaufenden radioaktiven Zerfall der in ihnen enthaltenen Radionuklide. Die Wärmeleistung der Abfälle und damit der Abfallgebinde ist Ausgangspunkt für die Berechnung der thermischen Verhältnisse, der Endlagerauslegung und des Flächenbedarfs. Die Freisetzungs- und Transportberechnungen zur Bewertung des sicheren Einschlusses hinsichtlich des Massen- und Stoffmengenaustrages aus dem Bereich der wesentlichen Barrieren gemäß § 4 EndlSiAnfV erfolgen zunächst anhand der in Larue et al. (2013) identifizierten und quantifizierten Leitnuklide. Die Ergebnisse werden mit den aus dem für die rvSU abgeleiteten Abfallinventar bestimmten Nuklidvektoren abgeglichen. Demgemäß umfassen die für die Sicherheitsuntersuchung benötigten Inventardaten insbesondere Informationen zu Art und Menge der endzulagernden Abfälle, zu deren Nuklidvektoren sowie den aus dem Nuklidvektor ableitbaren Größen der Wärmeleistung und der Aktivität.

2.2.1 Veröffentlichte Referenzen für Inventardaten

Informationen zu Art, Menge und eigenschaftsbestimmenden Kennwerten hochradioaktiver Abfälle in Deutschland sind mit variierender Detaillierung vorhanden. Zum Abfallmengengerüst (Art und Menge der Abfälle) veröffentlicht das als atomrechtliche Aufsicht agierende Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) in regelmäßigen Abständen ein *Verzeichnis radioaktiver Abfälle* sowie weitere Daten in den Überprüfungsberichten zum *Gemeinsamen Übereinkommen*. Weitere Informationen zu Abfällen aus Forschungsreaktoren sowie zu Nuklidvektoren und radiologisch-thermischen Eigenschaften der Abfälle sind in verschiedenen Forschungsberichten zu finden. Für das Abfallinventar der rvSU stehen die nachfolgend in den Kapiteln 2.2.1.1 bis 2.2.1.5 beschriebenen Quellen zur Verfügung.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

2.2.1.1 Verzeichnis radioaktiver Abfälle (seit 2014/15)

Als Grundlage des Nationalen Entsorgungsprogrammes (BMUB 2015a) und in Erfüllung der Richtlinie 2011/70/Euratom (Richtlinie 2011/70/EURATOM) wurde erstmals 2014 (BMUB 2013) und dann ab 2015 dreijährlich ein Verzeichnis radioaktiver Abfälle mit einem jeweils aktuellen Stand und einer Prognose für Art und Menge aller zu entsorgenden radioaktiven Abfälle veröffentlicht. Darin enthalten sind Angaben zu Art und Menge aller radioaktiven Abfälle, die bis zu einem jeweiligen Stichtag angefallen sind. Das jüngste veröffentlichte Verzeichnis von 2021 enthält Informationen zum gesamten Abfallinventar (einschließlich Prognosen) mit Stand vom 31.12.2019 (BMU 2021b).

2.2.1.2 Berichte zum Gemeinsamen Übereinkommen (seit 2001)

Als eines der ersten Länder trat Deutschland dem *Gemeinsamen Übereinkommen über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle* (eng. *Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management*) bei[5], einem internationalen Vertragswerk unter der Ägide der Internationalen Atomenergie-Organisation (IAEO) mit dem Ziel der Etablierung weltweiter Qualitäts- und Sicherheitsstandards in der nuklearen Entsorgung. Im Rahmen des Vertragswerkes verpflichten sich die Mitgliedsstaaten dazu, zu den dreijährlichen Überprüfungskonferenzen ausführliche Berichte vorzulegen, die die organisatorischen, regulatorischen und institutionellen Rahmenbedingungen der nationalen Entsorgungsprogramme offenlegen. Daher finden sich im Kapitel D der Berichte auch ausführliche Informationen zum Abfallinventar (Art und Menge der Abfälle). Im derzeit jüngsten Bericht zur 7. Überprüfungskonferenz wird der Stand zum 31.12.2019 dargestellt (BMU 2020).

2.2.1.3 Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben (VSG, 2010 bis 2013)

Für die *Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben* (VSG) wurden 2010 bis 2013 die im Erkundungsbergwerk Gorleben gewonnenen Kenntnisse zusammengefasst und ein dazu entwickeltes Endlager- und Sicherheitskonzept untersucht. Dafür wurde auch ein Abfallmengengerüst erarbeitet (Peiffer et al. 2012b) und nach dem Beschluss zum Ausstieg aus der Kernenergienutzung 2011 nochmals angepasst (Peiffer et al. 2012a). Aufgrund der zusammengestellten Inventardaten zu hochradioaktiven Abfällen aus Leistungsreaktoren, Forschungs-, Versuchs- und Prototypreaktoren sowie aus der Wiederaufarbeitung wurden exemplarisch Nuklidvektoren und daraus resultierende Aktivitäten und Wärmeleistungen für mehrere Zeitpunkte über den gesamten Nachweiszeitraum von einer Million Jahren berechnet. Unter Verwendung der damals für das Endlagerkonzept am Erkundungsstandort Gorleben entwickelten Endlagerbehälterkonzepte wurden schließlich Betriebsabläufe analysiert und eine generische Sicherheitsanalyse durchgeführt.

[5] Der Status ist einzusehen unter: https://www-legacy.iaea.org/Publications/Documents/Conventions/jointconv_status.pdf

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

2.2.1.4 Forschungsvorhaben LABRADOR (2011)

Um den aktuellen Kenntnisstand zu vorhandenen und endzulagernden Abfällen aus den Forschungs-, Versuchs- und Prototypreaktoren zu ermitteln und zusammenzufassen, wurde das Forschungsvorhaben „*Status quo der Lagerung ausgedienter Brennelemente aus stillgelegten/rückgebauten deutschen Forschungsreaktoren und Strategie (Lösungsansatz) zu deren künftigen Behandlung/Lagerung (LABRADOR)*“ durchgeführt (Dörr et al. 2011). Im Ergebnis steht eine Gesamtdarstellung der zu entsorgenden Brennstäbe (BSt) und Brennelemente aus diesen Reaktoren, ihrer äußeren Abmessungen, und einer Abschätzung der vorhandenen bzw. zu erwartenden Massenströme.

2.2.1.5 Forschungsvorhaben RESUS (2020)

Nach dem Neustart des Standortauswahlverfahrens 2013 und der Etablierung des im StandAG verankerten Verfahrens wurde das Forschungsvorhaben „*Grundlagenentwicklung für repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen und zur sicherheitsgerichteten Abwägung von Teilgebieten mit besonders günstigen geologischen Voraussetzungen für die sichere Endlagerung hochradioaktiver Abfälle*“ (RESUS) durchgeführt, um die Bedeutung der Abwägungskriterien für die Langzeitsicherheitsanalyse für verschiedene Endlagerkonzepte in generischen potenziellen Wirtsgesteinsformationen zu betrachten. Für die Erarbeitung des jeweiligen Sicherheitskonzeptes wurde auch hier ein Abfallinventar erstellt, das Inventardaten aus der VSG (Peiffer et al. 2012a), aus dem Forschungsvorhaben LABRADOR (Dörr et al. 2011), aus dem Nationalen Entsorgungsprogramm von 2015 (BMUB 2015a) und aus dem Bericht zur 6. Überprüfungskonferenz zum Gemeinsamen Übereinkommen (BMUB 2018) (siehe auch Kapitel 2.2.1.2) kombiniert. Die Ergebnisse sind u. a. in Bertrams et al. (2020b) veröffentlicht worden.

2.2.2 Für die rvSU zusammengestellte Inventardaten

Aus den vorliegenden Informationen lassen sich Inventardaten für die rvSU ableiten. Dabei stehen entsprechend den in Kapitel 2.2 dargelegten für die rvSU relevanten Inventardaten jeweils Menge, Art und Eigenschaften aufgrund des radioaktiven Zerfalls im Mittelpunkt.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

Grundsätzlich lassen sich die vorhandenen Abfälle in drei Gruppen einteilen:

- Die Brennelemente aus den Leistungsreaktoren bilden die größte Gruppe im Abfallinventar. Die Brennelemente enthalten nach der Entladung aus dem Reaktor hunderte verschiedene Radioisotope, die entlang charakteristischer Zerfallsreihen zerfallen und über lange Zeiträume ionisierende Strahlung und Wärme aussenden. Die Brennelemente können nach unterschiedlichen Bautypen für Druckwasserreaktoren (DWR), Druckwasserreaktoren sowjetisch/russischer Bauart (WWER) und Siedewasserreaktoren (SWR) unterteilt werden; im Rahmen der rvSU jedoch ist es ausreichend, sie als eine Gruppe zu betrachten. Hier stehen die Wärmeleistungen der Brennelemente bzw. der Behälter im Vordergrund sowie der für die Bewertung des Massen- und Stoffmengenaustrags wesentliche Nuklidvektor, der sich primär aus Anfangsanreicherung bzw. -zusammensetzung, Abbrand und Abklingzeit der Brennelemente ermitteln lässt. Dementsprechend müssen diese drei Größen für die Brennelemente aus den Daten ermittelt werden.
- Die Abfälle aus der Wiederaufarbeitung bestehen aus Kokillen mit verglasten Spaltproduktlösungen aus den Wiederaufarbeitungsanlagen in Frankreich und Großbritannien, und aus der ehemaligen Wiederaufarbeitungsanlage Karlsruhe (WAK). In den verfügbaren Quellen kommen regulär noch Kokillen mit verpressten Metallstrukturteilen und Kokillen mit verglasten Dekontaminations-, Prozess- und Spüllösungen hinzu, die nach dem neuesten Stand nicht mehr Teil des Abfallinventars sind (vgl. Kapitel 2.2.2.2). Die Zusammensetzung dieser Abfälle richtet sich nach den Nuklidvektoren der prozessierten Brennelemente sowie nach den Betriebsparametern der Wiederaufarbeitungsanlage und denen der Verglasungseinrichtung. Die Ermittlung oder Abschätzung der Zusammensetzung ist daher schwieriger zu ermitteln als die der Brennelemente.
- Die Abfälle aus den Forschungs-, Versuchs- und Prototypreaktoren sind eine hochdiversitäre Gruppe verschiedener Brennstäbe und Brennelemente mit unterschiedlichen Formen, Abmessungen, chemischen und Isotopenzusammensetzungen. Diese Abfallgruppe umfasst Brennstäbe aus dem Nuklearschiff „Otto Hahn“ ebenso wie ursprünglich auf ca. 93 % angereicherte Brennstäbe aus dem Forschungsreaktor München II (FRM II) mit einer Beschichtung aus einer Uransilizid-Aluminium-Matrix (Dörr et al. 2011). Dementsprechend vielseitig sind die für die Zwischenlagerung und für eine spätere Endlagerung zu beachtenden chemischen und radiologischen Besonderheiten.

Die in den verfügbaren Referenzen (siehe Kapitel 2.2.1) für diese drei Abfallgruppen wesentlichen Informationen werden im Folgenden zusammengestellt.

2.2.2.1 Brennelemente aus den Leistungsreaktoren

Die endzulagernden Brennelemente aus den Leistungsreaktoren können entsprechend den in Deutschland gebauten Typen von Leistungsreaktoren in DWR-Brennelemente, SWR-Brennelemente und WWER-Brennelemente unterschieden werden. DWR-Brennelemente sind allgemein länglich-quaderförmig mit quadratischer Grundfläche, einer Länge von bis zu ca. 5 m und enthalten

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

bis zu ca. einer halben Tonne Schwermetall. SWR-Brennelemente und WWER-Brennelemente sind allgemein kleiner und leichter.

Der größte Teil dieser Abfallgruppe besteht aus DWR-Brennelementen, gefolgt von den zahlreicheren aber leichteren SWR-Brennelementen sowie den WWER-Brennelementen aus den beiden Kernkraftwerken der ehemaligen DDR. Eine Auflistung der für die VSG zusammengestellten Gesamtprognose endzulagernder Brennelemente aus den Leistungsreaktoren (Peiffer et al. 2012a) sowie des Ist-Standes zum 31.12.2019 (BMU 2021b) ist in Tabelle 4 gegeben.

Tabelle 4: Anzahl und Schwermetallmasse der endzulagernden Brennelementen (BE) aus den Leistungsreaktoren: Gesamtprognose nach VSG und Ist-Stand zum 31.12.2019

BE-Typ		Gesamtprognose VSG (Peiffer et al. 2012a)	Stand 31.12.2019 (BMU 2021b)
DWR-BE	Anzahl	13 980	12 015
	Masse [t_{SM}]	7 180	6 005
SWR-BE	Anzahl	15 600	14 892
	Masse [t_{SM}]	2 685	2 514
WWER-BE	Anzahl	5 050	5 048
	Masse [t_{SM}]	580	583
Gesamt	**Anzahl**	**34 630**	**31 995**
	Masse [t_{SM}]	**10 445**	**9 104**

Der Stand der bis zum 31.12.2019 in den Lagerbecken und in Transport- und (Zwischen-)Lagerbehältern (TLB) eingelagerten Brennelemente liegt demnach um ca. 2.600 Brennelemente und 1.300 t_{SM} unter dem in der VSG prognostizierten Gesamtinventar für die Endlagerung. In den verfügbaren Quellen gibt es neben der VSG keine Brennelemente-typengenaue Gesamtprognose des insgesamt anfallenden Inventars an bestrahlten Brennelementen aus den Leistungsreaktoren. Für die Gesamtmenge an endzulagernden Brennelementen gibt das zuständige BMUV eine Prognose von 10.113 t_{SM} (BMU 2020) an, was einer Reduzierung des in der VSG abgeschätzten Mengengerüstes um 332 t_{SM} entspricht. Damit kann das VSG-Mengengerüst als abdeckend hinsichtlich der Gesamtmasse endzulagernder Brennelemente aus den Leistungsreaktoren bezeichnet werden.

Im Abfallmengengerüst der VSG wurden auch Nuklidvektoren für die endzulagernden Brennelemente errechnet, aus denen die Wärmeleistung und die (Gesamt-)Aktivität der Brennelemente abgeschätzt wurde (Peiffer et al. 2012a). Die unterschiedlichen Abklingzeiten der Brennelemente wurden durch eine auf jeweils fünf Jahre genaue Aufteilung der Entladezeiten des zusammengestellten Brennelementinventars realisiert. Allerdings wurden nur jeweils ein Datenpunkt für ein DWR-Brennelement aus Uranoxid, ein DWR-Brennelement aus Uran-Plutonium-Mischoxid (MOX), ein

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

SWR-Brennelement aus Uranoxid, ein SWR-Brennelement aus MOX und zwei WWER-Brennelemente berechnet. Axialprofile der Brennstäbe sowie Radialprofile der Brennstäbe innerhalb eines Brennelements wurden hierbei nicht berücksichtigt. Die Berechnungsergebnisse sind für den größten Teil der deutschen Brennelemente abdeckend, allerdings ist aus lediglich sechs Datenpunkten keine Aussage möglich, wie weit die ermittelten Nuklidvektoren von der realen Verteilung in den endzulagernden Brennelementen abweichen. Die Überschätzung des Abbrandes beim größten Teil des vorhandenen Brennelementinventars bedeutet gleichzeitig eine Unterschätzung der Kritikalitätssicherheit dieses Inventars, wenn die ermittelten Nuklidvektoren allgemein angewendet werden. Im Forschungsvorhaben RESUS wurden die Angaben aus dem VSG-Mengengerüst direkt verwendet, um Wärmeleistung, Aktivität und ausgewählte Nuklide zum Jahr 2075 zu berechnen (Bertrams et al. 2020b).

2.2.2.2 Abfälle aus der Wiederaufarbeitung

In einigen Ländern wurden oder werden bestrahlte Brennelemente wiederaufgearbeitet, um darin enthaltene Kernbrennstoffe (allgemein Uran und Plutonium) wiederzuverwerten. Die aus dem zurückgewonnenen Kernbrennstoff gefertigten MOX-Brennelemente haben eine allgemein höhere spezifische Aktivität und Wärmeleistung als Brennelemente aus Uran(IV)-oxid und müssen auch vor dem Reaktoreinsatz entsprechend gehandhabt werden.

Die während der Wiederaufarbeitung anfallenden und in Edelstahlkokillen konditionierten Abfälle müssen von den Erzeugerstaaten wieder zurückgenommen und dort sicher gelagert werden. Neben verpressten Metallstrukturteilen (CSD-C) und verglasten Prozess-, Dekontaminations- und Spüllösungen (CSD-B) als mittelaktiven und vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfällen fallen auch hochradioaktive, stark wärmeentwickelnde Abfälle in Form von verglasten Spaltproduktlösungen an. Diese werden je nach ihrer Herkunft aus der Wiederaufarbeitung in Frankreich (CSD-V), Großbritannien (UK-HAW) oder Deutschland (WAK) gekennzeichnet; für die VSG wurden diese drei Gruppen unter der Bezeichnung „CSD-V“ zusammengefasst (siehe Tabelle 5). Die äußeren Abmessungen der britischen und französischen Kokillen sind identisch (Patel et al. 2012).

Die Wiederaufarbeitung von Brennelementen und der Export von Kernbrennstoffen zur Wiederaufarbeitung im Ausland wurden zum 01.07.2005 endgültig eingestellt (§ 9a Abs. 1 Atomgesetz (AtG)). Somit stand das endzulagernde Abfallmengengerüst auch für die ab 2010 erstellte VSG bereits fest (Peiffer et al. 2012a). Neben einer Reduktion der zurückzuführenden CSD-B-Kokillen von 308 auf 140 bereits im *Verzeichnis radioaktiver Abfälle mit Stand zum 31.12.2013 (BMUB 2013)* wurde zuletzt am 09.06.2021 die Substitution der zurückzuführenden mittelaktiven CSD-B-Kokillen und CSD-C-Kokillen durch 3 bis 5 TLB mit jeweils bis zu 28 hochradioaktiven CSD-V-Kokillen bekanntgegeben (BMU 2021a). Damit sind nach aktuellem Stand bis zu 3 864 Kokillen mit hochradioaktiven und stark wärmeentwickelnden Abfällen aus der Wiederaufarbeitung endzulagern (siehe Tabelle 5).

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

Tabelle 5: Endzulagernde Kokillen mit Abfällen aus der Wiederaufarbeitung nach VSG und aktueller Stand

Kokillentyp	VSG (Peiffer et al. 2012a)	Aktueller Stand (BMU 2021b, 2021a)
CSD-V	3 735	bis zu 3 164
UK-HAW		560
WAK		140
CSD-B	308	--
CSD-C	4 104	--

Für die VSG wurde analog zu den damals prognostizierten Brennelementen aus den Leistungsreaktoren eine Altersstruktur für die aufgeführten drei Kokillentypen angegeben (Peiffer et al. 2012a); typische Zusammensetzungen samt Bandbreite hinsichtlich bestimmter Leitnuklide können aus einem ergänzenden Bericht ebenfalls ermittelt werden (Meleshyn & Noseck 2012). Allerdings sind hier die mit der Substitution der zurückzuführenden CSD-C-Kokillen hinzukommenden bis zu 140 CSD-V-Kokillen (BMU 2021a) nicht enthalten. Für jeweils eine als repräsentativ angenommene Kokille des Typs CSD-V, CSD-B und CSD-C wurden unter Annahmen für die wiederaufgearbeiteten Brennelemente und die Betriebsparameter der Wiederaufarbeitungsanlage Nuklidvektoren ermittelt oder berechnet (Peiffer et al. 2012a). Auch im Forschungsvorhaben RESUS wurden auf Grundlage der VSG-Daten die Aktivitäten einzelner Nuklide und des Gesamtinventars berechnet (Bertrams et al. 2020b). Hinsichtlich des aktualisierten Abfallmengengerüstes (siehe Tabelle 5) sind diese Angaben und Berechnungen zu prüfen.

2.2.2.3 Abfälle aus den Forschungs-, Versuchs- und Prototypreaktoren

In Deutschland gab es acht Versuchs- und Prototypreaktoren, die sich derzeit in Stilllegung befinden oder bereits vollständig abgebaut worden sind. Die hochradioaktiven Abfälle aus diesen Anlagen, Brennelemente und Brennstäbe, umfassen eine Schwermetallmasse von etwa 190 t_{SM}, von denen der größte Teil bereits entsorgt worden ist (siehe Tabelle 3). Aus dieser Abfallgruppe sind noch etwa 9,6 t_{SM} endzulagern (BMU 2020). Hinzu kommen Brennelemente aus sechs im Betrieb befindlichen Forschungs- und Unterrichtsreaktoren mit einem Gesamtaufkommen von weniger als 1 t_{SM} mit Stand zum 31.12.2019 (BMU 2020). In Tabelle 6 ist eine Übersicht zu Art und Menge der mit Stand zum 31.12.2019 angefallenen und endzulagernden Brennstäbe und Brennelemente aus den Forschungs-, Versuchs- und Prototypreaktoren gegeben (BMU 2021b).

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

Tabelle 6: Endzulagernde hochradioaktive Abfälle aus den Forschungs-, Versuchs- und Prototypreaktoren und Verbleib. Ist-Stand zum 31.12.2019, aus (BMU 2021b).

Anlage	Menge und Art	Lagerung	Standort
AVR	288 161 BE	152 CASTOR THTR/AVR	JEN, Jülich
	173 BE	Kugelbruch im Reaktorbehälter	
THTR-300	2 198 BE	Kugelbruch im Reaktorbehälter	THTR Hamm-Uentrop
	617 606 BE	305 CASTOR THTR/AVR	Brennelemente-Zwischenlager Ahaus
RFR	951 BE	18 CASTOR MTR2	Brennelemente-Zwischenlager Ahaus
KNK II	2 413 BSt.	4 CASTOR KNK	Zwischenlager Nord, EWN
KfK	71 BSt.		
Nuklearschiff „Otto Hahn“	52 BSt.		
FRM II	46 BE 2 Konverterplatten	Lagerbecken	TU München
BER II	66 BE	Lagerbecken	Helmholtz-Zentrum Berlin
FRMZ	82 BE	Lagerbecken	Universität Mainz

Für die bislang in den Brennelemente-Lagerbecken an den jeweiligen Standorten zwischengelagerten Brennelemente des Berliner Experimentier-Reaktors II (BER II), des Forschungsreaktors Mainz (FRMZ) und des Forschungsreaktors München II (FRM II) ist zu gegebenem Zeitpunkt eine Konditionierung in Transport- und Lagerbehälter des Typs CASTOR MTR3 vorgesehen (Peiffer et al. 2012a; Dörr et al. 2011).

Zu den Abfällen aus den Forschungs-, Versuchs- und Prototypreaktoren gibt es weniger detaillierte Informationen als zu den Abfällen aus den Leistungsreaktoren. Zwar sind Aussagen zu Art und Menge der Abfallformen (siehe Tabelle 6) sowie verschiedenen Bauformen (Dörr et al. 2011) möglich, aber Nuklidvektoren sind nicht für alle Abfälle dieser Gruppe berechnet worden, nur für vergleichsweise wenige Zeitpunkte und jeweils nur für einen als repräsentativ angenommenen Brennstoff (Peiffer et al. 2012a). Aus diesen Angaben wurden im Forschungsvorhaben RESUS für ausgewählte Radionuklide die Aktivitäten zum Bezugszeitpunkt 2075 ermittelt (Bertrams et al. 2020b).

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

Weiterhin gibt es für die Abfälle aus den noch in Betrieb befindlichen Forschungsreaktoren FRM II und FRMZ keine Gesamtprognose für die endzulagernden Abfallmengen; auch hier gibt es Unterschiede zwischen verschiedenen Prognosen (Peiffer et al. 2012a; Dörr et al. 2011). Für das Forschungsvorhaben RESUS wurden Werte verschiedener Quellen zusammengefasst (Bertrams et al. 2020b), aus denen die Prognose für diese beiden Reaktoren übernommen werden kann.

Allgemein zeichnet sich das gegenüber den anderen beiden Abfallkategorien geringere Abfallaufkommen aus den Forschungs-, Versuchs- und Prototypreaktoren durch eine vergleichsweise hohe Aktivität und eine sehr niedrige Wärmeleistung aus (Bertrams et al. 2020b; Dörr et al. 2011). Die Unterschiede in der chemischen und Isotopenzusammensetzung dieser Abfälle müssen im Sicherheitskonzept berücksichtigt werden.

2.2.3 Diskussion der Inventardaten

Grundsätzlich sind Informationen zu allen zu berücksichtigenden Abfallgruppen vorhanden, wenn auch in unterschiedlicher Genauigkeit, Vollständigkeit und Aktualität. Die für die rvSU benötigten Inventardaten zu Art, Menge und radiologisch-thermischen Eigenschaften, bestimmt durch den Nuklidvektor, können gleichermaßen aus den verfügbaren Referenzen zusammengetragen werden (siehe Tabelle 7). Dabei sind jedoch an einigen Stellen Annahmen oder Vereinfachungen zu treffen.

Tabelle 7: Stand der für die rvSU verfügbaren Inventardaten

Information	BE aus den Leistungsreaktoren	Abfälle aus der Wiederaufarbeitung	Abfälle aus den Forschungs-, Versuchs- und Prototypreaktoren
Art und Menge	Abdeckend (Peiffer et al. 2012a)	Vorhanden (BMU 2021b, 2021a)	Ist-Stand (BMU 2021b) und Abschätzung (Bertrams et al. 2020b; Dörr et al. 2011)
Abklingzeiten	Abschätzung (Peiffer et al. 2012a)	Vorhanden, mit Ausnahmen (BMU 2021a)	Nicht bekannt
Anreicherung bzw. Zusammensetzung	Exemplarisch (Peiffer et al. 2012a)	Exemplarisch (Peiffer et al. 2012a)	Teilweise (Dörr et al. 2011)
Abbrand	Exemplarisch (Peiffer et al. 2012a)	Nicht bekannt	Nicht bekannt
Nuklidvektor	Exemplarisch (Peiffer et al. 2012a)	Exemplarisch (Peiffer et al. 2012a)	Teilweise (Peiffer et al. 2012a)

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

In den folgenden Kapiteln wird für jede der drei zu berücksichtigenden Abfallklassen dargestellt, wie die für die rvSU benötigten Inventardaten aus den verfügbaren Quellen zusammengetragen werden können. Dabei wird auch auf das im Forschungsvorhaben RESUS mit dem Ziel der Grundlagenentwicklung für die rvSU zusammengestellte Abfallinventar (Bertrams et al. 2020b) Bezug genommen, das aufgrund der teilweise übereinstimmenden Grundannahmen an mehreren Punkten direkt für die rvSU genutzt werden kann.

2.2.3.1 Inventardaten zu Brennelementen aus den Leistungsreaktoren

Für die Brennelemente aus den Leistungsreaktoren stehen der rvSU als Mengengerüst die Daten aus der VSG (Peiffer et al. 2012a) zur Verfügung, die gegenüber dem massenbezogen etwas kleineren zu erwartenden realen Inventar als abdeckend gelten können. Ohne eine aktuellere Referenz zur Altersstruktur der Brennelemente findet hier ebenfalls die Abschätzung aus der VSG Verwendung. Die zur Berechnung des Nuklidvektors und der radiologisch-thermischen Eigenschaften der Brennelemente wesentlichen Größen Anfangszusammensetzung und Abbrand sind in der VSG nur exemplarisch für sechs Kombinationen gegeben, die zumindest für den größten Teil des Brennelementinventars abdeckend im Sinne der Sicherheitsuntersuchung sind.

Da die Berechnung des Mengengerüstes und des Nuklidvektors für diese Abfallkategorie demnach den gleichen Annahmen folgt wie im Forschungsvorhaben RESUS (Bertrams et al. 2020b), kann hier eine direkte Übertragbarkeit der dort gewonnenen Ergebnisse angenommen werden, gegebenenfalls nach detaillierteren Neuberechnungen für relevante Zeitpunkte auf Basis der VSG-Daten.

Für künftige Betrachtungen und die nachfolgenden vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen nach §§ 16 und 18 StandAG sind weitere Informationen zu Art, Menge und Altersstruktur der endzulagernden Brennelemente notwendig. Essentiell ist die Berechnung weiterer Datenpunkte im Anreicherung-Abbrand-Spektrum der in Deutschland anfallenden bestrahlten Brennelemente, um das Nuklidinventar sowohl der Endlagergebinde als auch des gesamten Abfallinventars mit größerer Verlässlichkeit abzubilden.

2.2.3.2 Inventardaten zu Abfällen aus der Wiederaufarbeitung

Art und Menge der endzulagernden Abfälle aus der Wiederaufarbeitung sind aus Veröffentlichungen des zuständigen BMUV (BMU 2021b, 2021a) vollständig bekannt. Exemplarische Nuklidvektoren für jeweils eine Kokille des Typs CSD-V, CSD-B und CSD-C wurden im Rahmen der VSG berechnet (Peiffer et al. 2012a). Die Abklingzeiten der Kokillen sind für die im deutschen Abfallinventar vertretenen Kokillen des Typs CSD-V auf 5 Jahre genau im VSG-Mengengerüst (Peiffer et al. 2012a) gegeben. Ausgenommen hiervon sind lediglich die im Juni 2021 neu hinzugekommenen bis zu 140 CSD-V-Kokillen, die die ursprünglich zurückzuführenden 4.104 CSD-C-Kokillen und 140 CSD-B-Kokillen ersetzen (BMU 2021a). Für diese Kokillen müssen plausible Annahmen zur Abklingzeit getroffen werden.

Die im Forschungsvorhaben RESUS berechneten Nuklidinventare beziehen sich auf die im VSG-Mengengerüst beschriebene Anzahl der unterschiedlichen Kokillentypen. Nuklidvektoren und Altersstruktur wurden ebenfalls aus der VSG entnommen. Für die die CSD-V-Kokillen betreffenden

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

Ergebnisse müssen nachberechnete Beiträge der neu hinzukommenden bis zu 140 Kokillen addiert werden.

Auch für die Abfälle aus der Wiederaufarbeitung gilt, dass eine Neuberechnung von Werten anhand des aktuellen Mengengerüstes, unter Verwendung der exemplarischen Nuklidvektoren aus dem VSG-Mengengerüst zu für die rvSU verwendbaren Ergebnissen führt.

Für die weiteren vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen und zukünftige Betrachtungen sind weitere Informationen zum Nuklidinventar der einzelnen Kokillen wünschenswert, um die möglichen und teilweise dokumentierten (Meleshyn & Noseck 2012) Bandbreiten in deren Nuklidvektoren genauer abzubilden. Auch die Abklingzeiten der neu hinzukommenden bis zu 140 CSD-V-Kokillen müssen ermittelt werden.

2.2.3.3 Inventardaten zu Abfällen aus den Forschungs-, Versuchs- und Prototypreaktoren

Zu den vorhandenen Abfällen aus den Forschungs-, Versuchs- und Prototypreaktoren gibt es genaue Angaben im Verzeichnis radioaktiver Abfälle (BMU 2021b). Darüber hinausgehende Abfallprognosen für die noch in Betrieb befindlichen Forschungsreaktoren FRM II und FRMZ finden sich im VSG-Mengengerüst (Peiffer et al. 2012a) und im LABRADOR-Bericht (Dörr et al. 2011). Das Forschungsvorhaben RESUS (Bertrams et al. 2020b) kombiniert diese Bestände zu einem einheitlichen Inventar. Die für RESUS aus den Forschungsvorhaben KOSINA (Bertrams et al. 2015) und LABRADOR entnommenen Angaben für die in den Veröffentlichungen des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) nicht detailliert aufgeführten Gesamtprognosen für die Abfälle aus den Forschungsreaktoren FRM II und FRMZ werden als abdeckend angenommen, müssen aber durch aktuelle Informationen der Betreiber aktualisiert werden. Die in LABRADOR und in der VSG angegebene Anzahl von 2 484 Brennstäben der Kompakten Natriumgekühlten Kernreaktoranlage Karlsruhe (KNK) II (Dörr et al. 2011) wird im Verzeichnis radioaktiver Abfälle in 2413 Brennstäbe der KNK II und 71 Brennstäbe aus Nuklearexperimenten am Kernforschungszentrum Karlsruhe (KfK) unterteilt (BMU 2021b). Im Forschungsvorhaben RESUS wurden die 2413 Brennstäbe der KNK II mit aufgelistet, jedoch die 71 KNK-Brennstäbe nicht aufgeführt (Bertrams et al. 2020b). Die Angaben aus dem Verzeichnis radioaktiver Abfälle des BMU sind hier maßgebend.

Mit den teilweise im VSG-Mengengerüst berechneten Nuklidvektoren für exemplarische Brennelemente aus einigen Forschungs-, Versuchs- und Prototypreaktoren (Peiffer et al. 2012a) kann für die Abfälle aus den Anlagen BER II, FRM II und KNK II eine Abschätzung der aus dieser Abfallgruppe beigetragenen Radionuklide erfolgen. Da das Mengengerüst für den Hochtemperaturreaktor der Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor Jülich (AVR) und den Thorium-Hochtemperaturreaktor (THTR)-300 in der Zusammenstellung des Forschungsvorhabens RESUS von den übrigen Forschungsreaktor-Brennelementen getrennt aufgeführt worden ist, kann dieser Nuklidvektor für die rvSU direkt verwendet (Bertrams et al. 2020b) bzw. aus den zugrundeliegenden Angaben (Peiffer et al. 2012a) für relevante Zeitpunkte detaillierter neu berechnet werden.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

Für die Berücksichtigung der Abfälle aus den Forschungs-, Versuchs- und Prototypreaktoren in den zukünftigen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen sind grundlegende Informationen zu aktualisieren und zu überprüfen (Art und Menge teilweise, Nuklidvektoren umfassend) bzw. überhaupt zu beschaffen (insbesondere Abbrände bzw. Neutronenfluenzen, Abklingzeiten, Nuklidvektoren).

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

3 Ausweisung von Untersuchungsräumen (§ 3 EndlSiUntV)

Basierend auf den im Zwischenbericht Teilgebiete ausgewiesenen Teilgebieten (BGE 2020g), sind zu Beginn der rvSU in Phase I, Schritt 2 des Verfahrens (vgl. § 14 StandAG) gemäß den Vorgaben von § 3 EndlSiUntV sogenannte „Untersuchungsräume“ auszuweisen. Diese bezeichnen „diejenigen räumlichen Bereiche, die zur Bewertung als möglicher Endlagerstandort vorgesehen sind“ (§ 3 Abs. 1 EndlSiUntV) und stellen die Grundlage der weiteren Arbeitsschritte der rvSU dar. Entsprechend § 3 EndlSiUntV müssen:

1. in jedem nach § 13 StandAG ermittelten Teilgebiet mindestens ein Untersuchungsraum ausgewiesen werden,
2. bei mehreren vorläufigen Sicherheitskonzepten (vgl. § 6 EndlSiUntV) in einem Wirtsgestein je ein Untersuchungsraum ausgewiesen werden und
3. die Untersuchungsräume zusammen alle Teilgebiete räumlich vollständig abdecken.

Gemäß § 3 EndlSiUntV ist je ausgewiesenem Untersuchungsraum nur eine rvSU durchzuführen und ein vorläufiges Sicherheitskonzept zu beschreiben. Die Ausweisung von Untersuchungsräumen im Gesamtkontext der rvSU ist schematisch in Abbildung 8 dargestellt.

Um im Rahmen des übergeordneten Konzepts zur Durchführung der rvSU (BGE 2022a) die Bestimmungen der EndlSiUntV in Hinblick auf die Ausweisung von Untersuchungsräumen zu erfüllen, wurde für alle nach StandAG in Frage kommenden Wirtsgesteine (Steinsalz, Tongestein, kristallines Wirtsgestein) festgelegt, die Untersuchungsräume deckungsgleich mit den zugrundeliegenden Teilgebieten aus Phase I, Schritt 1 des Standortauswahlverfahrens (BGE 2020g) auszuweisen. Das bedeutet, dass jedes Teilgebiet von einem Untersuchungsraum abgedeckt wird. Auch in Bezug auf das kristalline Wirtsgestein ist der Untersuchungsraum immer deckungsgleich mit dem jeweils zugrundeliegenden Teilgebiet. Die Notwendigkeit zur Ausweisung weiterer Untersuchungsräume für das kristalline Wirtsgestein, die ein Sicherheitskonzept zu Grunde legen, bei dem der sichere Einschluss wesentlich durch geotechnische und technische Barrieren gewährleistet wird (vgl. § 4 Abs. 3 Nr. 2 EndlSiAnfV), wird im Rahmen der rvSU geprüft (BGE 2022a). Die Ausweisung solcher Untersuchungsräume ist nicht Teil des vorliegenden Kapitels, es ist jedoch zu erwarten, dass die Methode in einem solchen Fall nicht wesentlich von der hier beschriebenen Vorgehensweise abweichen würde.

Für die GzME entspricht der jeweilige Untersuchungsraum dem kartografischen Umriss des Teilgebiets (Beispiel: siehe Abbildung 9). Abweichungen zwischen Teilgebiet und Untersuchungsraum können sich lediglich durch die nachträgliche Berücksichtigung zusätzlicher fachlicher oder technischer Informationen ergeben. Im Fall des GzME „Thüringer Becken“ wurden beispielsweise kleinere Fehlstellen im Teilgebiet 078_02TG_197_02IG_S_f_z, die vom Thüringer Landesamt für Umwelt, Bergbau und Naturschutz (TLUBN) in ihrer Stellungnahme (Landesamt für Umwelt Bergbau und Naturschutz (TLUBN) 2021) als technische Artefakte erkannt wurden, in der Fläche des Untersuchungsraums geschlossen.

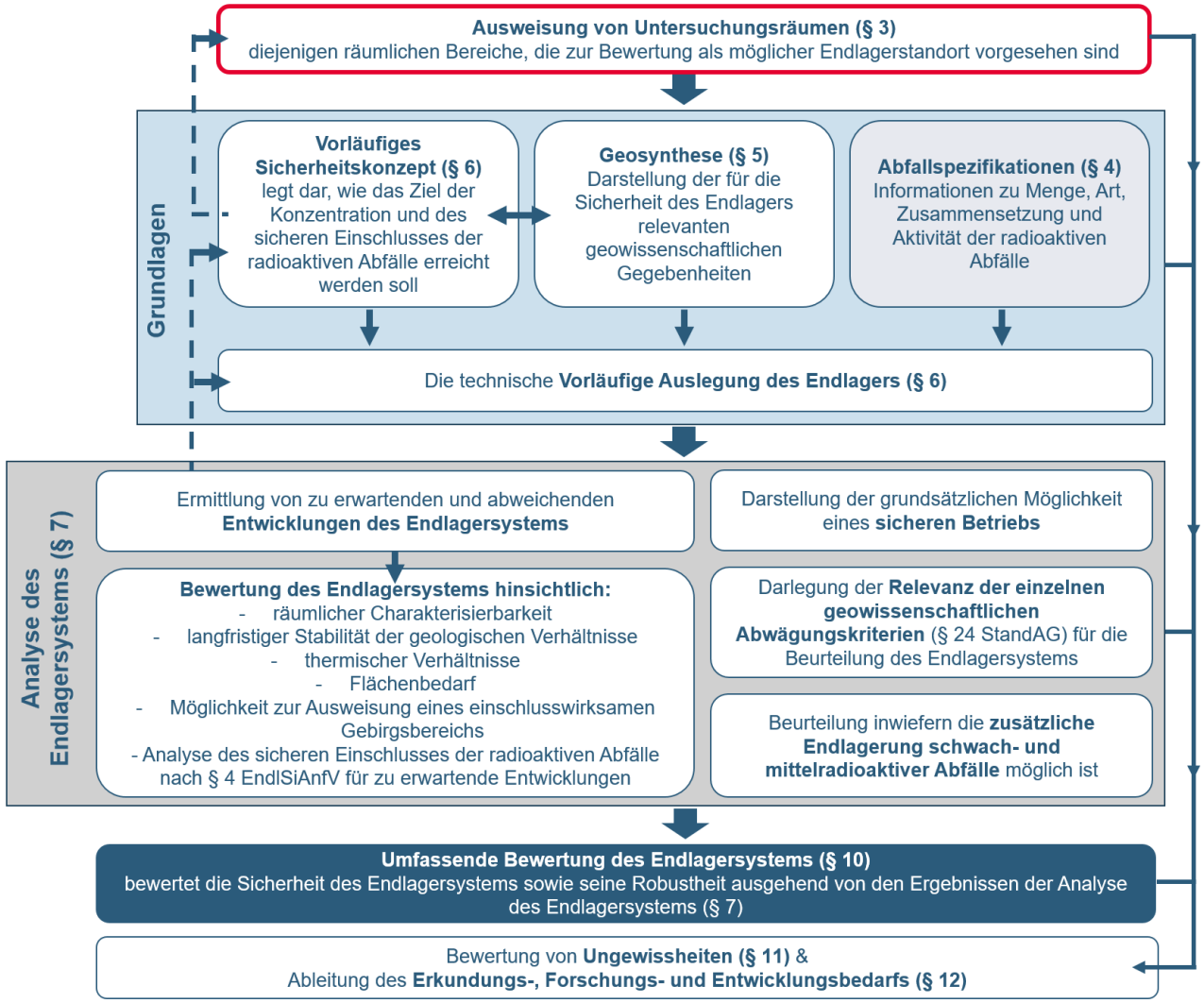


Abbildung 8: Einordnung der Ausweisung von Untersuchungsräumen in den Kontext der rvSU in Phase I, Schritt 2 des Standortauswahlverfahrens

Für die Wirtsgesteine Tongestein und kristallines Wirtsgestein sowie das Wirtsgestein Steinsalz vom Typ „Steinsalz in stratiformer Lagerung“, werden die ausgewiesenen Untersuchungsräume anschließend weiter in sogenannte „Teiluntersuchungsräume“ untergliedert, welche dann im Zuge der Durchführung der rvSU nach den Vorgaben der EndlSiUntV (vgl. Abbildung 8) separat analysiert werden (BGE 2022a). Details zur Aufteilung in Teiluntersuchungsräume befinden sich in Kapitel 5.6.

Die Ausweisung eines in Bezug auf das Teilgebiet deckungsgleichen Untersuchungsraums gilt, wie oben dargestellt, auch für Teilgebiete des Wirtsgesteinstyps „Steinsalz in steiler Lagerung“. Die Besonderheit im Vergleich zu den Teilgebieten der anderen Wirtsgesteinstypen besteht nach gegenwärtigem Stand jedoch darin, dass einerseits zusätzlich zum Untersuchungsraum ein individueller sogenannter „Betrachtungsraum“ (Erläuterung siehe unten) definiert wird und andererseits im Anschluss an die Ausweisung der Untersuchungsräume voraussichtlich keine weitere Untergliederung in Teiluntersuchungsräume erforderlich ist (ggf. Ausnahme bei Salzmauern, siehe die folgenden Ausführungen).

Beispiel 1: Ausweisung des Untersuchungsraums für das GzME „Opalinuston“ (Teilgebiet 001_00TG_032_01IG_T_f_jmOPT)

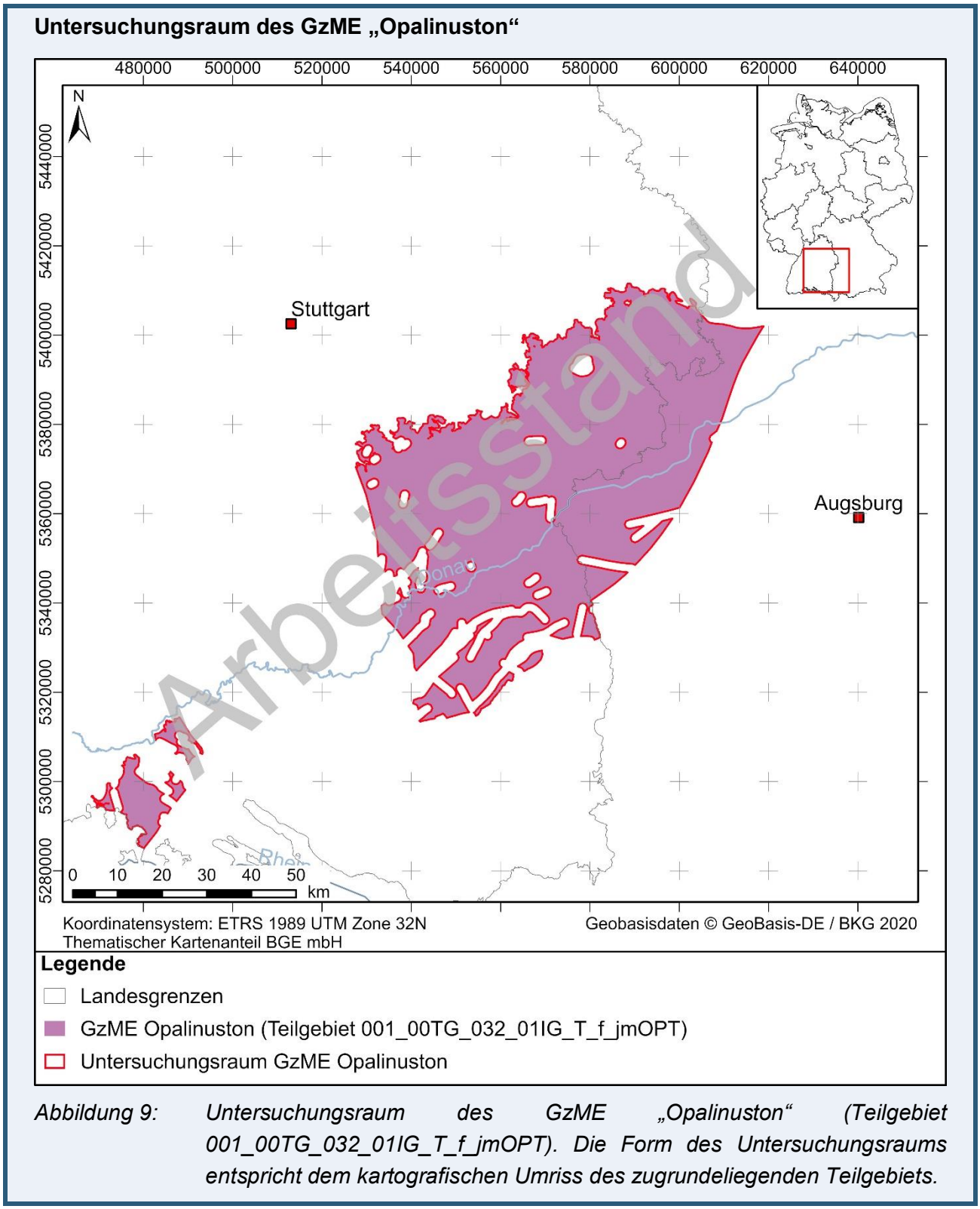


Abbildung 9: Untersuchungsraum des GzME „Opalinuston“ (Teilgebiet 001_00TG_032_01IG_T_f_jmOPT). Die Form des Untersuchungsraums entspricht dem kartografischen Umriss des zugrundeliegenden Teilgebiets.

Die Definition eines individuellen Betrachtungsraums zusätzlich zum Untersuchungsraum ist derzeit nur für Teilgebiete des Wirtsgesteinstyps Steinsalz in steiler Lagerung vorgesehen, zumindest situativ könnte ein solcher Betrachtungsraum unter Umständen aber auch für Teilgebiete anderer Wirtsgesteinstypen sinnvoll bzw. erforderlich sein, daher sei hier auf diese grundsätzliche Möglichkeit hingewiesen. Dabei ist wichtig hervorzuheben, dass der Bereich des Betrachtungsraums außerhalb des Untersuchungsraums lediglich als Bezugsgröße zur Einbeziehung weiterer geowissenschaftlicher Informationen dient, keinesfalls aber selbst Gegenstand der sicherheitsgerichteten Bewertung im Rahmen der rvSU ist.

Aufgrund der begrenzten Größe von Teilgebieten innerhalb steilstehender Salzstrukturen ist eine weitere Untergliederung in Teiluntersuchungsräume nicht erforderlich. Einzig die verhältnismäßig großen Teilgebiete in langgezogenen Salzmauern im Norden Deutschlands könnten perspektivisch eine weitere Differenzierung zulassen. Darüber hinaus bilden Teilgebiete vom Wirtsgesteinstyp „Steinsalz in steiler Lagerung“ aufgrund der Anwendung von Ausschlusskriterien (vgl. § 22 StandAG) und Mindestanforderungen (vgl. § 23 StandAG) in Phase I, Schritt 1 des Standortauswahlverfahrens (§ 13 StandAG) ohnehin nur eine Teilmenge einer kompletten Salzstruktur ab, vorwiegend deren Zentralbereich (BGE 2020j). Randbereiche wurden – entweder aufgrund von zu geringer Mächtigkeit nach Abzug der vom StandAG geforderten 300 m Salzschwebe oder einer zu tiefen Lage – oftmals nicht als Teilgebiet mit ausgewiesen.

Insbesondere aufgrund der im Verhältnis zu den anderen Wirtsgesteinstypen geringen lateralen Erstreckung von Teilgebieten des Wirtsgesteinstyps Steinsalz in steiler Lagerung ist, wie oben erwähnt, für diese Teilgebiete zusätzlich zur Ausweisung des Untersuchungsraums die Definition eines individuellen Betrachtungsraums um das entsprechende Teilgebiet erforderlich. Betrachtungsräume stellen die rvSU unterstützende räumliche Bereiche dar. In Hinblick auf das Wirtsgestein Steinsalz vom Typ „Steinsalz in steiler Lagerung“ ist die Definition von Betrachtungsräumen auch deshalb erforderlich, da Salzstrukturen im Gegensatz zu den großflächigen Teilgebieten der anderen Wirtsgesteinstypen durch ihre Aufstiegsgeschichte erhebliche Wechselwirkungen mit der strukturellen, aber auch sedimentologischen Entwicklung des Nebengebirges erfahren haben. Des Weiteren müssen zu einer umfassenden geologischen Charakterisierung auch Informationen berücksichtigt werden, die außerhalb des Teilgebiets (und damit auch außerhalb des Untersuchungsraums) liegen. So können beispielsweise über eine sinnvolle Übertragung von Informationen, z. B. anhand von Analogieschlüssen anderer Salzstrukturen, Datenlücken geschlossen und ein stimmiges Gesamtbild der geologischen Verhältnisse formuliert werden. Ein weiterer wichtiger Aspekt für die Formulierung eines Betrachtungsraums liegt darin begründet, dass das regional-hydrogeologische Regime Einfluss auf die Grundwasserströmungen am Rand des Untersuchungsraums ausübt und diese Bedingungen einen durchaus bedeutenden Faktor in einer numerischen Betrachtung des Radionuklidtransports darstellen können. Aus den genannten Gründen ist speziell für Teilgebiete des Wirtsgesteinstyps Steinsalz in steiler Lagerung für die weitere Betrachtung der von der EndlSiUntV geforderten Aspekte (vgl. Abbildung 8), vor allem aber für die Bewertung des sicheren Einschlusses der Radionuklide (vgl. § 7 Abs. 6 Nr. 3 Buchst. f) EndlSiUntV), eine über das Teilgebiet hinausgehende Betrachtung der Umgebung des Teilgebiets erforderlich. Der zum jeweiligen Untersuchungsraum zugehörige Betrachtungsraum des Wirtsgesteinstyps „Steinsalz in steiler Lagerung“

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

muss daher so gewählt werden, dass zusätzlich zum Teilgebiet selbst auch die gesamte Salzstruktur sowie das umliegende Nebengebirge in sinnvollem Maße miterfasst werden. Die Größe und Form des jeweiligen Betrachtungsraums orientieren sich dabei an den natürlichen geologischen und speziell hydrogeologischen Randbedingungen (z. B. Fließgewässer, Grundwasserscheiden) in der Umgebung der Salzstruktur und stehen in enger Verbindung mit den Überlegungen in Zusammenhang mit der Analyse des Endlagersystems (§ 7 EndlSiUntV).

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

4 Vorläufiges Sicherheitskonzept und vorläufige Endlagerauslegung (§ 6 EndlSiUntV)

4.1 Vorläufiges Sicherheitskonzept

4.1.1 Regulatorische Vorgaben gemäß § 10 EndlSiAnfV

Das Sicherheitskonzept eines Endlagersystems gibt die **wesentliche Strategie wieder, mit der das Ziel der Konzentration und des sicheren Einschlusses der radioaktiven Abfälle nach § 4 Abs. 1 EndlSiAnfV** (siehe nachfolgend) **erreicht werden soll**. Dabei muss das Sicherheitskonzept alle Phasen des Endlagersystems von Errichtung über Betrieb und Stilllegung bis in die Nachverschlussphase abdecken (§ 10 Abs. 1 EndlSiAnfV).

§ 4 EndlSiAnfV ***Sicherer Einschluss der radioaktiven Abfälle***

(1) *Die einzulagernden radioaktiven Abfälle sind im Endlagersystem mit dem Ziel zu konzentrieren und sicher einzuschließen, die darin enthaltenen Radionuklide mindestens im Bewertungszeitraum von der Biosphäre fernzuhalten.*

(2) *Das vorgesehene Endlagersystem hat den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle passiv und wartungsfrei durch ein robustes, gestaffeltes System verschiedener Barrieren mit unterschiedlichen Sicherheitsfunktionen zu gewährleisten.*

(3) *Die wesentlichen Barrieren zum Erreichen des sicheren Einschlusses der radioaktiven Abfälle sind*

1. *ein oder mehrere einschlusswirksame Gebirgsbereiche oder*
2. *im Fall des Wirtsgesteins Kristallingestein, sofern kein einschlusswirksamer Gebirgsbereich ausgewiesen werden kann, für die jeweilige geologische Umgebung geeignete technische und geotechnische Barrieren.*

(4) *Der sichere Einschluss muss innerhalb der wesentlichen Barrieren nach Absatz 3 so erfolgen, dass die Radionuklide aus den radioaktiven Abfällen weitestgehend am Ort ihrer ursprünglichen Einlagerung verbleiben.*

(5) *Für die zu erwartenden Entwicklungen ist zu prüfen und darzustellen, dass im Bewertungszeitraum*

1. *insgesamt höchstens ein Anteil von 10^{-4} und*
2. *jährlich höchstens ein Anteil von 10^{-9}*

sowohl der Masse als auch der Anzahl der Atome aller ursprünglich eingelagerten Radionuklide aus dem Bereich der wesentlichen Barrieren ausgetragen wird. In diesen Anteilen sind auch radioaktive Zerfallsprodukte der ursprünglich eingelagerten Radionuklide zu berücksichtigen.

(6) Für die abweichenden Entwicklungen ist zu prüfen und darzustellen, dass das Endlagersystem im Bewertungszeitraum seine Funktion nach den Absätzen 1 bis 4 beibehält.

Nach § 10 Abs. 5 bis 7 EndlSiAnfV muss ein Sicherheitskonzept im Rahmen der Genehmigungsunterlagen nach § 9b Abs. 1a AtG folgende Punkte beinhalten:

(5) „Das Sicherheitskonzept muss eine Darstellung aller vorgesehenen Barrieren des Endlagersystems, insbesondere der wesentlichen Barrieren nach § 4 Abs. 3, ihrer jeweiligen Sicherheitsfunktionen und ihres Zusammenwirkens, enthalten. Die Darstellung muss auch ein Verschlusskonzept zur Abdichtung von Hohlräumen, die mit radioaktiven Abfällen beladen worden sind, umfassen. Es ist darzulegen, dass die Sicherheitsfunktionen des Endlagersystems und seiner Barrieren gegenüber inneren und äußeren Einflüssen und Störungen unempfindlich sind und dass das Verhalten der Barrieren gut prognostizierbar ist.

(6) Das Sicherheitskonzept hat im Übrigen zu enthalten:

1. *einen Ablaufplan für die Errichtung, den Betrieb und die Stilllegung des Endlagers, der darlegt, wie die Sicherheit des Endlagers nach § 17 sichergestellt werden kann und wie die radioaktiven Abfälle in einem sicheren Zustand gehalten werden können,*
2. *eine Darstellung der Maßnahmen, mit denen die Rückholbarkeit der eingelagerten radioaktiven Abfälle nach § 13 bis zum Beginn der Stilllegung gewährleistet wird, und*
3. *eine Darstellung der Vorkehrungen, die zur Ermöglichung einer Bergung der eingelagerten radioaktiven Abfälle nach § 14 getroffen werden*

(7) Im Sicherheitskonzept zu berücksichtigen sind Maßnahmen, die bis zum Abschluss der Stilllegung erforderlich sind

1. *zur Gewährleistung des erforderlichen Schutzes des Endlagers vor Störmaßnahmen und sonstigen Einwirkungen Dritter und*
2. *zur Überwachung von Kernmaterial.“*

Die Basis für die Erstellung eines Sicherheitskonzeptes im Rahmen der Genehmigungsunterlagen bilden die zu erwartenden Entwicklungen des Endlagersystems im Bewertungszeitraum sowie die abweichenden Entwicklungen (§ 10 Abs. 2 EndlSiAnfV, der Umgang mit Entwicklungen in den rvSU ist in Kapitel 8.2 beschrieben). Das Sicherheitskonzept muss die Ergebnisse aus den vorangegangenen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen berücksichtigen sowie darstellen, dass die Optimierung des Konzeptes abgeschlossen ist (§ 10 Abs. 3 und 4 EndlSiAnfV).

4.1.2 Vorläufiges Sicherheitskonzept im Rahmen der rvSU

Gemäß § 6 Abs. 1 EndlSiUntV muss in den rvSU ein vorläufiges Sicherheitskonzept gemäß den Anforderungen aus § 10 EndlSiAnfV an ein Sicherheitskonzept (im Sinne des Sicherheitsberichtes, siehe Kapitel 4.1.1) für jeden Untersuchungsraum erstellt werden, welches in den weiterentwickelten vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (wvSU) und den umfassenden vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (uvSU) weiterentwickelt werden muss (siehe Abbildung 10).

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

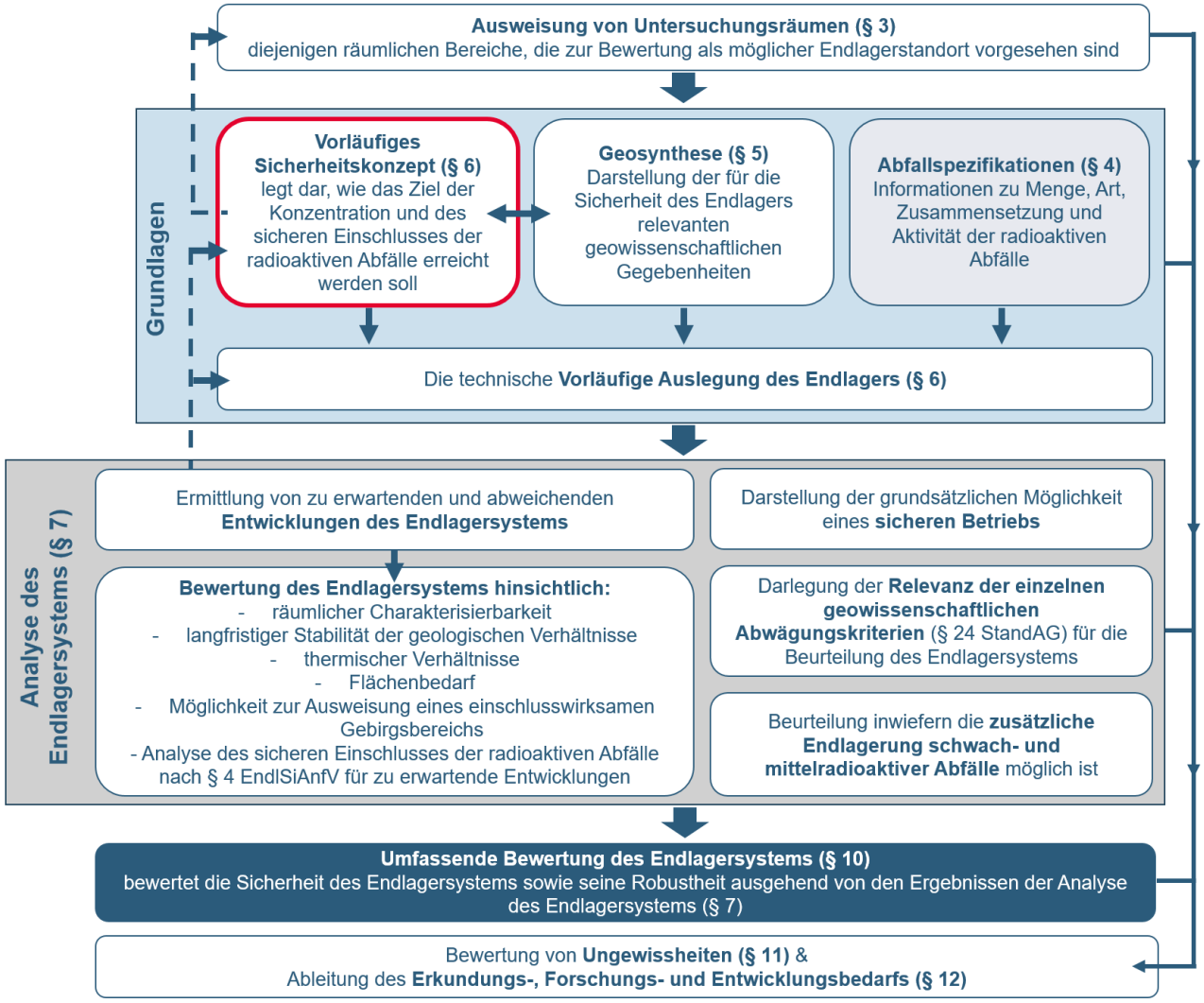


Abbildung 10: *Einordnung des vorläufigen Sicherheitskonzeptes in den Kontext der rvSU*Die EndlSiUntV macht keine konkreten Vorgaben zur Detailtiefe des vorläufigen Sicherheitskonzeptes in den rvSU im Vergleich zu den wvSU und uvSU oder dem Sicherheitskonzept im Rahmen der Genehmigungsunterlagen. Jedoch sind folgende grundsätzliche Ausnahmeregelungen in der EndlSiUntV bezüglich der rvSU enthalten:

- Eine geringe Detailtiefe der Endlagerauslegung (§ 6 Abs. 4 EndlSiUntV, vgl. Kapitel 4.2).
- Die Darstellung der grundsätzlichen Möglichkeit eines sicheren Betriebs im Vergleich zu einer vollständigen betrieblichen Sicherheitsanalyse in den wvSU und uvSU (§ 7 Abs. 6 Nr. 4 EndlSiUntV, vgl. Kapitel 8.7).
- Die Bewertung einiger Aspekte in Bezug auf die Langzeitsicherheit anhand überschlägiger Abschätzungen und Analogiebetrachtungen ist in den rvSU ausreichend, im Vergleich zu einer vollständigen Langzeitsicherheitsanalyse, welche bei der wvSU und uvSU erfolgt (§ 7 Abs. 6 Nr. 3 EndlSiUntV, vgl. Kapitel 8.3, 8.5 und 8.6).

- Es kann die Annahme getroffen werden, dass die technischen und geotechnischen Barrieren ihre Funktion im jeweils vorgesehenen Zeitraum grundsätzlich erfüllen (§ 7 Abs. 6 Nr. 2 EndlSiUntV, vgl. Kapitel 8.4).

Darüber hinaus sind bereits zu Beginn der rvSU die vorläufigen Sicherheitskonzepte für die Ausweisung von Untersuchungsräumen (vgl. Kapitel 3) notwendig. In den rvSU werden die Entwicklungen des Endlagersystems im Rahmen der Analyse des Endlagersystems (§ 7 EndlSiUntV, siehe Kapitel 8.2) abgeleitet. Die Ableitung der Entwicklungen des Endlagersystems erfolgt im Ablauf der Arbeitsschritte (vgl. Kapitel 1.2) somit erst nachdem bereits ein vorläufiges Sicherheitskonzept vorhanden sein muss und sie stehen entsprechend nicht als Basis für die Erstellung des vorläufigen Sicherheitskonzeptes im Rahmen der rvSU zur Verfügung (§ 10 Abs. 2 EndlSiAnfV). Auch hat zu Beginn der rvSU noch keine Optimierung des Endlagersystems (§ 10 Abs. 4 EndlSiAnfV) stattgefunden. Der Umgang mit einer Optimierung im Rahmen der rvSU ist in Kapitel 4.2.9 beschrieben.

Wie in BT-Drs. 19/19291, Seite 49 beschrieben, ist die Detailtiefe des Sicherheitskonzeptes abhängig von der aktuellen Phase des Standortauswahlverfahrens: „*Dessen Detailtiefe entspricht den Möglichkeiten und Erfordernissen der jeweiligen Phase des Standortauswahlverfahrens*“. Entsprechend richtet sich die Detailtiefe der Inhalte des vorläufigen Sicherheitskonzeptes in den rvSU an den Ausnahmeregelungen aus, die in der EndlSiUntV bezüglich der Durchführung der rvSU gemacht werden. Für die Erstellung der vorläufigen Sicherheitskonzepte in den rvSU erfolgt eine Fokussierung auf die Darstellung der grundsätzlichen Strategie, mit der der sicherere Einschluss der radioaktiven Abfälle nach § 4 EndlSiAnfV in einem Endlagersystem erreicht werden kann, und der dazugehörigen Darstellung der Barrieren des Endlagersystems gemäß § 10 Abs. 5 EndlSiAnfV. Da in den rvSU die Betriebsphase des Endlagersystems anhand der Darstellung der grundsätzlichen Möglichkeit eines sicheren Betriebs überschlägig betrachtet wird, konzentriert sich die Darstellung der Strategie und der Barrieren für den sicheren Einschluss in den rvSU auf den Bewertungszeitraum und insbesondere auf die geologischen Barrieren.

Die Bearbeitung der Punkte zu § 10 Abs. 6 EndlSiAnfV, erfolgt in den rvSU folgendermaßen:

- Zu § 10 Abs. 6 Nr. 1 EndlSiAnfV: Da die Betriebsphase in den rvSU des Endlagersystems anhand der Darstellung der grundsätzlichen Möglichkeit eines sicheren Betriebs betrachtet wird (anstelle einer betrieblichen Sicherheitsanalyse nach § 8 EndlSiUntV) erfolgt die Ausarbeitung eines Ablaufplans für die Betriebsphase des Endlagers nach § 17 EndlSiAnfV frühestens im Rahmen der wvSU.
- Zu § 10 Abs. 6 Nr. 2 und 3 EndlSiAnfV: In den rvSU erfolgt die Beschreibung der möglichen Maßnahmen zur Rückholbarkeit im Rahmen der vorläufigen Endlagerauslegung (§ 6 Abs. 4 EndlSiUntV, siehe Kapitel 4.2.6.5). Das Thema der Bergbarkeit wird im Rahmen der rvSU gemäß EndlSiUntV noch nicht betrachtet.

Die in § 10 Abs. 7 EndlSiAnfV geforderten Maßnahmen, die bis zum Abschluss der Stilllegung erforderlich sind (Schutz vor Störmaßnahmen und Überwachung von Kernmaterial), erfolgt frühestens in den wvSU. Diese Maßnahmen stellen schutzbedürftige Informationen dar, weshalb diese nicht Teil der veröffentlichten Unterlagen sein werden (BT-Drs. 19/19291, S. 38).

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

In den rvSU werden im Rahmen der Erstellung des vorläufigen Sicherheitskonzeptes entsprechend die vorgesehenen Barrieren des Endlagersystems, ihre Sicherheitsfunktionen und deren zeitliches Zusammenwirken gemäß § 10 Abs. 5 EndlSiAnfV dargestellt. Die Methodik hierfür wird im nachfolgenden Kapitel 4.1.3 beschrieben.

4.1.3 Darstellung der Barrieren des Endlagersystems und ihrer Sicherheitsfunktionen (§ 10 Abs. 5 EndlSiAnfV) im Rahmen der rvSU

Kernstück des Sicherheitskonzeptes ist die Darstellung der Barrieren des Endlagersystems und deren Sicherheitsfunktionen (§ 10 Abs. 5 EndlSiAnfV) im Bewertungszeitraum (siehe Kapitel 4.1.2). Um die Barrieren und ihre Funktionsweisen beschreiben zu können, ist zunächst ein generelles Verständnis des Endlagersystems (siehe Kapitel 4.1.3.1) und der grundsätzlichen Anforderungen an das Erreichen des sicheren Einschlusses der radioaktiven Abfälle (siehe Kapitel 4.1.3.2) notwendig. Anschließend erfolgt die Beschreibung der Methodik für die Darstellung der verschiedenen Barrieren sowie die Ableitung der Sicherheitsfunktionen aus den Anforderungen an die Sicherheit des Endlagersystems und deren zeitlichen Zusammenwirken gemäß § 10 Abs. 5 EndlSiAnfV (siehe Kapitel 4.1.3.3).

4.1.3.1 Das Endlagersystem

Gemäß § 1 Abs. 4 StandAG soll „*die Endlagerung in tiefen geologischen Formationen in einem für diese Zwecke errichteten Endlagerbergwerk mit dem Ziel des endgültigen Verschlusses erfolgen*“. Das Endlagersystem ist „*das den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle durch das Zusammenwirken der verschiedenen Komponenten[6] bewirkende System, das aus dem Endlagerbergwerk, den Barrieren und den das Endlagerbergwerk und die Barrieren umgebenden oder überlagernden geologischen Schichten bis zur Erdoberfläche besteht, soweit sie zur Sicherheit des Endlagers beitragen*“ (§ 2 Nr. 11 StandAG). Ein Endlagersystem setzt sich demnach aus verschiedenen Barrieren zusammen, die sich gegenseitig ergänzen und unterstützen, um den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle zu gewährleisten. Grundsätzlich besteht dieses System aus geologischen, geotechnischen und technischen Barrieren.

Die geologischen Barrieren sind die natürlich vorkommenden geologischen Einheiten des Endlagersystems, die sich durch ihre Eigenschaften für die Errichtung eines Endlagerbergwerkes eignen sowie geologische Einheiten enthalten, die Barriereeigenschaften aufweisen, die „*eine Ausbreitung von Radionukliden be- oder verhindern*“ (§ 2 Nr. 7 StandAG) können. Durch das Auffahren des Endlagerbergwerkes kommt es zur Verletzung der geologischen Barrieren und entsprechend der Barriereeigenschaften an der Stelle der Durchörterung. Mit Hilfe von technisch-konstruktiv erstellten geotechnischen Barrieren sollen die durch das Auffahren des Endlagerbergwerkes entstandenen Schädigungen der geologischen Barrieren kompensiert und möglichst die ursprüngliche Barrierewirksamkeit der geologischen Barrieren wiederhergestellt werden. Sie tragen damit ebenfalls dazu

[6] Im Folgenden kommen an verschiedenen Stellen die Begriffe Barriere und Komponente vor. Mit Barrieren sind dabei die verschiedenen Komponenten des Endlagersystems gemeint, siehe Kapitel 4.1.3.3.2. Die beiden Begriffe werden synonym verwendet.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

bei, „*eine Ausbreitung von Radionukliden zu be- oder verhindern*“ (§ 2 Nr. 8 StandAG). Um die radioaktiven Abfälle im Zeitraum der Rückholbarkeit (§ 13 EndlSiAnfV) und Bergbarkeit (§ 14 EndlSiAnfV) sowie in der Betriebsphase sicher handhabbar zu machen, werden diese in den technisch-konstruktiv erstellten Endlagerbehältern eingeschlossen. Zu diesen sogenannten technischen Barrieren zählt auch die Abfallform selbst. Auch im Bewertungszeitraum tragen diese technischen Barrieren dazu bei, „*eine Ausbreitung von Radionukliden zu be- oder verhindern*“ (§ 2 Nr. 8 StandAG).

4.1.3.2 Der sichere Einschluss im Endlagersystem

Im Bewertungszeitraum muss das vorgesehene Endlagersystem „*den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle […] durch ein **robustes, gestaffeltes System** verschiedener Barrieren mit unterschiedlichen Sicherheitsfunktionen gewährleisten*“ (§ 4 Abs. 2 EndlSiAnfV). In einem Endlagersystem kann das Erreichen des sicheren Einschlusses der radioaktiven Abfälle dabei gemäß § 4 Abs. 3 EndlSiAnfV grundsätzlich durch zwei Arten von wesentlichen Barrieren[7] gewährleistet werden (siehe auch Abbildung 11):

1. Der sichere Einschluss der radioaktiven Abfälle wird durch ein oder mehrere einschlusswirksame Gebirgsbereiche erreicht. Im Folgenden Endlagersystem Typ 1 genannt.
2. Der sichere Einschluss der radioaktiven Abfälle wird im kristallinen Wirtsgestein, sofern in diesem kein einschlusswirksamer Gebirgsbereich ausgewiesen werden kann, durch technische und geotechnische Barrieren erreicht, die für die jeweilige geologische Umgebung geeignet sind. Im Folgenden Endlagersystem Typ 2 genannt.

[7] Gemäß § 2 Nr. 1 EndlSiAnfV sind die wesentlichen Barrieren: „*die Barrieren, auf denen der sichere Einschluss der radioaktiven Abfälle beruht*“. „*Die Barrieren, die zusätzlich zu den wesentlichen Barrieren und im Zusammenwirken mit ihnen eine Ausbreitung von Radionukliden be- oder verhindern*“ werden weitere Barrieren genannt (§ 2 Nr. 2 EndlSiAnfV). In den nachfolgend genannten Endlagersystemen werden der/die einschlusswirksame(n) Gebirgsbereich(e) im Fall von Endlagersystem Typ 1 (1.) bzw. die technischen und geotechnischen Barrieren im Fall von Endlagersystem Typ 2 (2.) als wesentliche Barrieren bezeichnet. Die weiteren Barrieren (beispielsweise die technischen und geotechnischen Barrieren im Endlagersystem Typ 1) übernehmen in den jeweilig gestaffelten Systemen **zeitabhängig unerlässliche** Sicherheitsfunktionen, um im Zusammenwirken mit den wesentlichen Barrieren den sicheren Einschluss im **Bereich der wesentlichen Barrieren** gemäß § 4 Abs. 5 EndlSiAnfV zu gewährleisten.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

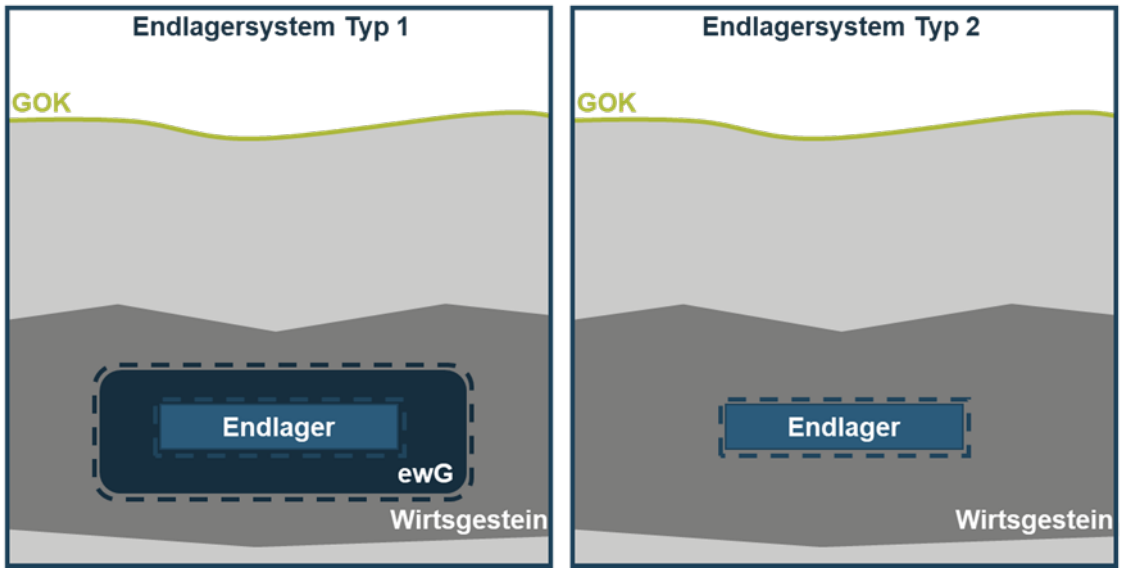


Abbildung 11: Vereinfachte graphische Darstellung der nach § 4 Abs. 3 EndlSiAnfV genannten Möglichkeiten zum Erreichen des sicheren Einschlusses der radioaktiven Abfälle im Bewertungszeitraum.
Links die Darstellung des Endlagersystems Typ 1 (einschlusswirksamer Gebirgsbereich als wesentliche Barriere) und rechts des Endlagersystems Typ 2 (technische und geotechnische Barriere als wesentliche Barrieren – für das kristalline Wirtsgestein). Die in den rvSU noch unbekannte, genaue räumliche Ausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und des Endlagers ist mit Hilfe gestrichelter Linien angedeutet. Die Geländeoberkante (GOK) ist in grün visualisiert.

In einem **Endlagersystem Typ 1** muss/müssen definitionsgemäß der oder die einschlusswirksame(n) Gebirgsbereich(e) innerhalb der geologischen Barrieren des gestaffelten Barrierensystems den wesentlichen Beitrag (wesentliche Barriere/n) zum sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle im Bewertungszeitraum leisten. Ein einschlusswirksamer Gebirgsbereich wird gemäß § 2 Nr. 9 StandAG definiert als „*der Teil eines Gebirges, der bei Endlagersystemen, die wesentlich auf geologischen Barrieren beruhen, im Zusammenwirken mit den technischen und geotechnischen Verschlüssen den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle in einem Endlager gewährleistet*“. Unter einem einschlusswirksamen Gebirgsbereich wird folglich ein Gesteinsbereich innerhalb der geologischen Barrieren verstanden, der aufgrund seiner hohen Barrierewirksamkeit den Einschluss der radioaktiven Abfälle gewährleisten kann. Die Anforderungen an die Beschaffenheit eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs sind in den Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen und geowissenschaftlichen Abwägungskriterien des StandAG definiert (vgl. §§ 22 bis 24 StandAG). Gesteinstypen, die die Voraussetzungen an die Barrierewirksamkeit eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs in der Regel erfüllen, sind Steinsalz- und Tongesteinsformationen sowie Kristallinformationen mit geringer Gebirgsdurchlässigkeit (vgl. auch AkEnd 2002; K-Drs. 268). Diese drei Gesteinstypen kommen in Deutschland gemäß § 1 Abs. 3 StandAG auch als Wirtsgesteine in Frage. Die Hauptaufgabe des Wirtsgesteins besteht in der Aufnahme der radioaktiven Abfälle, also der Aufnahme eines Einlagerungsbereichs: *„Es muss*

daher vor allem die Errichtung und den Betrieb des Endlagerbergwerks erlauben." (AkEnd 2002)[8]. Da an den sicheren Einschluss der Radionuklide gemäß § 4 Abs. 4 EndlSiAnfV die Anforderung gestellt wird, dass dieser innerhalb der wesentlichen Barriere (folglich dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich) erfolgen muss (vgl. Kapitel 4.1.1), muss sich der Einlagerungsbereich für ein Endlagersystem Typ 1 innerhalb eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs befinden[9]. Die konkrete räumliche Ausdehnung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs ergibt sich auf Basis von Radionuklidtransportberechnungen. In den rvSU ist im Vergleich zu den nachfolgenden wvSU und uvSU ein geringerer Detailgrad aufgrund der geringeren Datenverfügbarkeit zulässig und daher zunächst „*die Möglichkeit zur Ausweisung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs*" zu bewerten (§ 7 Abs. 6 Nr. 3 Buchst. e) EndlSiAnfV, siehe Kapitel 8.5.10). Erst in Phase II des Standortauswahlverfahrens ist die konkrete räumliche Ausdehnung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs in einem Untersuchungsraum festzulegen. Zum jetzigen Zeitpunkt wird daher in den rvSU der Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion (WbB)[10], der einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich aufnehmen kann, betrachtet und bewertet. Dieser entspricht zu Beginn der rvSU den im Rahmen der Arbeiten zu § 13 StandAG ausgewiesenen endlagerrelevanten Gesteinsabfolgen oder -formationen (BGE 2020g).

In einem **Endlagersystem Typ 2** müssen definitionsgemäß die geotechnischen und technischen Barrieren des gestaffelten Barrierensystems den wesentlichen Beitrag (wesentliche Barriere/n) zum sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle im Bewertungszeitraum leisten. Diese Barrieren müssen für die jeweilige geologische Umgebung geeignet sein. Im Vergleich zu einem Endlagersystem Typ 1 kommt den geologischen Barrieren folglich nur eine untergeordnete Rolle zu. Solch ein Endlagersystem kommt gemäß § 23 Abs. 1 i. V. m. Abs. 4 StandAG und § 4 Abs. 3 EndlSiAnfV ausschließlich für das kristalline Wirtsgestein in Frage, sofern kein einschlusswirksamer Gebirgsbereich ausgewiesen werden kann. Konkret leitet sich daraus eine Subsidiarität (Nachrangigkeit) des Endlagersystems Typ 2 gegenüber dem Typ 1 für das kristalline Wirtsgestein ab. Im Verlauf der Durch-

[8] Unter Beachtung der funktionalen Differenzierung zwischen Wirtsgestein und einschlusswirksamen Gebirgsbereich hat der AkEnd (2002) zwei konfigurative Haupttypen hinsichtlich deren Anordnung innerhalb der geologischen Barriere abgeleitet: Konfigurationstyp Typ A – das Wirtsgestein ist hinsichtlich seiner Barrierewirksamkeit sicherheitsrelevanter Bestandteil des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (der den einschlusswirksamen Gebirgsbereich aufnehmende Gesteinstyp entspricht dem Wirtsgesteinstyp und dieser Gesteinstyp übernimmt damit sowohl die Funktionen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs als auch des Wirtsgesteins) – und Konfigurationstyp Typ B – das Wirtsgestein ist hinsichtlich seiner Barrierewirksamkeit kein sicherheitsrelevanter Bestandteil des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (ein Gesteinstyp übernimmt die Funktionen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, ein weiterer Gesteinstyp die des Wirtsgesteins). Konfigurationstyp Typ B wird darüber hinaus in die beiden Untertypen Typ Ba – der Wirtsgesteinskörper wird vom einschlusswirksamen Gebirgsbereich vollständig umschlossen – und Typ Bb – die Umschließung des Wirtsgesteinskörpers durch den einschlusswirksamen Gebirgsbereich ist unvollständig – eingeteilt. Unter Typ Bb fallen u. a. Konfigurationen mit einem das Wirtsgesteins überlagernden einschlusswirksamen Gebirgsbereich.

[9] Folglich sind für ein Endlagersystem Typ 1 gemäß § 4 EndlSiAnfV nur die Konfigurationen des Typ A sowie Ba nach AkEnd (2002) zu berücksichtigen. Entsprechend werden keine Konfigurationen mit einem überlagernden einschlusswirksamen Gebirgsbereich betrachtet.

[10] Innerhalb eines Wirtsgesteinsbereichs mit Barrierefunktion kann theoretisch überall ein einschlusswirksamer Gebirgsbereich platziert werden. Im Rahmen der Analyse des Endlagersystems (§ 7 Abs. 6 EndlSiUntV) kann es bei der räumlich differenzierten Bewertung dazu kommen, dass der Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion im Vergleich zu seiner ursprünglichen Ausdehnung verkleinert wird.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

führung der rvSU muss folglich zunächst die Möglichkeit zur Ausweisung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs gemäß § 7 Abs. 6 Nr. 3 Buchst. e) EndlSiAnfV, also die Realisierbarkeit eines Endlagersystems Typ 1, für Untersuchungsräume bzw. Teiluntersuchungsräume in kristallinem Wirtsgestein geprüft werden, bevor ein Endlagersystem Typ 2 für das vorläufige Sicherheitskonzept zugrunde gelegt werden kann (vgl. Basisdokument "Konzept zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung" (BGE 2022a), Kapitel 8.3.1 „Umgang mit den vorläufigen Sicherheitskonzepten im kristallinen Wirtsgestein").

4.1.3.3 Methodik zur Darstellung der Barrieren und ihrer Sicherheitsfunktionen in den rvSU

Nachdem sich mit der allgemeinen Beschaffenheit eines Endlagersystems bzw. der beiden Endlagersysteme, Typ 1 und Typ 2, auseinandergesetzt wurde, erfolgt die Darstellung der verschiedenen Barrieren sowie die Ableitung der Sicherheitsfunktionen aus den Anforderungen an die Sicherheit des Endlagersystems und deren zeitlichen Zusammenwirken gemäß § 10 Abs. 5 EndlSiAnfV. Als Detailgrad in den rvSU wird dabei eine **wirtsgesteinsspezifische Darstellung** der Barrieren gewählt. Diese erfolgt für das Endlagersystem Typ 1 für Tongestein, Steinsalz und das kristalline Wirtsgestein. Für Steinsalz erfolgt zunächst eine gemeinsame Darstellung für Steinsalz in steiler und stratiformer (flacher) Lagerung. Eine spätere Aufteilung in zwei getrennte Darstellungen ist zum jetzigen Zeitpunkt nicht vorgesehen, erscheint jedoch grundsätzlich möglich und ist im Rahmen der weiteren Arbeiten zu betrachten.

Nachfolgend werden zunächst die Sicherheitsfunktionen erläutert und die Barrieren des Endlagersystems in Abhängigkeit der Sicherheitsfunktionen spezifiziert. Anschließend erfolgt eine Erläuterung des gestaffelten Barrierensystems. In Beispiel 2 sind die Barrieren eines Endlagersystems Typ 1 und ihre Sicherheitsfunktionen beispielhaft dargestellt und erläutert.

4.1.3.3.1 Die Sicherheitsfunktionen

Die Sicherheitsfunktion stellt das Bindeglied zwischen der sicherheitsrelevanten Anforderung an das Endlagersystem und den Barrieren des Endlagersystems dar. Eine Sicherheitsfunktion ist nach § 2 Nr. 8 EndlSiAnfV „*eine Eigenschaft einer Komponente des Endlagersystems oder ein im Endlagersystem ablaufender Prozess, die oder der sicherheitsrelevante Anforderungen an ein sicherheitsbezogenes System oder Teilsystem oder an eine Einzelkomponente erfüllt*". Sie beschreibt also, mit welcher **Eigenschaft** oder welchem **Prozess**, die/der einer Komponente (Barriere) zugeordnet werden kann, die Anforderungen an die Sicherheit erreicht werden. Dabei kann eine Barriere eine oder mehrere Sicherheitsfunktionen besitzen, welche wiederum eine oder mehrere sicherheitsrelevante Anforderungen erfüllen können. Sicherheitsfunktionen können zeitlich begrenzt oder über den gesamten Bewertungszeitraum aktiv sein. Das Zusammenwirken der Barrieren und ihrer verschiedenen Sicherheitsfunktionen gewährleistet die Erfüllung des sicheren Einschlusses als Gesamtsystem. Die Definition von Sicherheitsfunktionen erfolgt folglich auf Basis der Sicherheitsanforderungen. Eine Zusammenfassung der Sicherheitsanforderungen an ein Endlagersystem gemäß § 26 Abs. 2 StandAG i. V. m. EndlSiAnfV ist in Tabelle 8 zu finden(vgl. Basisdokument "Konzept zur

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung“ (BGE 2022a), Kapitel 5 „Sicherheitsprinzipien und -anforderungen für vorläufige Sicherheitsuntersuchungen“)[11].

Tabelle 8: Auszug aus den Sicherheitsprinzipien und -anforderungen an ein Endlagersystem gemäß § 26 Abs. 2 StandAG i. V. m. EndlSiAnfV

Sicherheitsprinzipien und -anforderungen gemäß § 26 Abs. 2 StandAG i. V. m. EndlSiAnfV
Konzentration und sicherer Einschluss der radioaktiven Abfälle innerhalb der wesentlichen Barrieren (vgl. Kapitel 4.1.1).
Das Endlagersystem gewährleistet den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle passiv und wartungsfrei durch ein robustes, gestaffeltes System verschiedener Barrieren mit unterschiedlichen Sicherheitsfunktionen im Bewertungszeitraum von einer Million Jahren.
Das Verhalten des Endlagersystems ist als Ganzes unter Berücksichtigung der zukünftigen Entwicklungen des Endlagersystems im Bewertungszeitraum zu betrachten.
Die **Integrität** und **Robustheit** der wesentlichen Barrieren sowie die **Robustheit** der weiteren Barrieren für die zu erwartenden Entwicklungen des Endlagersystems.
Geringfügige **Expositionen** im Vergleich zur natürlichen Strahlenexposition auf Grund von Austragungen von Radionukliden aus den eingelagerten radioaktiven Abfällen im Bewertungszeitraum.
Der Ausschluss sich selbst tragender Kettenreaktionen (**Kritikalität**).
Die **betriebliche Sicherheit** muss gewährleistet sein, unter Berücksichtigung der für die Sicherheit des Endlagers relevanten Anlagenzustände in der Betriebsphase.
Die Möglichkeit der **Rückholung** während der Betriebsphase sowie das Vorhalten von Vorkehrungen für eine **Bergung** für einen Zeitraum von 500 Jahren nach dem Verschluss des Endlagers.

Die Sicherheitsfunktionen bilden eine der wesentlichen Grundlagen für die Sicherheitsuntersuchungen und werden für verschiedene Zwecke herangezogen. Sie bilden die Grundlage für die Auslegung der technischen und geotechnischen Barrieren des Endlagers (§ 6 Abs. 2 i. V. m 4 EndlSiUntV, siehe Kapitel 4.2) und werden als Ansatzpunkt für die Ableitung der Entwicklungen des Endlagersystems herangezogen (§ 7 Abs. 6 Nr. 1 EndlSiUntVV, siehe Kapitel 8.2). Darüber hinaus ist die Relevanz der einzelnen geowissenschaftlichen Abwägungskriterien in Bezug auf die Sicherheitsfunktionen des Endlagersystems zu untersuchen (§ 7 Abs. 4 Nr. 1 EndlSiUntV, siehe Kapitel 8.8)

[11] Es handelt sich hierbei um einen Auszug der wesentlichen Anforderungen. Die EndlSiAnfV enthält darüber hinaus noch detaillierte Anforderungen zu allen Phasen der Endlagerung.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

und die Erkundungs-, Forschungs- und Entwicklungsbedarfe hinsichtlich ihrer Relevanz für die Sicherheit des Endlagersystems abzuleiten (§ 12 Abs. 1 EndlSiUntV). Die Sicherheitsfunktionen stellen sozusagen den roten Faden in den Sicherheitsuntersuchungen dar, anhand dessen das Erreichen des sicheren Einschlusses analysiert und bewertet wird.

Die Definition von Sicherheitsfunktionen sowie deren zeitliches Zusammenwirken erfordert ein gutes Verständnis des Endlagersystems über den gesamten Bewertungszeitraum hinweg. Wie sich ein Endlagersystem in den verschiedenen Wirtsgesteinen zukünftig entwickeln kann, wird systematisch bei der Ableitung der zu erwartenden und abweichenden Entwicklungen analysiert (siehe Kapitel 8.2). Da bereits zu Beginn der rvSU eine erste Darstellung der Barrieren und ihrer Sicherheitsfunktionen notwendig ist, werden für eine erste Zusammenstellung der Sicherheitsfunktionen internationale Sicherheitskonzepte (z. B. SKB 2011a; Posiva Oy & SKB 2017; Nagra 2008b, 2021), Sicherheitskonzepte aus nationalen Forschungs- und Entwicklungsvorhaben (z. B. Jobmann et al. 2017a; Buhmann et al. 2008; Mönig et al. 2012; Mönig et al. 2011; Alfarra et al. 2020b; Alfarra et al. 2020a) sowie die Stellungnahme der Entsorgungskommission (ESK) zu *Sicherheitskonzeptionelle[n] Anforderungen an das Barrierensystem eines Endlagers für hoch radioaktive Abfälle und deren Umsetzbarkeit* herangezogen (ESK 2019). Nachdem die Entwicklungen abgeleitet wurden, sollten die zuvor überschlägig aufgestellten Sicherheitsfunktionen überprüft und ggf. angepasst werden. In den wvSU und uvSU werden die Sicherheitsfunktionen auf Basis der systematisch abgeleiteten Entwicklungen des jeweiligen Endlagersystems und den sich daraus ergebenen Konsequenzen weiter spezifiziert.

4.1.3.3.2 Die Barrieren des Endlagersystems

Die oben genannten geologischen, geotechnischen und technischen Barrieren lassen sich in Abhängigkeit ihrer Sicherheitsfunktionen bzw. der Anforderungen, die sie erfüllen müssen, weiter spezifizieren (siehe auch Abbildung 12):

- Technische Barrieren: wie in Kapitel 4.1.3.1 beschrieben, zählen sowohl der **Endlagerbehälter** als auch die **Abfallform** zu den technischen Barrieren. Die Abfallform umfasst die radioaktiven Abfälle, die zum größten Teil entweder aus einer Brennstoffmatrix mit Hüllrohren oder einer Glasmatrix mit Edelstahlkokillen bestehen (Details siehe Kapitel 2). Die Abfallform wird zur sicheren Handhabung in der Betriebsphase sowie Rückholbarkeit und Bergbarkeit[12] in den Endlagerbehälter eingeschlossen. Die mit den radioaktiven Abfällen beladenen Endlagerbehälter werden als Endlagergebinde bezeichnet (§ 2 Nr. 4 EndlSiAnfV).

[12] Nach § 14 Abs. 2 Nr. 1 Buchst. b) und c) EndlSiAnfV sind folgende beiden Anforderungen bezüglich der Bergbarkeit der Endlagergebinde ausreichend: die Gewährleistung der mechanischen Stabilität zur Handhabung ganzer Endlagergebinde sowie die Verhinderung der Freisetzung von radioaktiven Aerosolen bei der Handhabung.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

- Geotechnische Barrieren: wie in Kapitel 4.1.3.1 beschrieben, sollen die geotechnischen Barrieren die durch das Auffahren des Endlagerbergwerkes entstandenen Verletzungen der geologischen Barrieren kompensieren und möglichst die ursprüngliche Barrierewirksamkeit der geologischen Barrieren wiederherstellen. Dabei werden zwei Arten von geotechnischen Komponenten unterschieden:
  - Der **Versatz** (auch als Verfüllung bezeichnet): darunter werden Materialien verstanden, die im Endlagerbergwerk genutzt werden, um die durch die Auffahrung entstandenen Hohlräume zu verfüllen und um bergbauliche Funktionen und/oder Funktionen bezüglich der Langzeitsicherheit erfüllen zu können, beispielsweise die Reduzierung des Hohlraumvolumens. Versatzmaterialien werden in Hinblick auf die erforderlichen Funktionen und aufgrund ihrer physikalisch-chemischen Eigenschaften gewählt. Typische Vertreter sind z. B. Salzgrus oder Granulat mit hohem Anteil an Tonmineralen.
  - Die **Verschlussbauwerke**: räumlich begrenzte Bauwerke, die den Sicherheitsanforderungen entsprechend an Schlüsselstellen des Endlagerbergwerks (z. B. in den Tageszugängen oder im Streckensystem) errichtet werden, um Bewegungen von Fluiden bzw. den damit potenziell verbundenen Transport von Radionukliden zu unterbinden. Typische Verschlussbauwerke bestehen in der Regel aus verschiedenen Materialien und Funktionselementen, von denen die Dichtfunktion (z. B. aus Salzbeton oder Bentonitformsteinen) und die Widerlagerfunktion (z. B. aus Salzbeton oder Schotter) die wichtigsten Funktionen darstellen.
- Geologischen Barrieren: wie in Kapitel 4.1.3.1 beschrieben, handelt es sich um die natürlich vorkommenden Barrieren des Endlagersystems. Dabei wird zwischen der geologischen Barriere, die die wesentliche Barriere bildet bzw. aufnimmt, und den darüber liegenden geologischen Barrieren unterschieden. Die geologische Barriere, die die wesentliche Barriere bildet bzw. aufnimmt, ist in einem Endlagersystem Typ 1 der **Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion** oder im Falle des Endlagersystems Typ 2, die Gesteinsformation des Einlagerungsbereichs. Die über und neben dem Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion (oder der Gesteinsformation des Einlagerungsbereichs) liegenden geologischen Barrieren werden als **Deck- und Nebengebirge** bezeichnet. Das Deckgebirge ist gemäß § 2 Nr. 13 StandAG definiert als *„der Teil des Gebirges oberhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und bei Endlagersystemen, die auf technischen und geotechnischen Barrieren beruhen, oberhalb des Einlagerungsbereichs“*. Da der Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion der Bereich des Gesteins ist, der entweder den einschlusswirksamen Gebirgsbereich (Endlagersystem Typ 1) oder den Einlagerungsbereich (Endlagersystem Typ 2) aufnehmen wird, wird hier der

Begriff des Deckgebirges gewählt[13]. Allerdings kann sich die räumliche, insbesondere die vertikale Ausdehnung des Deckgebirges im Rahmen der vSU noch ändern, bis die räumliche Ausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs oder des Einlagerungsbereichs endgültig festgelegt wird.

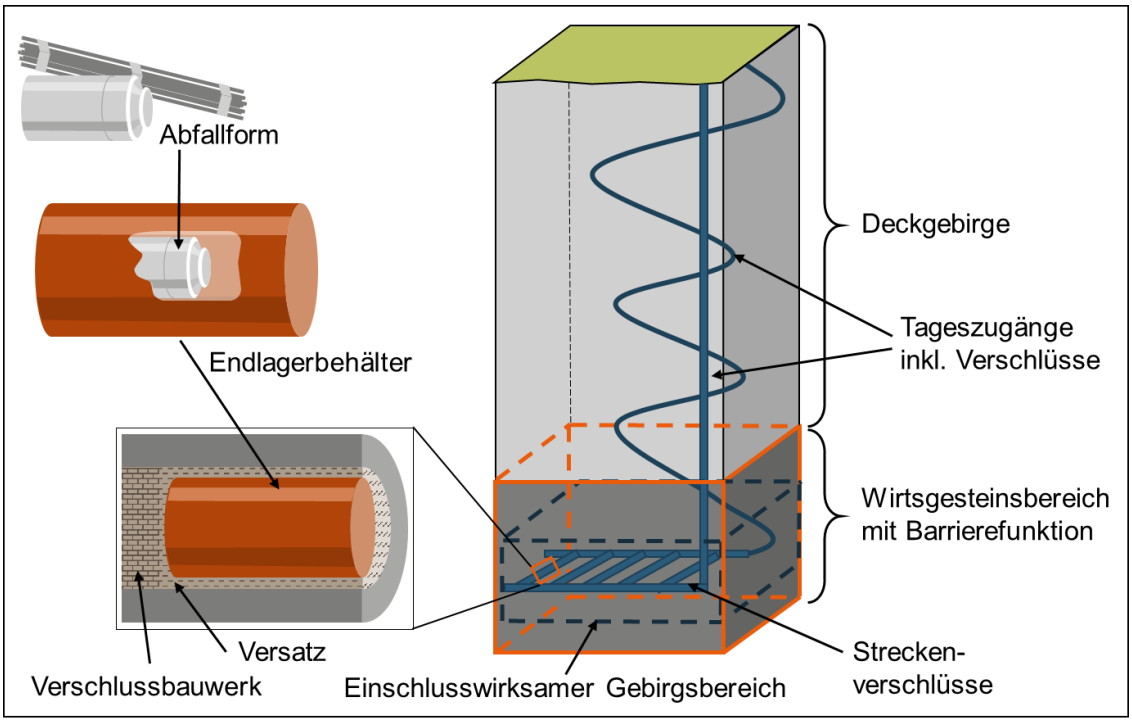


Abbildung 12: Schematische Darstellung der Barrieren in einem Endlagersystem Typ 1. Die orangefarbige Umrandung stellt dar, dass es sich dabei um die wesentliche Barriere des Endlagersystems handelt. Es ist ein potenzieller einschlusswirksamer Gebirgsbereich mit Hilfe einer blauen gestrichelten Linie angedeutet, wobei die genaue räumliche Ausdehnung zum jetzigen Zeitpunkt unbekannt ist.

4.1.3.3.3 Das gestaffelte Barrierensystem

Zusammen bilden die genannten Barrieren das robuste, gestaffelte Barrierensystem mit unterschiedlichen Sicherheitsfunktionen, die zusammen den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle gewährleisten und die Sicherheitsanforderungen (siehe Tabelle 8) erfüllen.

[13] Neben dem Begriff des Deckgebirges wird im Rahmen der Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien der Begriff der Überdeckung verwendet. Die Überdeckung ist definiert als der Teil des Gebirges, der das Wirtsgestein überlagert (BGE 2020ci). Der Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion umfasst zwar Teile des Wirtsgesteins, es existieren jedoch Fälle, in denen sich das Wirtsgestein in der vertikalen Ausdehnung bis in geringe Teufen (kleiner als 300 m Teufe) erstreckt und dementsprechend nicht mehr zum Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion gehört. Dies ist insbesondere bei einigen Teilgebieten in Steinsalz in steiler Lagerung oder im kristallinen Wirtsgestein der Fall. Aus diesem Grund wird dementsprechend hier der Begriff des Deckgebirges gewählt, gleichwohl sich dessen räumliche Ausdehnung noch verändern kann.

Zum Erreichen der Sicherheitsanforderungen übernehmen die Barrieren zwei Arten von Funktionen:

- Sicherheitsfunktionen, die zum Erhalt der Barrierewirkung in Bezug auf den sicheren Einschluss einer Komponente selbst oder zum Erhalt der Barrierewirkung anderer Barrieren des Endlagersystems, also zu deren Schutz, beitragen. Im Folgenden wird diese Art von Funktionen unter der Hauptsicherheitsfunktion **Erhalt der Barrierewirkung** zusammengefasst.
- Sicherheitsfunktionen, die dazu beitragen, dass die Radionuklide innerhalb der wesentlichen Barriere konzentriert werden, d. h. die Migration von Radionukliden be- bzw. verhindern. Dies betrifft insbesondere den Zeitraum nach einem Integritätsverlust der Behälter. Diese Funktionen werden im Folgenden unter der Hauptsicherheitsfunktion **Rückhaltung** zusammengefasst.

Dabei können die Eigenschaften einer Barriere (bzw. Komponente) zu beiden Arten von Sicherheitsfunktionen beitragen. So trägt beispielsweise eine geringe Durchlässigkeit des Streckenversatzes zum Erhalt der Barrierewirkung des Endlagerbehälters bei, da durch ein geringes Lösungsangebot eine Korrosion der Behälter verlangsamt wird. Nach dem Verlust der Behälterintegrität verhindert die geringe Durchlässigkeit wiederum eine Verbreitung der Radionuklide, die Radionuklide werden im Versatzmaterial zurückgehalten. Das gestaffelte Barrierensystem und die beiden Hauptsicherheitsfunktionen sind in Abbildung 13 schematisch dargestellt.

Inwieweit eine weitere strukturelle Unterteilung der Sicherheitsfunktionen im weiteren Verlauf des Standortauswahlverfahrens notwendig wird, ist zum jetzigen Zeitpunkt noch offen.

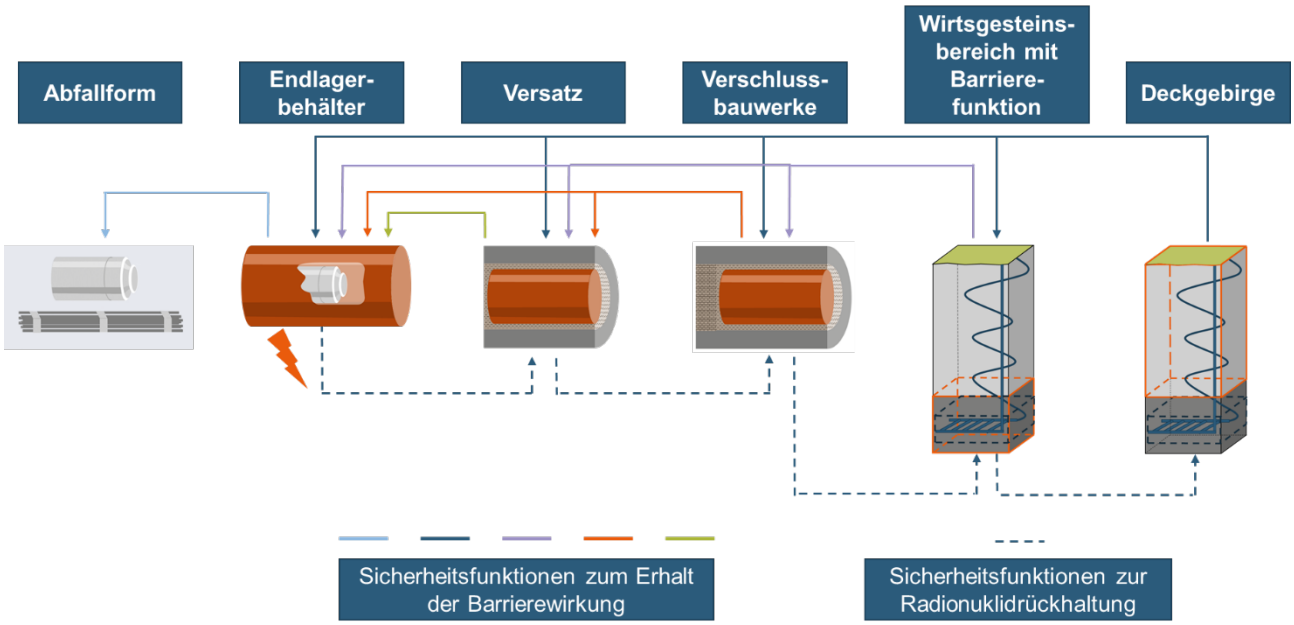


Abbildung 13: Die Abbildung stellt die Funktionsweise des gestaffelten Barrierensystems für das Endlagersystem Typ 1 dar.
Alle Elemente des Barrierensystems haben Sicherheitsfunktionen, die einerseits zum Erhalt der Barrierewirkung (durchgehende Pfeile, eine Farbe je Barriere) und andererseits zur Rückhaltung von Radionukliden (gestrichelte Pfeile) beitragen. Beispiel: Die Barriere Deckgebirge schützt durch ihre Sicherheitsfunktionen

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

(z. B.Mächtigkeit) sowohl die Barriere Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion, als auch die Verschlussbauwerke, den Versatz und den Endlagerbehälter und somit auch die Abfallform. Für alle weiteren dargestellten Barrieren gilt diese Funktionsweise gleichermaßen. Im Fall eines Integritätsverlusts eines Behälters, dargestellt durch einen roten Blitz, sorgen wiederum Sicherheitsfunktionen (z. B. Rückhaltung von Radionukliden durch Sorption), die für die Rückhaltung von Radionukliden verantwortlich sind, für einen allenfalls sehr langsamen Transport von Radionukliden. Die gestrichelten Pfeile deuten an, dass der Radionuklidtransport von den einzelnen Barrieren be- bzw. verhindert wird.

Welche Eigenschaften einer einzelnen Barriere (Komponente) oder welcher im Endlagersystem ablaufende Prozess zur Erfüllung der Sicherheitsanforderungen über welchen Zeitraum beitragen, ist abhängig von der Beschaffenheit der umgebenden geologischen Barrieren und den Entwicklungen des Endlagersystems. Da die geologischen Barrieren natürlich vorkommen, sind die Eigenschaften dieser Barrieren vorgegeben. Darüber hinaus ist die Wirkungsdauer der Sicherheitsfunktionen abhängig von den Sicherheitsanforderungen. So wird beispielsweise über die Sicherheitsanforderung *Bergbarkeit* die Anforderung an die minimale Wirkungsdauer der technischen Barrieren gestellt (mindestens 500 Jahre nach dem Verschluss des Endlagers) und über die Anforderung *Konzentration und sicherer Einschluss* in einem Endlagersystem Typ 1 der Erhalt der Sicherheitsfunktionen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs für den gesamten Bewertungszeitraum.

Bei der Darstellung der Barrieren und ihrer Sicherheitsfunktionen für die rvSU stehen diejenigen Sicherheitsfunktionen im Fokus, die zur Erfüllung der Anforderung ***Konzentration und sicherer Einschluss*** beitragen. Für diese Anforderung erfolgt bereits in den rvSU eine Überprüfung anhand des Massen- und Stoffmengenaustrages (§ 4 Abs. 5 EndlSiAnfV, vgl. Kapitel 4.1.1).

Im Folgenden sollen Barrieren und ihre Sicherheitsfunktionen beispielhaft dargestellt und erläutert werden. In Beispiel 2 findet dies exemplarisch anhand eines Endlagersystems Typ 1 statt.

Beispiel 2: *Darstellung der Barrieren und ihrer Sicherheitsfunktionen eines Endlagersystems Typ 1.*
Die dargestellten und beschriebenen Sicherheitsfunktionen basieren auf internationalen Sicherheitskonzepten (z. B. SKB 2011a; Posiva Oy & SKB 2017; Nagra 2008b, 2021), Sicherheitskonzepten aus nationalen Forschungs- und Entwicklungsvorhaben (z. B. Jobmann et al. 2017a; Buhmann et al. 2008; Mönig et al. 2012; Mönig et al. 2011; Alfarra et al. 2020b; Alfarra et al. 2020a) sowie auf der Stellungnahme der ESK (ESK 2019). Einige der beschrieben Sicherheitsfunktionen entsprechen dabei nicht, wie in § 2 Nr. 8 EndlSiAnfV definiert, einer Eigenschaft einer Komponente oder einem im Endlagersystem ablaufenden Prozess, sondern sind als zusammenfassende Aussagen für mehrere Eigenschaften oder Prozesse formuliert. Dies resultiert aus der frühen Phase des Standortauswahlverfahrens, die Sicherheitsfunktionen werden mit zunehmenden Detaillierungsgrad in den wvSU und den uvSU weiter spezifiziert werden.

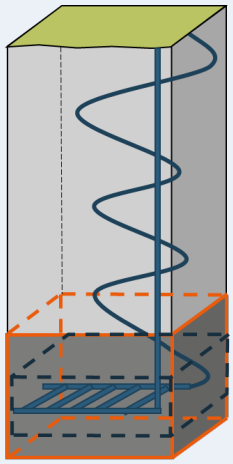
Beispielhafte Darstellung der Barrieren und ihrer Sicherheitsfunktionen eines Endlagersystems Typ 1

Der Bewertungszeitraum von einer Million Jahren eines Endlagers beginnt gemäß § 3 Abs. 1 EndlSiAnfV nach dem vorgesehenen Verschluss des Endlagers. Für mindestens diesen Zeitraum müssen die radioaktiven Abfälle sicher eingeschlossen werden. Um dieses Ziel zu erreichen, verfügt ein Endlager über ein gestaffeltes System aus verschiedenen Barrieren mit unterschiedlichen Sicherheitsfunktionen. Die unterschiedlichen Barrieren können jedoch, bedingt durch beispielsweise die Geologie, verwendete Materialien und durch im Endlager ablaufende chemische sowie physikalische Prozesse, unterschiedliche Zeiträume benötigen, bis sie ihre Schutzfunktion vollständig ausüben. Aus diesem Grund ist es, insbesondere in der frühen Phase nach dem vorgesehenen Verschluss, von besonderer Bedeutung, dass Teile des gestaffelten Barrierensystems ihre vollständige Schutzfunktion ausüben, um einen optimalen Verschluss des Endlagers nach der Stilllegung zu erreichen. Im Folgenden werden die einzelnen Barrieren, ihre Sicherheitsfunktionen sowie ihr zeitliches Zusammenwirken beispielhaft und wirtsgesteinsspezifisch beschrieben sowie Unterschiede dargestellt.

Beispielhafte Darstellung der Barrieren und ihrer Sicherheitsfunktionen eines Endlagersystems Typ 1

Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion

Tabelle 9: Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion

Barriere	Barriere und ihre Sicherheitsfunktionen	Darstellung der Barriere
Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion	**Erhalt der Barrierewirkung** • Hydraulische Gebirgsdurchlässigkeit • Selbstabdichtung von Klüften durch Konvergenz • Mechanische Langzeitstabilität • Korrosionshemmendes geochemisches Milieu	
	Rückhaltung von Radionukliden • Hydraulische Gebirgsdurchlässigkeit • Günstige geochemische Eigenschaften bezüglich der Rückhaltung von Radionukliden (durch Sorption)	

Im Endlagersystem Typ 1 erfüllt der Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion gemäß § 4 Abs. 3 EndlSiAnfV die Funktion der wesentlichen Barriere. Die radioaktiven Abfälle sollen im Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion dauerhaft konzentriert und eingeschlossen werden. Durch die jeweiligen geologischen, wirtsgesteinsspezifischen Eigenschaften ergeben sich für die drei Wirtsgesteine unterschiedliche Wirkungsweisen der Sicherheitsfunktionen. Hieraus ergibt sich z. B., dass die Sicherheitsfunktionen *hydraulische Gebirgsdurchlässigkeit*, *mechanische Langzeitstabilität* und *korrosionshemmendes geochemisches Milieu* für alle drei Wirtsgesteine hinsichtlich des Erhalts der Barrierewirkung relevant sind. Die Sicherheitsfunktion *hydraulische Gebirgsdurchlässigkeit* soll gewährleisten, dass keine Lösungen zu den Abfallgebinden vordringen können und nach dem Integritätsverlust der Behälter die Migration von Radionukliden be- bzw. verhindern. Die mineralogische Zusammensetzung sowie die individuelle Entwicklungsgeschichte der drei Wirtsgesteine sorgen dafür, dass Tongestein, Steinsalz sowie kristallines Wirtsgestein unterschiedliche Gebirgsdurchlässigkeiten aufweisen. Tongestein zeichnet sich durch eine geringe hydraulische Gebirgsdurchlässigkeit aus, der Stofftransport kann sowohl advektiv als auch diffusiv ablaufen. Aufgrund der sehr geringen Gebirgsdurchlässigkeiten in Tongesteinen dominiert der diffusive Stofftransport. Der diffusionsdominierte Stofftransport im Tongestein ist für die Sicherheit eines Endlagers von großer

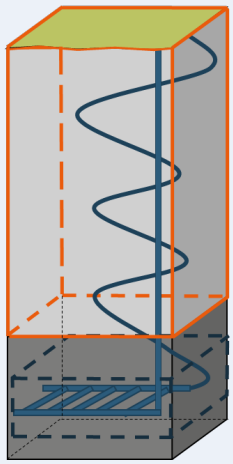
Beispielhafte Darstellung der Barrieren und ihrer Sicherheitsfunktionen eines Endlagersystems Typ 1

Bedeutung, um z. B. den Endlagerbehälter vor Lösungszutritt zu schützen. Steinsalz zeichnet sich durch eine sehr geringe/keine hydraulische Gebirgsdurchlässigkeit aus, so dass advektiver und diffusiver Stofftransport von Radionukliden aufgrund der oben beschriebenen Eigenschaften (Porosität, Permeabilität und Fluiddruck) vernachlässigt werden kann. Ein ungestörtes kristallines Wirtsgestein weist ebenfalls eine sehr geringe hydraulische Gebirgsdurchlässigkeit auf, sodass Stofftransport nur über Klüfte stattfinden kann. Durch die Sicherheitsfunktion *mechanische Langzeitstabilität* soll der Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion die Endlagerbehälter durch seine geologischen Eigenschaften schützen. Die Gewährleistung der mechanischen Langzeitstabilität hängt stark von der Geologie des jeweiligen Wirtsgesteins ab. So kann kristallines Wirtsgestein deutlich standsicherer sein als Tongestein und Steinsalz. Durch die Sicherheitsfunktion *korrosionshemmendes geochemisches Milieu* soll dazu beigetragen werden, dass der Endlagerbehälter vor Korrosion, beispielsweise durch Fluide aber auch durch bestimmte Mikroben geschützt wird, um einerseits die Integrität des Endlagerbehälter zu gewährleisten und andererseits korrosionsbedingte Gasbildung zu be- bzw. zu verhindern. Diese Sicherheitsfunktion kann nur im Zusammenwirken mit der Sicherheitsfunktion *hydraulische Gebirgsdurchlässigkeit* wirken, da diese einen möglichen Lösungszutritt zum Endlagerbehälter be- bzw. verhindern soll. Die Sicherheitsfunktion *Selbstabdichtung von Klüften durch Konvergenz* kann eher den Wirtsgesteinen Tongestein und Steinsalz zugeordnet werden. Die hydraulische Abdichtung von Öffnungen (z. B. durch Auffahrung) im Tongestein basiert wesentlich auf der Quellfähigkeit der Tonminerale. Im Gegensatz dazu wird diese Sicherheitsfunktion im Steinsalz durch, von der Teufe abhängige, Konvergenzbewegungen des über größere Zeiträume plastischen Steinsalzes erfüllt. Die Sicherheitsfunktion *günstige geochemische Eigenschaften bezüglich der Rückhaltung* (*durch Sorption*) ist für das Wirtsgestein Tongestein hinsichtlich der Rückhaltung von Radionukliden, im Fall eines Integritätsverlustes von Endlagerbehältern, besonders relevant, da die Rückhaltung, neben der Gebirgsdurchlässigkeit, zusätzlich durch die Immobilisierung von Radionukliden an den Oberflächen der Tonminerale (Sorption) erfolgt. Im Steinsalz bzw. im kristallinen Wirtsgestein erfolgt die Rückhaltung im Wesentlichen über die Gebirgsdurchlässigkeit.

Beispielhafte Darstellung der Barrieren und ihrer Sicherheitsfunktionen eines Endlagersystems Typ 1

Deckgebirge

Tabelle 10: Deckgebirge

Barriere	Barriere und ihre Sicherheitsfunktionen	Darstellung der Barriere
Deckgebirge	**Erhalt der Barrierewirkung** • Mächtigkeit • Hydraulische Gebirgsdurchlässigkeit • Mechanische Langzeitstabilität • Schutz vor geogenen Prozessen (z. B. Erosion, Subrosion)	
	Rückhaltung von Radionukliden • Hydraulische Gebirgsdurchlässigkeit • Günstige geochemische Eigenschaften bezüglich der Rückhaltung (durch Sorption)	

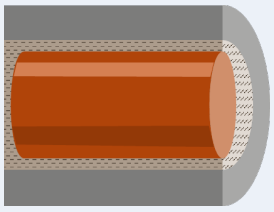
Das Deckgebirge sowie das Nebengebirge sollen die wesentliche(n) Barriere(n) sowie die darin enthaltenen weiteren Barrieren schützen. Durch die Sicherheitsfunktion *Mächtigkeit* des Deckgebirges werden die radioaktiven Abfälle einerseits von der Biosphäre und somit auch vom menschlichen Lebensraum getrennt. Hierdurch soll sichergestellt werden, dass die radioaktiven Abfälle vor einem menschlichen Eindringen möglichst geschützt werden. Andererseits wird sichergestellt, dass die Abfälle ebenfalls vor der Auswirkung von geogenen Prozessen, z. B. bedingt durch Änderungen des Klimas, geschützt werden. Der Zutritt von Fluiden soll insbesondere durch die Sicherheitsfunktion *hydraulische Gebirgsdurchlässigkeit* begrenzt werden. Des Weiteren gewährleistet die Sicherheitsfunktion *mechanische Langzeitstabilität* in Kombination mit der Sicherheitsfunktion *Schutz vor geogenen Prozessen* den Schutz des Wirtsgesteinsbereichs mit Barrierefunktion und der darin enthaltenen weiteren Barrieren. Im Falle eines Integritätsverlusts des Wirtsgesteinsbereichs mit Barrierefunktion und der darin liegenden technischen und geotechnischen Barrieren, soll das Deckgebirge ebenfalls für eine Be- oder Verhinderung der Radionuklidausbreitung durch die Sicherheitsfunktionen *hydraulische Gebirgsdurchlässigkeit* sowie *günstige geochemische Eigenschaften bezüglich der Rückhaltung* (*durch Sorption*) sorgen. Auch beim Deckgebirge treten durch die jeweiligen geologischen, gesteinsspezifischen Eigenschaften unterschiedliche Wirkungsweisen der Sicherheitsfunktionen auf. Diese sind bereits für den Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion ausführlich beschrieben und können auf das Deckgebirge, sofern es sich hierbei um Tongestein,

Beispielhafte Darstellung der Barrieren und ihrer Sicherheitsfunktionen eines Endlagersystems Typ 1

Steinsalz oder Kristallin handelt, übertragen werden. Sollte das Deckgebirge aus anderen Gesteinsarten bestehen, sollten die beschriebenen Sicherheitsfunktionen ebenfalls den Erhalt der Barrierewirkung sicherstellen und im Falle eines Integritätsverlusts des Wirtsgesteinsbereichs mit Barrierefunktion und der darin liegenden technischen und geotechnischen Barrieren so wirken, dass der sichere Einschluss gewährleistet ist.

Versatz

Tabelle 11: Versatz im Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion

Barriere	Barriere und ihre Sicherheitsfunktionen	Darstellung der Barriere
Versatz im Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion	**Erhalt der Barrierewirkung** • Abdichtung von Hohlräumen • Mechanische Langzeitstabilität • Hydraulische Durchlässigkeit • Korrosionshemmendes geochemisches Milieu • Temperaturresistenz	
	Rückhaltung von Radionukliden • Hydraulische Durchlässigkeit • Günstige geochemische Eigenschaften bezüglich der Rückhaltung (Sorption)	

Generell soll durch die eingebrachten Versatzmaterialen die Verfüllung und somit Abdichtung von auffahrungsbedingten Hohlräumen (z. B. Einlagerungsstrecken, Risse) gewährleistet werden. Damit die Versatzmaterialen ihre Sicherheitsfunktion *Abdichtung von Hohlräumen* vollständig ausfüllen können, ist eine zunehmende Verbindung mit dem jeweiligen Wirtsgestein, z. B. durch Gebirgskonvergenz und damit Kompaktion des Versatzmaterials oder auch durch Quellen von Tonmineralen durch Kontakt mit Grundwasser (Aufsättigung), von großer Bedeutung. Die eingebrachten Versatzmaterialien sind abhängig von der Geologie des jeweiligen Wirtsgesteinsbereichs mit Barrierefunktion und sollten über die gleichen bzw. ähnlichen Eigenschaften wie das Wirtsgestein selbst verfügen (im Fall von kristallinem Wirtsgestein ist das nicht möglich). So wird im Tongestein typischerweise Bentonit (ebenfalls für das kristalline Wirtsgestein), ein quellfähiges Gemisch verschiedener Tonminerale, und im Steinsalz Salzgrus (feinkörniges Salzgesteinsmaterial) als Versatzmaterial verwendet. Die beschriebenen Versatzmaterialien spiegeln den aktuellen Stand der Forschung wider und sollten daher nicht als feststehende Planungsvarianten verstanden werden. Zusätzlich zur abdichtenden Funktion

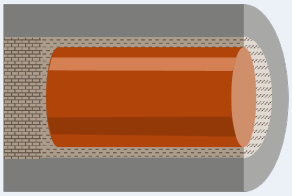
Beispielhafte Darstellung der Barrieren und ihrer Sicherheitsfunktionen eines Endlagersystems Typ 1

der Versatzmaterialien, sollen diese das Gebirge mechanisch stabilisieren und zu einer Verringerung von z. B. Rissbildungen und Gebirgsbewegungen beitragen (Sicherheitsfunktion *Mechanische Langzeitstabilität*). Des Weiteren soll der Versatz den Endlagerbehälter vor mechanischer Belastung wie z. B. Auflast oder Scherbewegungen, schützen. Ähnlich wie beim Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion und dem Deckgebirge, soll die Sicherheitsfunktion *hydraulische Durchlässigkeit* gewährleisten, dass ein Lösungstransport von oder zu den Abfallgebinden so gering wie möglich ist. In der frühen Phase des Endlagers ist besonders die Begrenzung des Lösungszutritts von besonderer Bedeutung, um z. B. vorzeitige korrosive Prozesse zu verhindern. Nach dem Integritätsverlust der Behälter soll die Migration von Radionukliden be- bzw. verhindert werden. Je nach gewähltem Versatzmaterial, kann es auch hier zu Unterschieden hinsichtlich des Stofftransports kommen. Die Sicherheitsfunktion *hydraulische Durchlässigkeit* entfaltet ihre komplette Wirksamkeit allerdings erst, wenn das Versatzmaterial durch Kompaktion/Aufsättigung eine bestmögliche Abdichtung darstellt. Die Sicherheitsfunktion *Temperaturresistenz* beschreibt die Eigenschaft der Versatzmaterialien, die durch den radioaktiven Zerfall entstehende Wärmeentwicklung (zusammen mit der vorliegenden Gebirgstemperatur) bis zu einem gewissen Maß zu tolerieren, ohne dass es zu Schädigungen des Versatzes (z. B. Entwässerung mit folgender Rissbildung) kommt. Die beiden Sicherheitsfunktionen *korrosionshemmendes geochemisches Milieu* sowie *günstige geochemische Eigenschaften bezüglich der Rückhaltung (Sorption)* wurden bereits für den Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion ausführlich beschrieben. Auch beim Versatz ist zu erwähnen, dass die zuletzt genannte Sicherheitsfunktion nur für tonhaltige Versatzmaterialien gilt. Die Integritätsanforderungen an die verwendeten Versatzmaterialien beziehen sich im Wesentlichen auf den Zeitraum ab dem Ende der Bergbarkeit bis hin zum Ende des Bewertungszeitraums. Dies gilt sowohl für die Sicherheitsfunktionen, die den Erhalt der Barrierewirkung, als auch für die, die die Rückhaltung von Radionukliden gewährleisten. Allerdings können die verwendeten Versatzmaterialien auch schon vor diesem Zeitraum zum sicheren Einschluss beitragen, da einige Sicherheitsfunktionen, wie z. B. *Abdichtung von Hohlräumen* oder *mechanische Langzeitstabilität,* bereits vorher wirken können. Dies hängt von einigen Faktoren, wie z. B. der Temperatur, der Kornverteilung und der Geschwindigkeit der Gebirgskonvergenz des jeweiligen Wirtsgesteins, ab. Die entsprechenden Konzeptionen für einen optimalen sicheren Einschluss der Abfälle werden während des Standortauswahlverfahrens kontinuierlich verbessert.

Beispielhafte Darstellung der Barrieren und ihrer Sicherheitsfunktionen eines Endlagersystems Typ 1

Verschlussbauwerke

Tabelle 12: Verschlussbauwerke im Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion und im Deckgebirge

Barriere	Barriere und ihre Sicherheitsfunktionen	Darstellung der Barriere
Verschlussbauwerke im Wirtsgestein	**Erhalt der Barrierewirkung** • Schutz vor unbeabsichtigtem menschlichem Eindringen • Mechanische Stabilität • Hydraulische Durchlässigkeit (möglichst sofortige Behinderung von Lösungszutritten)	
	Rückhaltung von Radionukliden • Hydraulische Durchlässigkeit • Günstige geochemische Eigenschaften bezüglich der Rückhaltung (Sorption)	

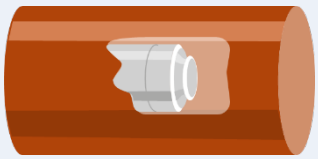
Als Verschlussbauwerke werden räumlich begrenzte Bauwerke bezeichnet, die an ausgewählten Stellen (z. B. Schächte und auch Einlagerungsstrecken) im Endlagerbergwerk aus verschiedenen Materialien und Funktionselementen (z. B. Dichtelementen und Widerlagern) errichtet werden. Ein Verschlussbauwerk soll seine abdichtende Funktion möglichst zeitnah nach Einbau erfüllen. Die Sicherheitsfunktion *Schutz vor unbeabsichtigtem menschlichem Eindringen* bezieht sich vor allem auf den Verschluss von Schächten, die das Endlager mit der Biosphäre verbinden. Diese werden mit Hilfe von unterschiedlichen Elementen so versiegelt, dass ein unbeabsichtigtes menschliches Eindringen erschwert werden soll. Des Weiteren sorgen die Verschlussbauwerke für eine *mechanische Stabilität*, indem sie die Versatzmaterialen in Position halten und somit langfristig dafür sorgen, dass das Versatzmaterial und das jeweilige Wirtsgestein den notwendigen Kontakt haben. Die Sicherheitsfunktion *hydraulische Durchlässigkeit* sorgt einerseits dafür, dass sowohl der Versatz als auch die Behälter möglichst zeitnah vor Lösungszutritten geschützt werden, da die verwendeten Versatzmaterialien eine gewisse Zeit benötigen können, um ihre Sicherheitsfunktion vollständig zu erfüllen. Andererseits dient diese Sicherheitsfunktion auch dazu, einen möglichen Radionuklidtransport zu be- bzw. zu verhindern, wenn ein oder mehrere Endlagerbehälter undicht werden sollten. Die Sicherheitsfunktion *günstige geochemische Eigenschaften bezüglich der Rückhaltung (Sorption)* wurde bereits für die vorherigen Barrieren ausführlich beschrieben. Basierend auf der Beschreibung der Sicherheitsfunktionen, müssen Verschlussbauwerke so zeitnah wie möglich nach Einbau

Beispielhafte Darstellung der Barrieren und ihrer Sicherheitsfunktionen eines Endlagersystems Typ 1

und mindestens so lange wirken, bis die verwendeten Versatzmaterialien im Zusammenwirken mit dem Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion ihre Funktionen vollkommen erfüllen.

Endlagerbehälter

Tabelle 13: Endlagerbehälter

Barriere	Barriere und ihre Sicherheitsfunktionen	Darstellung der Barriere
Endlagerbehälter	**Erhalt der Barrierewirkung** • Geringe Korrosionsraten • Mechanische Stabilität • Dichtheit (Begrenzung von Wasserzutritt) • Ausschluss von Kritikalität	
	Rückhaltung von Radionukliden • Rückhaltung von Radionukliden durch Sorption	

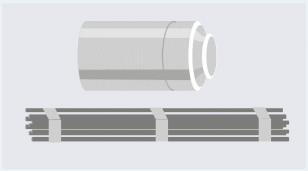
Der Endlagerbehälter soll den Einschluss der radioaktiven Abfälle in der Betriebsphase und mindestens bis zum Ende der Bergbarkeit gewährleisten. Die Integritätsanforderungen an den Endlagerbehälter ergeben sich aus dem StandAG und der EndlSiAnfV. Diese geben vor, dass die eingelagerten Endlagergebinde gemäß § 1 Abs. 4 StandAG sowie § 13 Abs. 1 EndlSiAnfV für den Zeitraum der Betriebsphase bzw. bis zum Beginn der Stilllegung des Endlagers rückholbar sein sollen. Weiterhin legen § 1 Abs. 4 StandAG sowie § 14 Abs. 1 EndlSiAnfV fest, dass ausreichende Vorkehrungen für eine Bergung der eingelagerten Abfallgebinde während der Stilllegung und für einen Zeitraum von 500 Jahren nach dem geplanten Verschluss getroffen werden müssen. Hieraus ergibt sich, dass der Endlagerbehälter einen Einschluss (vgl. Fußnote 12) der radioaktiven Abfälle für einen Zeitraum von mindestens 500 Jahren gewährleisten muss. Somit ist die Konzeption des Behälters, also der Behälterwerkstoff, die Dicke der verwendeten Materialien sowie das grundlegende Design des Behälters, von besonderer Relevanz. Das Zusammenspiel dieser Komponenten soll schließlich dazu führen, dass der Behälter hydraulisch *dicht* ist (auch gasdicht), sich durch *geringe Korrosionsraten* auszeichnet und eine generelle *mechanische Stabilität*, z. B. eine Toleranz gegenüber mechanischer Belastung, hervorgerufen durch z. B. Auflast oder Scherbewegungen, aufweist. Die Sicherheitsfunktion *Ausschluss von Kritikalität* stellt eine Hauptanforderung an die Sicherheit eines jeden Endlagergebindes dar, die sowohl während der Betriebsphase als auch während der Nach-

Beispielhafte Darstellung der Barrieren und ihrer Sicherheitsfunktionen eines Endlagersystems Typ 1

verschlussphase eine überaus wichtige Rolle spielt, um die Entstehung einer möglichen kritischen Anordnung zu verhindern. Für den Fall, dass ein Behälter undicht wird (Integritätsverlust der Behälter), können günstige Sorptionseigenschaften der Korrosionsprodukte (z. B. Eisenoxide/-hydroxide) ebenfalls dazu beitragen, dass ein Austrag von Radionukliden be- bzw. verhindert wird (*Rückhaltung von Radionukliden durch Sorption*). Diese Eigenschaft hängt jedoch einerseits vom Behälterwerkstoff und andererseits von der Bildung der Korrosionsprodukte unter den im Endlagerbergwerk gegebenen Bedingungen ab.

Abfallform

Tabelle 14: Abfallform

Barriere	Barriere und ihre Sicherheitsfunktionen	Darstellung der Barriere
Abfallform	**Erhalt der Barrierewirkung** • Fixierung der Radionuklide	
	Rückhaltung von Radionukliden • Begrenzung der Korrosionsraten	

Die Abfallform soll eine (möglichst) *langfristige Fixierung der Radionuklide* gewährleisten. Nach dem Integritätsverlust der Behälter können Radionuklide aus den Endlagergebinden freigesetzt werden. Durch die Sicherheitsfunktion *Begrenzung von Korrosionsraten* der Abfallform sollen die Freisetzungsraten von Radionukliden aus der Abfallform möglichst begrenzt werden. Die dafür wichtigen Barrieren in der Abfallform sind für Kokillen aus der Wiederaufarbeitung neben der äußeren Edelstahlkokille auch die Glasmatrix, die die hochaktiven Spaltprodukte lösungssicher einschließt. Für die Brennelemente aus den Leistungsreaktoren bilden die Hüllrohre die äußere technische Barriere um die keramische Oxidmatrix, in der Radionuklide eingeschlossen sind. Für Brennelemente und Brennstäbe aus den Forschungs-, Versuchs- und Prototypreaktoren sind ebenfalls der Brennstoff an sich und ggf. Hüllrohre oder Beschichtungen aus verschiedenen Materialien als Barrieren gegen eine Freisetzung der Radionuklide vorhanden (Details zum Abfallinventar siehe Kapitel 2).

4.2 Vorläufige Auslegung des Endlagers

Die in diesem Kapitel beschriebene vorläufige Auslegung des Endlagers gemäß § 6 Abs. 4 EndlSiUntV schließt den Teil der Grundlagenerarbeitung im Rahmen der rvSU ab und liefert wichtige Eingangsgrößen für die Analyse des Endlagersystems (§ 7 EndlSiUntV), siehe Abbildung 14.

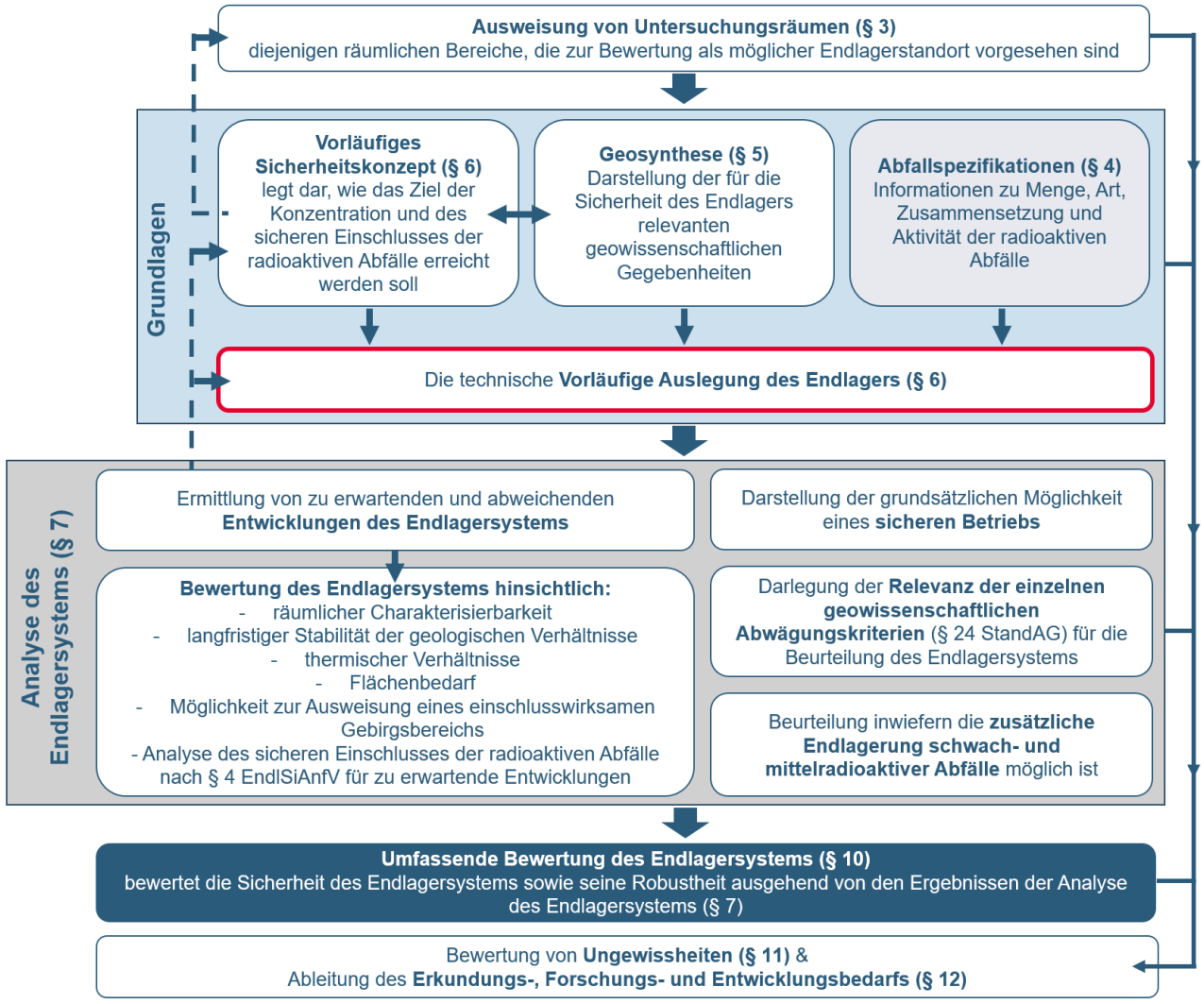


Abbildung 14: Einordnung der vorläufigen Auslegung des Endlagers in den Kontext der rvSU. Die Abfallspezifikationen müssen einmalig zusammengestellt werden, während alle anderen Arbeitsschritte (§§ 5 bis 12) je Untersuchungsraum durchzuführen sind.

4.2.1 Einleitung

Für jeden Untersuchungsraum ist in Übereinstimmung mit dem vorläufigen Sicherheitskonzept eine vorläufige Auslegung des Endlagers zu erstellen, die in den rvSU gemäß § 6 Abs. 4 EndlSiUntV folgende Inhalte umfassen muss:

1. *„die Beschreibung der wesentlichen Barrieren nach § 4 Abs. 3 EndlSiAnfV, deren grundlegende Eigenschaften und deren räumliche Erstreckung sowie die Beschreibung der weiteren Barrieren des Endlagersystems,*
2. *die maximale Größe eines möglichen Endlagerbergwerkes, einschließlich der Zugangs- und Bewetterungsbauwerke und der Infrastrukturbereiche, sowie die geplante Tiefenlage,*
3. *die geplante Art der Einlagerung,*
4. *mögliche Maßnahmen zur Gewährleistung der Rückholbarkeit bereits eingelagerter Endlagergebinde,*
5. *mögliche Verschluss- und Versatzmaßnahmen und*
6. *mögliche Maßnahmen zur Geringhaltung der Schädigung der wesentlichen Barrieren während der Erkundung, der Errichtung, dem Betrieb und der Stilllegung des Endlagers.“*

Trotz des reduzierten Detaillierungsgrades der vorläufigen Auslegung des Endlagers im Rahmen der rvSU gegenüber den Inhalten gemäß § 11 EndlSiAnfV ist die Durchführung aufgrund der hohen Anzahl der zu bearbeitenden Untersuchungsräume bzw. Teiluntersuchungsräume sowie der großen Fläche, die diese abdecken, eine große Herausforderung. In den rvSU müssen für alle auf Grundlage der jeweiligen Geosynthese potenziell geeigneten Gebiete vorläufige Auslegungen des Endlagers durchgeführt werden. Allerdings liegen in dieser frühen Phase des Standortauswahlverfahrens nur wenig spezifische Daten für die einzelnen Untersuchungsräume bzw. Teiluntersuchungsräume vor. Um dieser Herausforderung zu begegnen, wurde eine 2-stufige Methodik zur Erarbeitung von vorläufigen Auslegungen des Endlagers entwickelt, die in Kapitel 4.2.2 zusammenfassend beschrieben wird. Anschließend werden ab Kapitel 4.2.3 die einzelnen Schritte der Vorgehensweise der wirtsgesteinsspezifischen Auslegung im Detail beschrieben und mit Beispielen dazu und zur (teil-)untersuchungsraumspezifischen Auslegung ergänzt.

Zum derzeitigen Stand der Methodenentwicklung zur vorläufigen Auslegung des Endlagers für die rvSU werden folgende Punkte zugrunde gelegt:

1. Die hier vorgestellte grundlegende Methodik ist allgemeingültig für die Erarbeitung vorläufiger Auslegungen von Endlagern in allen in Betracht kommenden Wirtsgesteinen. In den Ausführungen zu einzelnen Aspekten der Endlagerauslegung wird im Rahmen dieser Methodenentwicklung nur auf Endlagersysteme des Typ 1 eingegangen (vgl. Kapitel 4.1). Dabei wird die grundsätzliche Auslegung für die Wirtsgesteine Tongestein und Steinsalz detaillierter beschrieben, und anhand von Beispielen speziell für den Opalinuston und eine Salzformation in steiler Lagerung erläutert.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

2. Das kristalline Wirtsgestein wird in den hier gezeigten Beispielen zur vorläufigen Auslegung des Endlagers noch nicht betrachtet. Die hier vorgestellte grundlegende Methodik zur Erarbeitung von vorläufigen Auslegungen des Endlagers kann auch auf ein Endlagersystem Typ 2 angewendet werden. Die besonderen Herausforderungen bei der Entwicklung von Endlagerkonzepten in kristallinem Wirtsgestein sind in Anhang 2 dargestellt.
3. Die Teufenbereiche, die aktuell bei den vorläufigen Endlagerauslegungen und damit in den Berechnungen zur Bestimmung der maximalen Größe eines möglichen Endlagerbergwerks innerhalb der rvSU berücksichtigt werden, sind 350 m bis 900 m für Tongestein (Opalinuston) und 450 m bis 1 200 m für Steinsalz (in steiler Lagerung). Die Festlegung eines im Rahmen der vorläufigen Endlagerauslegung zu betrachtenden Teufenbereiches für kristallines Wirtsgestein steht noch aus.

4.2.2 Zusammenfassende Beschreibung der Methodik für die vorläufige Auslegung des Endlagers

Das Vorgehen der 2-stufigen Methodik ist in Abbildung 15 und Abbildung 16 schematisch dargestellt. Im ersten Teil wird die vorläufige Auslegung des Endlagers grundlegend, wirtsgesteinsspezifisch und unabhängig von den weiteren geologischen Gegebenheiten der einzelnen Untersuchungsräume bzw. Teiluntersuchungsräume durchgeführt, siehe Abbildung 15. Ziel ist es, pro Wirtsgestein den Endlagerflächenbedarf als Funktion der initialen Temperatur im Einlagerungsbereich T_{EB}, also der Temperatur vor Beginn der Einlagerung der wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle, und der Teufenlage des Endlagers zu erarbeiten. Im anschließenden zweiten Teil wird die wirtsgesteinsspezifische Endlagerauslegung mit (teil-)untersuchungsraumspezifischen Daten zu den geologischen Barrieren, Teufe und T_{EB} an den jeweiligen Untersuchungsraum bzw. Teiluntersuchungsraum angepasst, siehe Abbildung 16.

Zu Beginn des ersten Teils der Methodik müssen einige Grundlagen zur Verfügung stehen (siehe Kapitel 4.2.3). Dazu zählen die Inventardaten des endzulagernden hochradioaktiven Abfalls (HAA), also Informationen über dessen Art, Menge und Eigenschaften (siehe Kapitel 2), typische Wirtsgesteinseigenschaften sowie das vorläufige Sicherheitskonzept des Endlagersystems (siehe Kapitel 4.1).

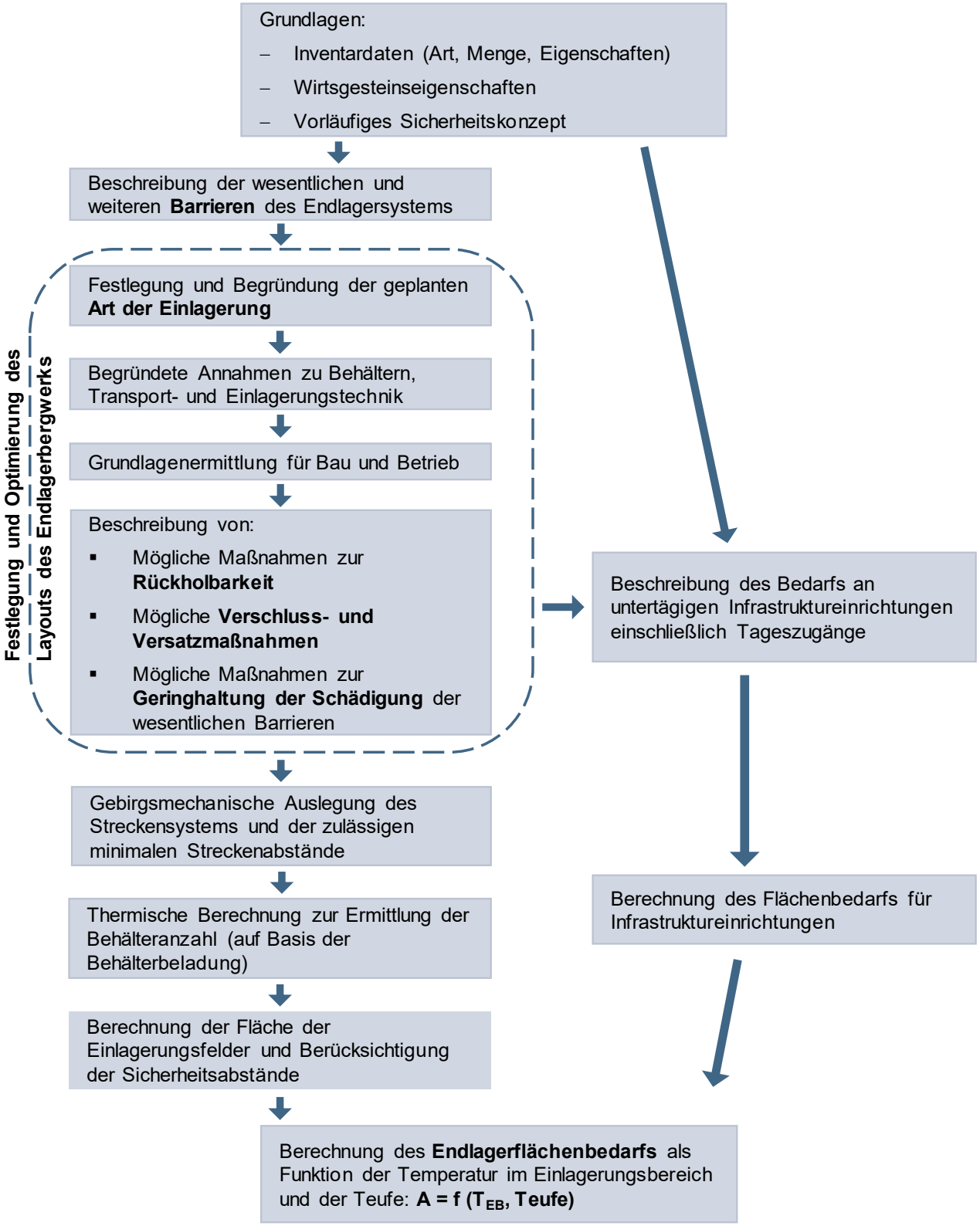


Abbildung 15: Schematische Darstellung der Methodik zur wirtsgesteinsspezifischen vorläufigen Endlagerauslegung im Rahmen der rvSU (Teil 1 der Methodik)

Mit diesen Grundlagen erfolgen die vorläufigen Endlagerauslegungen nach § 6 Abs. 4 EndlSiUntV zunächst wirtsgesteinsspezifisch. Im ersten Schritt einer jeden vorläufigen Endlagerauslegung werden auf Basis des zugrundeliegenden vorläufigen Sicherheitskonzepts (siehe Kapitel 4.1) die wesentlichen und weiteren Barrieren des Endlagersystems beschrieben, siehe Kapitel 4.2.4. Es folgt für die verschiedenen Wirtsgesteine die vorläufige Festlegung der geplanten Art der Einlagerung, also wie die hochradioaktiven Abfälle in ein Endlagerbergwerk eingelagert werden sollen. Die Begründung der vorläufigen Festlegung erfolgt dabei verbalargumentativ unter Berücksichtigung der Aspekte Betriebs- und Langzeitsicherheit, technische Reife und Robustheit der Einlagerungsart sowie Rückholbarkeit, siehe Kapitel 4.2.5. Mit der Festlegung der geplanten Einlagerungsart beginnen auch die Arbeiten zur Festlegung und Optimierung des Layouts des Endlagerbergwerks für die rvSU. In die Bearbeitung des Layouts gehen zudem Aspekte aus den nachfolgenden drei Schritten der vorläufigen Endlagerauslegung ein (vgl. gestrichelte Umrandung in Abbildung 15).

So werden im nächsten Schritt auf Grundlage der Beschreibung der wesentlichen und weiteren Barrieren sowie der geplanten Art der Einlagerung begründete Annahmen zum Endlagerbehälter sowie der entsprechenden Transport- und Einlagerungstechnik getroffen, siehe Kapitel 4.2.6.2 und Kapitel 4.2.6.3. Konkrete Endlagerbehälterkonzepte, die die hohen Anforderungen nach deutschem Recht (insbesondere hinsichtlich Rückholbarkeit und Bergbarkeit) nachweisbar erfüllen können (BGE 2021b), liegen derzeit noch nicht vor, die Entwicklung von entsprechenden Endlagerbehälterkonzepten befindet sich jedoch in der Vorbereitung. Daher werden ausschließlich begründete Annahmen und Analogieschlüsse zum Behälterkonzept sowie zur Transport- und Einlagerungstechnik aus Ergebnissen von Forschungsarbeiten und anderen Endlagerprojekten formuliert. Mit der geplanten Art der Einlagerung, den Behälterannahmen und der Transport- und Einlagerungstechnik liegen die ersten Aspekte zur Erarbeitung des prinzipiellen Layouts, also einer Vorstellung des Aufbaus des Endlagerbergwerks, vor.

Mit den weiteren Schritten wird das Layout des Endlagerbergwerks weiterentwickelt und optimiert. Dabei werden zunächst die Grundlagen zum Bau und Betrieb des auszulegenden Endlagers ermittelt, siehe Kapitel 4.2.6.4. Anschließend werden durch die Beschreibungen von möglichen Maßnahmen zur Rückholbarkeit, möglichen Verschluss- und Versatzmaßnahmen und möglichen Maßnahmen zur Geringhaltung der Schädigung der geologischen Barrieren weitere Teile der vorläufigen Auslegung des Endlagers erarbeitet, siehe Kapitel 4.2.6.5 bis Kapitel 4.2.6.7. Bei der Planung wird geprüft, ob die einzelnen Aspekte Auswirkungen oder Rückwirkungen auf andere Aspekte haben. Dementsprechend werden die einzelnen Planungsteile angepasst bzw. überarbeitet. Zusätzlich erfolgt gemäß Abbildung 15 die Beschreibung der notwendigen untertägigen Infrastruktureinrichtungen einschließlich der Tageszugänge und einer abgeschätzten Flächenbedarfsbestimmung in Abhängigkeit der Teufe, siehe Kapitel 4.2.6.8. Auf Basis der bis hierhin erarbeiteten Aspekte kann das grundsätzliche Layout des Endlagerbergwerks für die rvSU abschließend festgelegt werden.

Anhand des grundsätzlichen Layouts des Endlagerbergwerks ist ersichtlich, an welchen Stellen gebirgsmechanische Berechnungen zur Ermittlung zulässiger minimaler Streckenabstände notwendig sind, siehe Kapitel 4.2.7. Hierbei werden mögliche Arten von Streckenausbauten berücksichtigt. Auf-

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

grund der unzureichenden Datengrundlage im aktuellen Verfahrensschritt bezüglich der felsmechanischen Eigenschaften der Wirtsgesteins- und Deckgebirgsschichten werden überschlägige Berechnungen mit Werten, die für das jeweilige Wirtsgestein repräsentativ sind, durchgeführt. Die minimal zulässigen Abstände sind insbesondere abhängig vom Gebirgsdruck und damit von der Teufe des Einlagerungsbereichs.

Die Ausarbeitungen zum Layout des Endlagerbergwerks und die Annahmen zu den Endlagerbehältern bilden zusammen mit den Ergebnissen der gebirgsmechanischen Berechnung den Ausgangspunkt für Bemessungen zur Ermittlung der maximalen Größe eines möglichen Endlagerbergwerks, siehe Kapitel 4.2.8. Dazu gehört insbesondere die thermische Berechnung der notwendigen Anzahl an Endlagerbehältern pro Abfallart in Abhängigkeit von der initialen Temperatur im Einlagerungsbereich T_{EB}, der Teufe, dem Streckenabstand sowie dem Behälterabstand und der Behälterbeladung. Auslegungskriterium ist hierbei die gemäß § 27 Abs. 4 StandAG derzeitig geltende Grenztemperatur von 100 °C an der Außenfläche der Behälter. Auf Grundlage der Streckenabstände, Behälterabstände und -anzahl der einzelnen Abfallarten erfolgt die Berechnung des Flächenbedarfs der Einlagerungsfelder. Zusätzlich werden auch die Sicherheitsabstände des Endlagers berücksichtigt. Die Sicherheitsabstände sind Abgrenzungen zum umgebenden Neben- und Deckgebirge und müssen im intakten Wirtsgestein liegen. Die sich daraus ergebenen Mindestabstandsflächen werden zum Flächenbedarf des Endlagerbergwerks hinzuaddiert.

Im letzten Schritt des ersten Teils der Methodik werden die Ergebnisse der wirtsgesteinsspezifischen Auslegung zusammengeführt und der gesamte Endlagerflächenbedarf als Funktion der initialen Temperatur im Einlagerungsbereich T_{EB} und der Teufe grafisch dargestellt, siehe Kapitel 4.2.8.7.

Bei der Bearbeitung der beschriebenen Schritte wird die wirtsgesteinsspezifische Auslegung des Endlagers in Hinblick auf Betriebs- und Langzeitsicherheit optimiert. Damit ist die wirtsgesteinsspezifische vorläufige Endlagerauslegung abgeschlossen.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

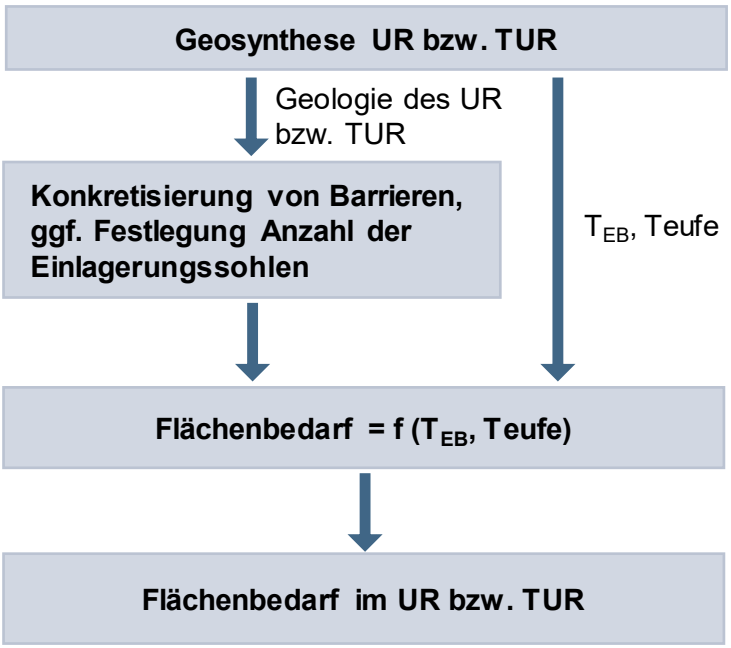


Abbildung 16: Schematische Darstellung der Methodik zur (teil-)untersuchungsraumspezifischen vorläufigen Endlagerauslegung im Rahmen der rvSU (Teil 2 der Methodik)

Mit dem zweiten Teil der Methode wird die wirtsgesteinsspezifische vorläufige Auslegung des Endlagers hinsichtlich des jeweils zu betrachteten Untersuchungsraums bzw. Teiluntersuchungsraums fortgeführt und angepasst, siehe Abbildung 16. Aufgrund der Informationen zur Geologie (z. B. räumliche Erstreckung des Wirtsgesteinsbereichs mit Barrierefunktion, der einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich aufnehmen kann, und Informationen zum Deckgebirge) aus der Geosynthese des Untersuchungsraums bzw. Teiluntersuchungsraums (siehe Kapitel 5.7) werden die Beschreibungen der entsprechenden Barrieren konkretisiert. Zusätzlich muss auf Basis der horizontalen und vertikalen Ausdehnung des Wirtsgesteinsbereichs mit Barrierefunktion ggf. entschieden werden, ob die Einlagerung auf ein oder auf zwei Einlagerungssohlen stattfinden soll. Sollte diese Option bei einem der Wirtsgesteine grundsätzlich in Frage kommen, so werden bei allen Aspekten der wirtsgesteinsspezifischen Auslegung des Endlagers bereits beide Optionen verfolgt.

In einem weiteren Schritt werden aus der entsprechenden Geosynthese Informationen zur Teufe des Wirtsgesteinsbereichs mit Barrierefunktion im jeweiligen Untersuchungsraums bzw. Teiluntersuchungsraums sowie der zugehörigen initialen Temperatur im Einlagerungsbereich entnommen. Unter Verwendung dieser ortspezifischen Daten wird mit der im Rahmen von Teil 1 der Methodik erarbeiteten wirtsgesteinsspezifischen Flächenbedarfsfunktion der Flächenbedarf für den Untersuchungsraum bzw. Teiluntersuchungsraum ermittelt. Der ermittelte Flächenbedarf bildet eine Grundlage für die gemäß § 7 EndlSiUntV durchzuführenden Bewertungen im Rahmen der Analyse des geplanten Endlagersystems (vgl. Kapitel 8).

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

4.2.3 Grundlagen

4.2.3.1 Abfallinventar

Innerhalb der vorläufigen Auslegung des Endlagers ist ein genauer Kenntnisstand über das einzulagernde Abfallinventar essentiell, um den Flächenbedarf für das Endlager möglichst präzise abschätzen zu können. Die prognostizierten Abfallmengen pro Inventarart werden durch das sog. Abfallmengengerüst spezifiziert. Auf Basis des Abfallmengengerüstes kann der Flächenbedarf für die Einlagerungsfelder abgeschätzt werden. Für die Abfallinventararten mit signifikanter Wärmefreisetzungsrate sind zudem Approximationen der zeitlich veränderlichen Wärmeleistungen notwendig, da diese eine wesentliche Eingangsgröße in den Simulationsmodellen zur Flächenbedarfsberechnung darstellen. Detaillierte Informationen zum Abfallinventar finden sich im Kapitel 2.

4.2.3.2 Wirtsgesteinseigenschaften

Für die wirtsgesteinsspezifische Abschätzung der Flächenbedarfe sind insbesondere die thermophysikalischen sowie die gebirgsmechanischen Eigenschaften der Wirtsgesteine von Bedeutung. Die einzelnen Wirtsgesteine weisen eine sehr unterschiedliche Charakteristik hinsichtlich ihrer Materialparameter auf, wodurch auch die finalen Flächenbedarfsprognosen wesentlich beeinflusst werden. Die gebirgsmechanischen Kennwerte (z. B. Druckfestigkeit) gehen insbesondere in die Abschätzung der notwendigen Pfeilergrößen für das Endlagerbergwerk ein. Eine ausführliche Beschreibung zu dieser Thematik findet sich in Kapitel 4.2.7 Die thermophysikalischen Parameter (z. B. Wärmeleitfähigkeit) fließen in die Flächenbedarfsberechnungen der wärmeentwickelnden Abfallarten mit ein. Hierzu finden sich ausführlichere Informationen in Kapitel 4.2.8.

4.2.3.3 Sicherheitskonzept

Gemäß § 6 Abs. 1 EndlSiUntV muss in den rvSU ein vorläufiges Sicherheitskonzept für jeden Untersuchungsraum erstellt werden Das Sicherheitskonzept eines Endlagersystems gibt die wesentliche Strategie wieder, mit der das Ziel der Konzentration und des sicheren Einschlusses der radioaktiven Abfälle nach § 4 Abs. 1 EndlSiAnfV erreicht werden soll. Dabei muss das Sicherheitskonzept alle Phasen des Endlagersystems von Errichtung über Betrieb und Stilllegung bis in die Nachverschlussphase abdecken (§ 10 Abs. 1 EndlSiAnfV). Das Kernstück des vorläufigen Sicherheitskonzeptes ist die Darstellung der Barrieren des Endlagersystems und deren Sicherheitsfunktionen. Dieses wird zunächst wirtsgesteinsspezifisch erarbeitet, vgl. Kapitel 4.1. Damit dient das vorläufige Sicherheitskonzept als Grundlage für die Beschreibung der wesentlichen und weiteren Barrieren bei der wirtsgesteinsspezifischen und der (teil-)untersuchungsraumspezifischen vorläufigen Auslegung des Endlagers.

4.2.4 Beschreibung der wesentlichen und weiteren Barrieren des Endlagersystems

Eine ausführliche Beschreibung der Barrieren, ihrer Sicherheitsfunktionen und der Einteilung in wesentliche und weitere Barrieren erfolgt in Kapitel 4.1, weshalb innerhalb der Methodenbeschreibung zur vorläufigen Auslegung des Endlagers nicht erneut auf die Grundlagen zum Barrierensystem ein-

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

gegangen wird. Wie in Kapitel 4.2.1 beschrieben, erfolgt die wirtsgesteinsspezifische vorläufige Auslegung des Endlagers zunächst für alle Wirtsgesteinsvarianten entsprechend des Endlagersystems Typ 1. Grundsätzlich werden dabei folgende Barrieren betrachtet:

- geologische Barrieren: der Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion sowie das Deck- und Nebengebirge
- geotechnische Barrieren: der Versatz und die Verschlussbauwerke
- technische Barrieren: der Endlagerbehälter und die Abfallform

Im Rahmen der wirtsgesteinsspezifischen vorläufigen Auslegung des Endlagers werden unter Bezugnahme auf das jeweilige vorläufige Sicherheitskonzept und gemäß der Vorgabe nach § 6 Abs. 4 Nr. 1 EndlSiUntV die wesentliche Barriere und deren grundlegende Eigenschaften beschrieben sowie die weiteren Barrieren, die grundsätzlich für das entsprechenden Wirtsgestein in Frage kommen, aufgezählt. Dabei werden die drei oben genannten Barrierearten den wesentlichen und weiteren Barrieren zugeordnet und wirtsgesteinsspezifisch beschrieben.

Eine Konkretisierung der Beschreibung der wesentlichen (z. B. räumliche Erstreckung) und weiteren Barrieren (z. B. Neben- und Deckgebirge) erfolgt mit dem zweiten Teil der Methodik in der für einen Untersuchungsraum bzw. Teiluntersuchungsraum angepassten vorläufigen Auslegung des Endlagers, siehe Abbildung 16 und Kapitel 4.2.10.

4.2.5 Geplante Art der Einlagerung

Für die Einlagerung von hochradioaktiven Abfällen sind international im Wesentlichen drei Konzepte bekannt, wobei sich die technische Ausgestaltung im Einzelnen von Land zu Land unterscheidet. Die erwähnten drei wesentlichen Konzepte sind:

- die Einlagerung in horizontalen Strecken
  (so vorgesehen z. B. in der Schweiz durch NAGRA (Nagra 2002c)),
- die Einlagerung in horizontalen Bohrlöchern
  (so vorgesehen z. B. in Frankreich durch ANDRA (Andra 2020)),
- die Einlagerung in vertikalen Bohrlöchern
  (so vorgesehen z. B. in Schweden und Finnland durch SKB und Posiva Oy (SKB 2010)).

Grundsätzlich sind der sichere Betrieb und eine langzeitsichere Endlagerung in all diesen Varianten vorstellbar. Die technische Umsetzung der Einlagerungsarten in den jeweiligen Ländern lässt sich jedoch nicht direkt auf die vorläufige Endlagerauslegung im Rahmen der rvSU übertragen, da sich insbesondere Abfallarten und damit Endlagerbehälterkonzepte von Land zu Land deutlich unterscheiden. Darüber hinaus fand in den meisten Ländern eine frühe Festlegung auf ein Wirtsgestein statt, wodurch eine frühe Spezialisierung möglich war, die im Rahmen der rvSU nicht umsetzbar ist. Die Wahl der geplanten Art der Einlagerung für die rvSU orientiert sich deshalb an der technischen Umsetzung, wie sie in der Forschung und Entwicklung für ein Endlager in Deutschland bislang erarbeitet wurde.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

Komplexität, Robustheit und Reifegrad der entsprechenden Technologien sind wichtige Kriterien zur Unterscheidung. Die Einlagerungstechnik in Strecken wurde in den 90er Jahren erstmalig entwickelt. Ein Prototyp wurde gebaut und getestet und ist seitdem Stand der Technik (Engelmann et al. 1995). Sie basierte auf den abschirmenden Behältern des POLLUX® Systems (Bollingerfehr et al. 2012). Die horizontale Bohrlochlagerung wurde innerhalb Deutschlands erstmalig für flach lagernde Steinsalzformationen in (Bollingerfehr et al. 2018) konzeptionell betrachtet. Für die Streckenlagerung sprechen die höhere technische Reife, die einfachere und damit robuste Technik und das aus vielen Forschungsvorhaben (z. B. Bollingerfehr et al. 2018; Bertrams et al. 2017; Jobmann & Lommerzheim 2015)) bekannte Zusammenspiel zwischen Einlagerung, thermischer Endlagerauslegung und Verfüllkonzept. Bei der horizontalen Bohrlochlagerung kommen außerdem insbesondere im Steinsalz und Tongestein noch Anforderungen an die Bohrlochverrohrung hinzu, da Rückholbarkeit nach § 13 EndlSiAnfV dort nur mit einer stabilen Bohrlochverrohrung gewährleistet werden kann. Die bisher lediglich konzeptionelle Auslegung der horizontalen Bohrlochlagerung mit offenen Punkten in Bezug auf die Ausführung der Verrohrung und der Verfüllung des Bohrloches lassen die horizontale Bohrlochlagerung im Vergleich zur Streckenlagerung zum jetzigen Zeitpunkt als weniger geeignete Variante zur Verwendung im Rahmen der rvSU erscheinen.

Die Technik der vertikalen Bohrlochlagerung wurde hingegen bereits entwickelt, als Prototyp gebaut und getestet (Filbert et al. 2010). Die technische Reife ist damit vergleichbar zu der der Streckenlagerung und gilt als Stand der Technik. Auch wurde die vertikale Bohrlochlagerung in vielen Vorhaben der Forschung und Entwicklung im Zusammenhang mit Verfüll- und Verschlusskonzepten untersucht (z. B. Bertrams et al. 2017; Bollingerfehr et al. 2018; Lommerzheim & Jobmann 2015). Für die Endlagerauslegung im Rahmen der rvSU wird die Streckenlagerung dennoch auch gegenüber der vertikalen Bohrlochlagerung bevorzugt: Das Konzept der Einlagerung in vertikale Bohrlöcher sieht nicht-selbstabschirmende Behälter vor und erfordert eine höhere technische Komplexität aufgrund der größeren Anzahl notwendiger technischer Sicherheitskomponenten, z. B. eine Bohrlochschleuse und Sicherheitseinrichtungen gegen einen Absturz im Bohrloch. Darüber hinaus sollte auch bei der vertikalen Bohrlochlagerung bedacht werden, dass Endlagergebinde nach 500 Jahren noch erreichbar sein müssen.

Aufgrund der ausgeführten Abwägung wird für ein Endlagersystem Typ 1 (vgl. Kapitel 4.1), ein Endlagersystem bei dem der sichere Einschluss auf einem oder mehreren einschlusswirksamen Gebirgsbereichen beruht, innerhalb der rvSU die Einlagerung in Strecken präferiert. Im Fall eines begrenzten Platzangebots im Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion eines Endlagersystems Typ 1 (Steinsalz in steiler Lagerung) wird aufgrund entsprechender ortsspezifischer Informationen hingegen untersucht, ob die Streckenlagerung auf ein oder zwei Einlagerungssohlen geplant werden kann. Dieser Schritt erfolgt im Rahmen des zweiten Teils der Methodik, vgl. Abbildung 16 und Kapitel 4.2.10. Bei der Flächenbedarfsbestimmung innerhalb der wirtsgesteinsspezifischen Auslegung eines Endlagers in Steinsalz in steiler Lagerung müssen bereits beide Optionen berücksichtigt werden.

Eine historische Darstellung der Entwicklung der Transport- und Einlagerungstechnik sowie eine Weiter- bzw. Neuentwicklung nach aktuellem Stand der Technik der Varianten finden sich in

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

Bertrams et al. (2021). Beispiel 3 und Beispiel 4 erläutern die Abwägung jeweils für das Tongestein Opalinuston und Steinsalz in steiler Lagerung.

Beispiel 3: *Wirtsgesteinsspezifische Abwägung der Art der Einlagerung für das Tongestein Opalinuston*

Abwägung der Art der Einlagerung für das Tongestein Opalinuston

Gemäß der beschriebenen Abwägung wird im Opalinuston die Streckenlagerung für die rvSU vorgesehen. Das Konzept der Streckenlagerung im Opalinuston basiert auf der Ablage des Endlagergebindes auf einem Sockel (Jobmann & Lommerzheim 2015). Dieser wird aus Formsteinen errichtet. Durch den Sockel ist das Endlagergebinde nach Einlagerung und Verfüllung des Hohlraums in der Einlagerungsstrecke allseitig von Verfüllmaterial umgeben und kommt nicht in Kontakt mit dem Fahrbahn- oder Ausbaumaterial in der Sohle.

Beispiel 4: Wirtsgesteinsspezifische Abwägung der Art der Einlagerung für eine steile Salzformation

Abwägung der Art der Einlagerung für Steinsalz (steile Lagerung)

Gemäß der beschriebenen Abwägung wird in Steinsalz in steiler Lagerung für die rvSU ebenfalls Streckenlagerung als Art der Einlagerung gewählt. Das Flächenangebot in steilen Salzformationen kann ausreichend sein, um eine die Streckenlagerung auf einer Einlagerungssohle umzusetzen. Allerdings ist es auch möglich, dass das Flächenangebot im Wirtsgestein dafür zu klein ist. In diesem Fall wird die vertikale Bohrlochlagerung oder die Streckenlagerung auf zwei Einlagerungssohlen vorgesehen. Im GzME „Bahlburg“ (035_00TG_057_00IG_S_s_z) ist das Flächenangebot bspw. ausreichend für eine einsöhlige Streckenlagerung (Kapitel 4.2.10). Zur Lagestabilisierung des Behälters wird die Sohle aus Steinsalz der Form des Endlagergebindes leicht angepasst, sodass das Endlagergebinde ca. 5 cm in der Sohle versenkt wird. Nach der Einlagerung erfolgt die Verfüllung des Hohlraumes mit Salzgrus, damit der Behälter allseitig von Steinsalz umgeben ist.

4.2.6 Endlagerbergwerk

4.2.6.1 Allgemeiner Aufbau des Endlagerbergwerks

Auf Basis der regulatorischen Anforderungen, des Sicherheitskonzepts und der Art der Einlagerung wird im Folgenden beschrieben, wie Auslegungen von Endlagerbergwerken für die rvSU erarbeitet werden sollen. Der für die Endlagerung unter Tage verwendete Bereich des Endlagerbergwerks wird als Einlagerungsbereich bezeichnet. Um der Forderung aus § 18 Abs. 2 EndlSiAnfV Rechnung zu tragen, den Einlagerungsbereich gegen das restliche Endlagerbergwerk zu verschließen, werden

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

alle anderen notwendigen Bereiche des Bergwerks räumlich vom Einlagerungsbereich getrennt und im Infrastrukturbereich zusammengefasst.

Das Endlagerbergwerk (Abbildung 17) unterteilt sich also in zwei wesentliche Funktionsbereiche: Den Infrastrukturbereich und den Einlagerungsbereich. Im Infrastrukturbereich kommen die Tageszugänge an. Hier befinden sich die notwendigen Werkstätten, Lagerräume und Arbeitsplätze des Betriebspersonals unter Tage. In Abbildung 17 wird die für die Infrastrukturräume vorgesehene Fläche entsprechend markiert. Tageszugänge können als Schächte oder Rampen ausgeführt werden. Im Rahmen der rvSU werden zwei Schächte für den Zugang zum Endlager angenommen. Davon dient einer den konventionellen, betrieblichen Transporten, die Personal, Baustoffe, Maschinen(-teile) oder Werkzeuge umfassen können. Eine solche Schachtförderanlage ist Stand der Technik und kann sicher und über einen langen Zeitraum hinweg betrieben werden. Für die rvSU besteht keine Veranlassung, für diese Aufgaben auf eine deutlich längere Rampe auszuweichen, deren Transportleistung geringer ist und für die ein größerer Aufwand für Auffahrung, Einrichtung sowie Instandhaltung einzuplanen wäre. Der zweite Schacht dient dem Transport der Endlagergebinde. International werden hier verschiedene Ansätze verfolgt: einige Länder planen den Transport von hochradioaktiven Abfällen mit Schachtförderanlagen (z. B. Posiva Oy in Finnland, s. (Saanio et al. 2007)), andere mit Rampenfördertechnik (z. B. ANDRA in Frankreich, s. (Andra 2016a)). Beide Varianten wurden durch Auftragnehmer der NAGRA (Messmer & Berger 2014; Sindern & Borowski 2014; Wieser et al. 2014) als sicher für den Transport von hochradioaktiven Abfällen bewertet. Die Endlagerauslegung der rvSU geht auch hier zunächst von einem Schacht und damit von der technisch einfacheren Lösung aus.

Die Anzahl der Tageszugänge bleibt im Rahmen der rvSU auf zwei begrenzt. Mehr als zwei Schächte würden sicherlich aus rein betrieblicher Sicht Vorteile in der Wetterführung oder Steuerung der Betriebsprozesse bieten. Für die rvSU wird jedoch von zwei Schächten ausgegangen, um einerseits nach § 15 Abs. 1 ABBergV zwei Zugänge zur Tagesoberfläche vorzuhalten, aber andererseits auch nach § 6 Abs. 4 EndlSiUntV die wesentliche Barriere nur möglichst wenig durch die Erstellung von Tageszugängen zu schädigen. Zusätzliche Tageszugänge sind demnach auch für weitere Phasen der Standortsuche nur zulässig, wenn erhebliche, insbesondere sicherheitsgerichtete Gründe dafürsprechen.

Der Einlagerungsbereich wird aus dem Infrastrukturbereich durch zwei Richtstrecken erschlossen. Von diesen dient eine primär dem Transport der Endlagergebinde und von Verfüllmaterial. Die andere steht für weitere betriebliche und bergbauliche Tätigkeiten zur Verfügung. Diese strikte funktionale Trennung der beiden Richtstrecken dient dem betrieblichen Strahlenschutz und basiert auf der Einrichtung von Strahlenschutzbereichen nach § 52 Abs. 2 StrlSchV: einem Kontrollbereich in den Bereichen des Endlagerbergwerks, in denen mit Endlagergebinden umgegangen wird und einem Überwachungsbereich im übrigen Endlagerbergwerk. Darüber hinaus gibt es, wie bei den Schächten, weitere Gründe, zwei Richtstrecken vorzusehen, jedoch auch nicht mehr als zwei. Nach § 15 Abs. 2 ABBergV muss jede Betriebsstätte auf mindestens zwei (Flucht-)wegen verlassen werden können. Nach § 18 Abs. 3 EndlSiAnfV sind die Handhabung von Endlagergebinden und bergmännische Arbeiten voneinander zu trennen. Beide Anforderungen können durch das genannte

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

Richtstreckensystem erfüllt werden. Darüber hinaus sind zwei Richtstrecken für die Einrichtung der Wetterführung notwendig, um den Einlagerungsbereich mit frischen Wettern (Frischluft) zu versorgen und Abwetter (verbrauchte Luft) abzuführen. Wie bei den Schächten wird auf weitere Richtstrecken zur Erleichterung betrieblicher Prozesse im Rahmen der vorläufigen Endlagerauslegung für die rvSU verzichtet, um nach § 6 Abs. 4 EndlSiUntV die wesentliche Barriere nicht durch die Erstellung von zusätzlichen Strecken mehr als nötig zu schädigen.

Beide Richtstrecken werden in regelmäßigen Abständen durch Querschläge verbunden. Die Querschläge dienen der Wetterführung, der Sicherstellung der Fluchtwege und Erschließung der Einlagerungsstrecken. Die Querschläge werden zunächst nach Erstellung dem Überwachungsbereich, ab Verwendung für die Einlagerung dem Kontrollbereich zugeordnet werden. Dieser Wechsel der Zuordnung zu den Strahlenschutzbereichen gilt auch für die Einlagerungsstrecken. Diese werden von den Querschlägen aus aufgefahren und enden im Gebirge ohne weiteren Anschluss an das Streckensystem. Ein Querschlag und die von ihm ausgehenden Einlagerungsstrecken werden als Einlagerungsfeld bezeichnet. Durch die Endlagerplanung ist eine ausreichende Anzahl und Größe der Einlagerungsfelder vorzusehen, um alle Endlagergebinde einlagern zu können. Die Aufteilung des Einlagerungsbereichs in Einlagerungsfelder ermöglicht eine feldweise Auffahrung und einen entsprechend nachfolgenden Einlagerungsbetrieb. Abbildung 17 zeigt den grundsätzlichen Aufbau des Endlagerbergwerks. Bei der Anwendung dieses Aufbaus auf einen Untersuchungsraum können Anpassungen durch die geologischen Gegebenheiten notwendig werden.

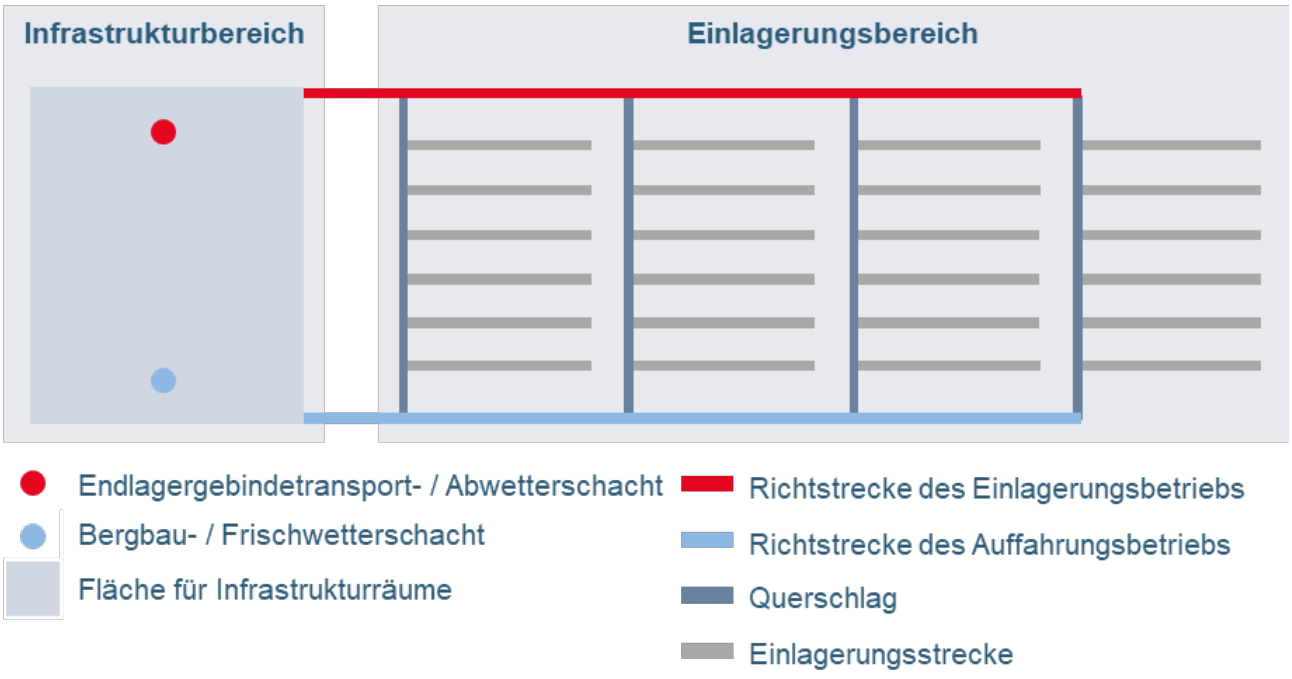


Abbildung 17: Schematische Darstellung des Endlagerbergwerks für Streckenlagerung

Eine konkrete Endlagerauslegung für einen Untersuchungsraum oder Teiluntersuchungsraum hat auf der Basis der geologischen Eigenschaften, des Endlagerkonzeptes und der sich daraus ergebenden notwendigen Aufgaben und verwendeten Technik folgendes festzulegen:

- Querschnittsgrößen und -formen der Strecken
- die Art der Ausbausysteme zur Stabilisierung
- die Abstände der Strecken zueinander bzw. der Behälter zueinander
- die Breite der Einlagerungsfelder und die ihnen zugehörige Anzahl von Einlagerungsstrecken
- die Länge der Einlagerungsstrecken
- die Anzahl der Einlagerungsfelder
- die Anpassung des Endlagerbergwerks an die Geologie unter Gewährleistung von Mindestentfernungen z. B. zu Störungen oder Schichtgrenzen

4.2.6.2 Endlagerbehälter und Annahmen

Derzeit existieren in Deutschland noch keine Behälterkonzepte, die anhand geltender Anforderungen, beispielsweise Rückholung und Bergung nach § 1 Abs. 4 StandAG sowie §§ 13 und 14 EndlSiAnfV, entwickelt wurden oder diese Anforderungen nachweislich erfüllen. Der BGE wurde im Herbst 2019 durch einen Erlass des BMU die Aufgabe der Endlagerbehälterentwicklung übertragen (BMU 2019). Die grundlegende Entwicklung des Behälters für das kristalline Wirtsgestein erfolgt aktuell durch Auftragnehmer, die Arbeiten für die Wirtsgesteine Tongestein und Steinsalz befinden sich in der Vorbereitung. Die aktuell gültigen regulatorischen Anforderungen an Endlagerbehälter für hochradioaktive Abfälle, die bei der Entwicklung zu berücksichtigen sind, wurden in einem Bericht beschrieben (BGE 2021b).

Für die Endlagerauslegung im Rahmen der rvSU besteht die Notwendigkeit, Annahmen zu Behältern zu treffen, auch wenn derzeit keine konkreten Behälterkonzepte vorliegen. Diese Annahmen sind insbesondere auf die verwendeten Materialien und die Behältergeometrien bezogen. Sie beeinflussen damit geometrische Aspekte des Endlagerbergwerks und fließen in die thermische Endlagerauslegung zur Einhaltung der Auslegungstemperatur ein, welche wesentlich ist für die Bestimmung des Endlagerflächenbedarfs. Für die notwendigen Behälterannahmen auf Basis des nationalen Abfallmengengerüsts stehen nur wenige sinnvolle Referenzen zur Verfügung. Eine wichtige Referenz ist das POLLUX® Behältersystem der Gesellschaft für Nuklear-Service mbH (GNS), das auch in Bollingerfehr et al. (2012) verwendet wurde. Dieses Konzept wurde für die Endlagerung von Brennstäben aus Leistungsreaktoren für Steinsalz in einem selbstabschirmenden Endlagerbehälter entwickelt. Neuere Anforderungen (z. B. Rückholung oder Bergung) wurden dabei nicht berücksichtigt, da es diese zum Entwicklungszeitpunkt noch nicht gab. Das POLLUX® Behältersystem wird im Rahmen der rvSU als Grundlage für die Annahme von geometrischen Größen und Materialparametern für Endlagerbehälter für das Endlagersystem Typ 1 verwendet. Voraussichtlich erfüllt es aber nicht alle aktuellen Anforderungen an einen Endlagerbehälter für hochradioaktive Abfälle (BGE 2021b).

In (Bollingerfehr et al. 2008) wird ein sogenannter POLLUX®-10 Behälter wie folgt beschrieben und gemäß Abbildung 18 dargestellt:

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

„Der POLLUX-Behälter besteht aus einem Innen- und einem Außenbehälter. Der Innenbehälter besteht aus Feinkornbaustahl (Werkstoff 1.6210), hat eine Wandstärke von 160 mm und wird durch einen geschraubten Primärdeckel und einen geschweißten Sekundärdeckel dicht verschlossen. Der Innenraum ist in fünf Kammern unterteilt, in die je eine Brennstabbüchse mit Brennstäben von 2 DWR-BE [Brennelementen aus Druckwasserreaktoren] oder 6 SWR-BE [Brennelementen aus Siedewasserreaktoren] eingesetzt wird. Unter geometrischen Gesichtspunkten können die Brennstabbüchsen auch die gezogenen Brennstäbe von 5 WWER-BE [Brennelementen aus Wasser-Wasser-Energie-Reaktoren] aufnehmen. In der innen angeordneten, quadratischen Büchse können anstatt der Brennelementstäbe gepresste Strukturelemente eingebracht werden. In diesem Vorhaben wird von einer vollen Beladung mit Brennstäben von 10 DWR-BE, 30 SWR-BE oder 25 WWER-BE ausgegangen. Der Abschirmbehälter ist wie der Primär- und Sekundärdeckel aus Sphäroguss (Werkstoff 0.7040) hergestellt und hat eine Wandstärke von ca. 270 mm. Dieser Abschirmbehälter hat keine Dichtfunktion zu übernehmen und wird mit einem verschraubten Deckel verschlossen. Im Mantel sind in radial verteilten Bohrungen Stäbe aus Polyäthylen zur Verringerung der Neutronendosisleistung eingesetzt.“

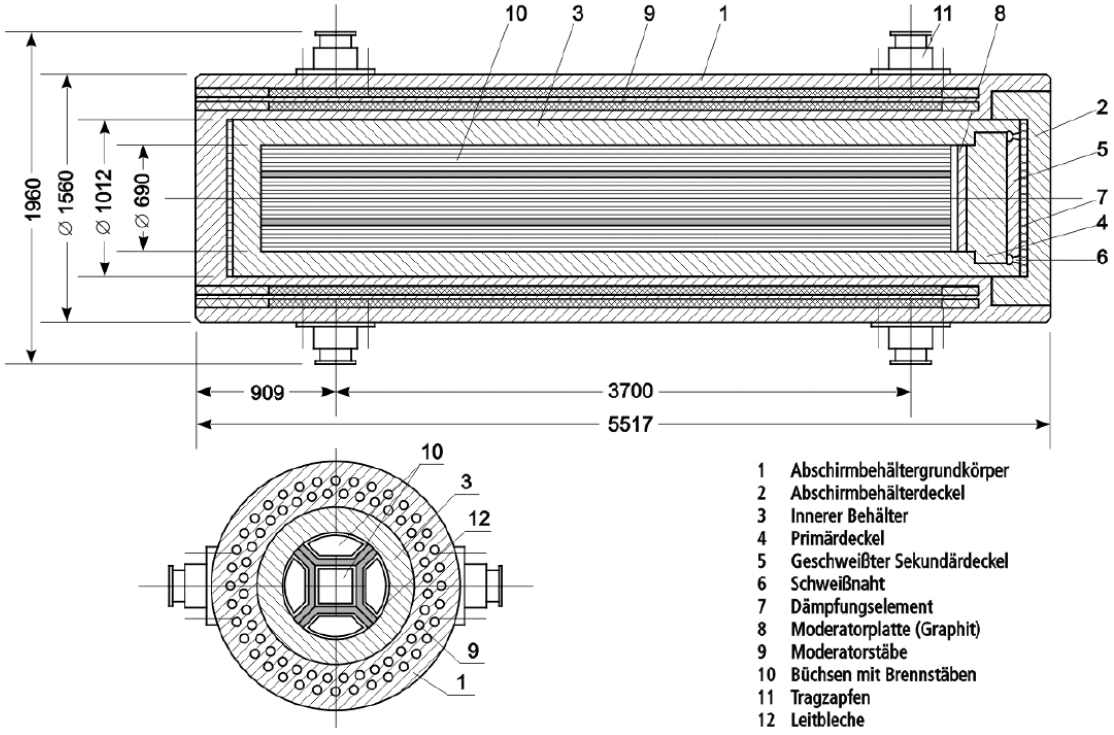


Abbildung 18: Endlagerbehälter für Brennstäbe aus bis zu 10 DWR-, 30 SWR- oder 25 WWER- Brennelementen (Bollingerfehr et al. 2008)

Beispiel 5, Beispiel 6 und Beispiel 7 zeigen, welche konkreten Behälterannahmen für beispielhafte Auslegungen im Rahmen der rvSU werden können.

Beispiel 5: *Wirtsgesteinsspezifische Behälterannahmen für Opalinuston*

Wirtsgesteinsspezifische Behälterannahmen für Opalinuston

In (Bertrams et al. 2021) wurden Abschirmberechnungen für POLLUX® Behälter mit geringeren Beladungen durchgeführt, da sich insbesondere bei Beladungen von weniger als 10 Brennelementen im Vergleich zum ursprünglichen POLLUX® System durch verlängerte Zwischenlagerzeiten verringerte Anforderungen an die Abschirmung ergaben. Für den Endlagerbehälter mit Brennstäben aus Leistungsreaktoren werden auf Basis dieser Ausführungen je nach Beladung Maße angenommen, wie sie beispielhaft in Abbildung 19 dargestellt werden. Dieses Behälterbeispiel kann mit Brennstäben von bis zu drei DWR, neun SWR oder 7,5 WWER Brennelementen beladen werden und ist damit nach (Jobmann & Lommerzheim 2015) voraussichtlich abdeckend bemessen für die Endlagerauslegung im Opalinuston. Der Endlagerbehälter besteht ebenfalls aus einem Außenbehälter aus Feinkornbaustahl (Werkstoff 1.6210), in dessen radialen Bohrungen eine Reihe aus Moderatorstäben aus Polyethylen eingesetzt ist. Der Innenbehälter sowie beide Deckel bestehen aus Sphäroguss (Werkstoff 0.7040).

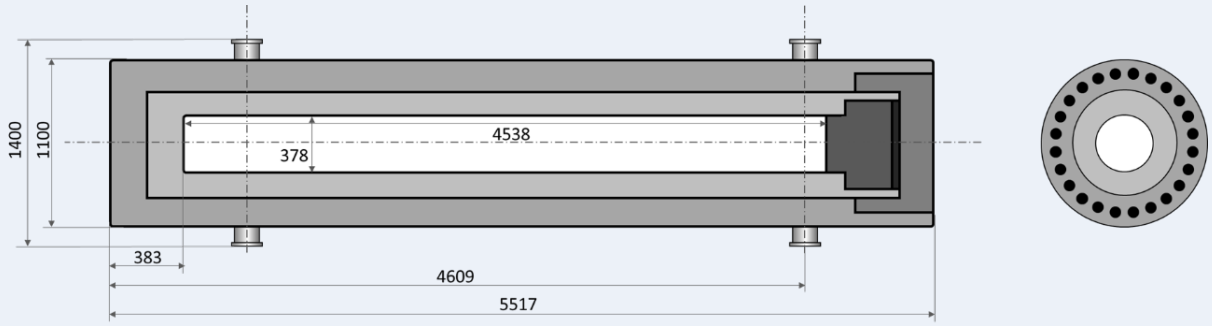


Abbildung 19: *Annahme zum Endlagerbehälter für Brennstäbe aus 3 DWR-, 9 SWR- oder 7,5 WWER-Brennelementen, nach (Bertrams et al. 2021)*

Beispiel 6: Wirtsgesteinsspezifische Behälterannahmen für steile Salzformationen

Wirtsgesteinsspezifische Behälterannahmen für Steinsalz in steiler Lagerung

Im Rahmen der rvSU bietet der POLLUX®-10 Behälter für Steinsalz in steiler Lagerung geeignete Planungsannahmen an. Seine maximale Beladung ist auch abdeckend für höhere Auslegungstemperaturen.

Beispiel 7: Weitere generische Behälterannahmen

Weitere generische Behälterannahmen

Für die Endlagerung von Abfällen aus der Wiederaufarbeitung (CSD) sowie Brennstäben aus Forschungs- und Prototypreaktoren liegen keine vergleichbaren Grundlagen vor, um Planungsannahmen für Endlagerbehälter zu generieren. Für die Endlagerung von CSD werden deshalb auf der Basis des Endlagerbehälters für Brennstäbe aus Leistungsreaktoren Planungsannahmen abgeleitet. Abbildung 20 zeigt diese Annahmen für den Endlagerbehälter für CSD-V. Dieser Behälter kann mit maximal 3 CSD-V beladen werden.

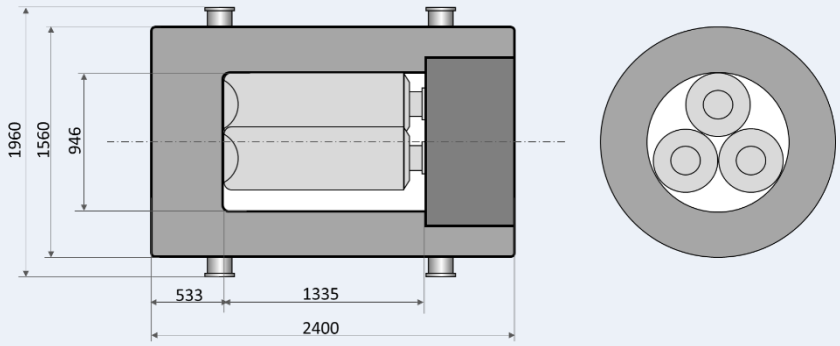


Abbildung 20: Annahme zum Endlagerbehälter für CSD-V, nach (Bertrams et al. 2021)

Für die Brennstäbe aus Forschungs- und Prototypreaktoren wurden in der Forschung und Entwicklung in der Regel die entsprechenden Transport- und Lagerbehälter selbst als Endlagerbehälter angenommen. Für dieses Vorgehen sprechen die verkehrsrechtliche Zulassung dieser Behälter sowie ihre Größe und Gewichte, die mit denen der o. g. Endlagerbehälter vergleichbar sind. Im Gegensatz zu Transport- und Lagerbehältern mit Brennelementen aus Leistungsreaktoren ist nur mit einer vernachlässigbaren Wärmeproduktion zu rechnen. Für die rvSU werden dementsprechend Behälterannahmen für diese Abfälle getroffen, die den jeweiligen Transport- und Lagerbehältern entsprechen (Abbildung 21). Ein neuer Behälter mit der Bezeichnung MTR3 weist fast identische Maße zum MTR2 auf, weshalb er nicht zusätzlich aufgeführt wird. Voraussichtlich erfüllen die Transport- und Lagerbehälter ebenfalls nicht alle aktuellen Anforderungen an einen Endlagerbehälter für hochradioaktive Abfälle (BGE 2021b).

Weitere generische Behälterannahmen

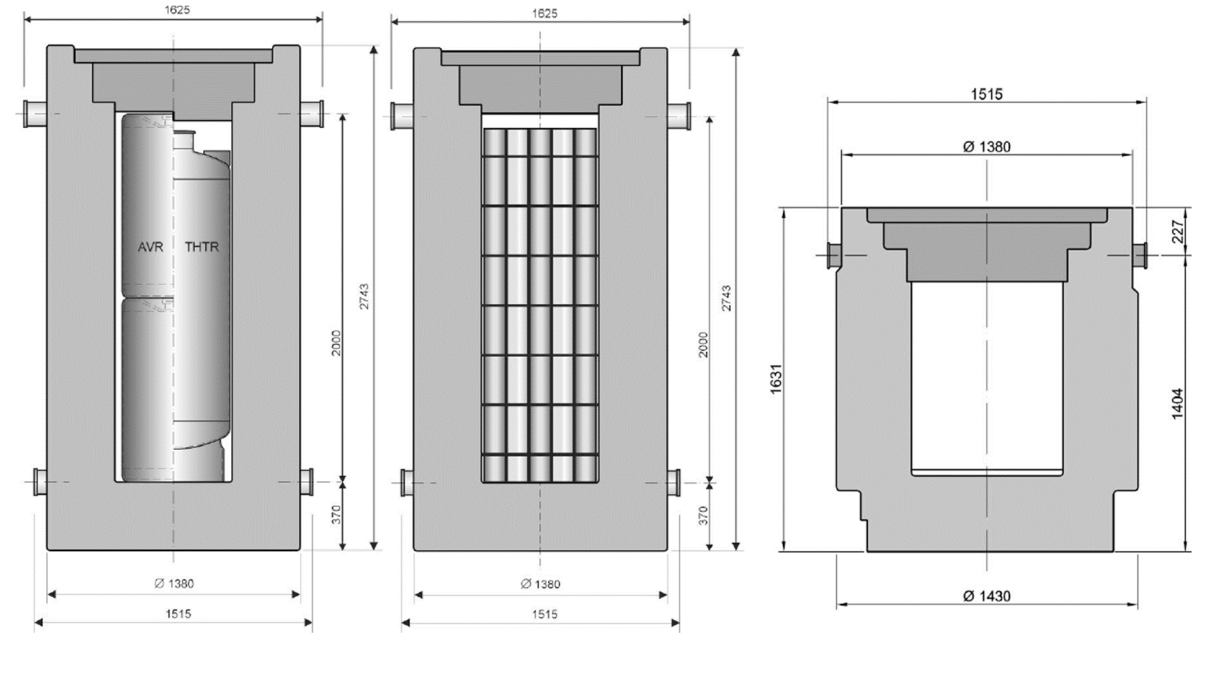


Abbildung 21: Annahme zum Endlagerbehälter für Abfälle aus Forschungs- und Prototyp-reaktoren entsprechend den Behältern CASTOR® AVR/THTR, KNK und MTR2 (Bollingerfehr et al. 2012)

4.2.6.3 Transport- und Einlagerungstechnik (Streckenlagerung)

Wie in Kapitel 4.2.5 ausgeführt, wird im Rahmen der rvSU für ein Endlagersystem Typ 1 grundsätzlich die Streckenlagerung als Einlagerungsvariante bevorzugt. Die Transport- und Einlagerungstechnik für abschirmende Endlagerbehälter vom Typ POLLUX® zur Einlagerung in horizontalen Strecken wurde in Deutschland in den 90er Jahren durch die DBE mbH entwickelt, gebaut und erprobt (Engelmann et al. 1995). In (Bertrams et al. 2021) wurde die Technik anhand des aktuellen Standes der Technik weiterentwickelt. Die dort vorgeschlagenen Vorrichtungen zum Transport und zur Einlagerung bilden die Grundlage für die Endlagerkonzepte der rvSU. Es wird einerseits der Transport vom Schacht bis zum Eingang der vorgesehenen Einlagerungsstrecke (Streckentransport), andererseits der Weitertransport zum Einlagerungsort in der Einlagerungsstrecke und die dort erfolgende Ablage des Endlagergebindes (Einlagerung) betrachtet.

Für den Streckentransport kommen grundsätzlich gleisloser oder gleisgebundener Transport in Frage. Der mögliche Automatisierungsgrad beider Varianten ist voraussichtlich ähnlich. Durch die hohe Regelmäßigkeit der Transportvorgänge, die Einfachheit des Transportweges mit wenigen Abzweigungen entlang der Richtstrecke und die langfristige Konstanz von Transportwegen bietet es sich jedoch an, den Streckentransport gleisgebunden durchzuführen und so Kollisionsrisiken mit den

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

Stößen oder Hindernissen außerhalb der Fahrspur gänzlich auszuschließen. Das Endlagergebinde liegt auf einem Transportwagen (siehe Abbildung 22), der durch ein elektrisch betriebenes Zugfahrzeug gezogen wird. Der Transportwagen weist eine Mulde auf, die den Endlagerbehältern entsprechend geformt ist. Darüber hinaus dienen Auflager an den Seitenkanten der Mulde der Aufnahme der Tragzapfen während des Transports.

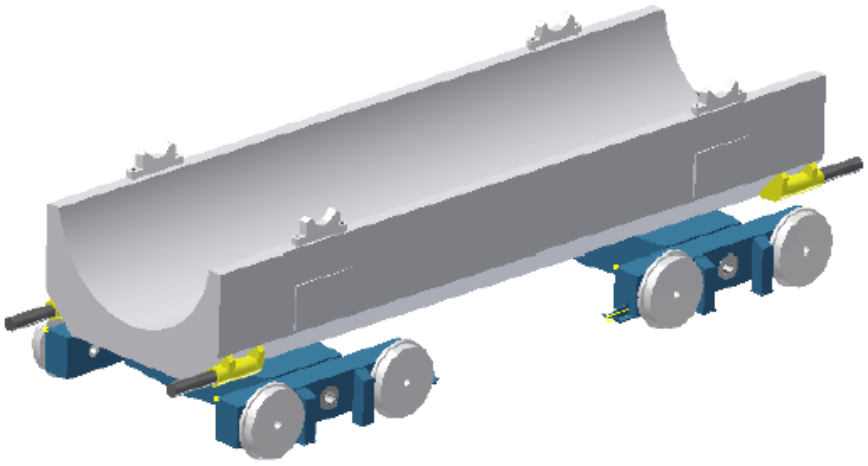


Abbildung 22: CAD-Modell für das Beispiel eines gleisgebundenen Transportwagens (Bertrams et al. 2021)

Der prinzipielle Aufbau der Einlagerungsvorrichtung entspricht dem eines frei verfahrbaren Portalkrans mit Batterieantrieb (siehe Abbildung 23). Die Einlagerungsvorrichtung nimmt das Endlagergebinde im Querschlag am Eingang zur Einlagerungsstrecke entgegen. Dafür überfährt sie den Transportwagen. Zwei Gewindespindeln steuern den Hub des Oberbaus, an dem die Tragbalken aufgehängt sind. Hydraulikzylinder stellen die Weite der Tragbalken ein, welche Aussparungen für die Aufnahme der Tragzapfen des Endlagerbehälters aufweisen. Zur Aufnahme des Endlagergebindes wird der Oberbau abgesenkt, sodass die Tragbalken auf Höhe der Tragzapfen sind, um dann die Weite der Tragbalken bis zum Eingriff zu verringern. Schließlich wird der Oberbau, jetzt mit dem Endlagergebinde verbunden, wieder angehoben. Nach Aufnahme des Endlagergebindes fährt die Einlagerungsvorrichtung in die Einlagerungsstrecke hinein. Durch Absenken wird das Endlagergebinde entweder auf einem Sockel oder direkt auf der Sohle abgelegt, sodass die Tragbalken lastfrei werden und nach außen bewegt werden können. Im Anschluss verlässt die Einlagerungsvorrichtung die Einlagerungsstrecke und wartet auf die Ankunft des nächsten Endlagergebindes.

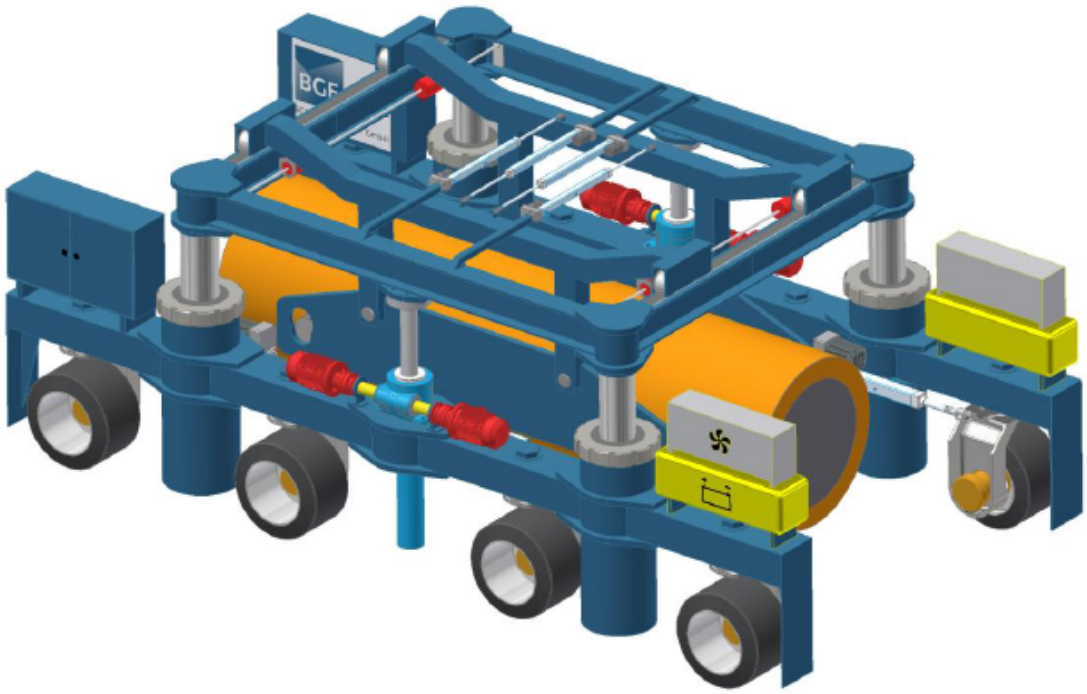


Abbildung 23: CAD Modell eines Beispiels für eine frei verfahrbare Einlagerungsvorrichtung mit angehobenem Endlagergebinde (Bertrams et al. 2021)

4.2.6.4 Grundlagen für Bau und Betrieb

4.2.6.4.1 Schächte und Infrastrukturbereich

In Kapitel 4.2.6.1 wird erläutert, dass der Zugang zum Endlagerbergwerk von der Erdoberfläche über zwei Schächte erfolgt. Der Bau der Schächte erfolgt überwiegend im Deckgebirge in wechselnden Gesteinsschichten und teilweise im Wirtsgestein selbst. Damit ist zu erwarten, dass der Schachtbau in Gebirge von begrenzter mechanischer Stabilität und durch mehrere Grundwasserleiter hindurch erfolgt, in denen mit Wasserzufluss und hydraulischem Druck zu rechnen ist. Um solche Bedingungen zu bewältigen, wird häufig das Gefrierverfahren angewendet, bei dem von der Oberfläche aus das Gebirge um die spätere Schachtröhre herum eingefroren wird. Dies erfolgt durch die Erstellung von Bohrungen rund um den Schacht herum, in denen eine Kühlflüssigkeit zirkuliert wird. Durch dieses Verfahren werden der Grundwasserzufluss in den Schacht minimiert und die Schachtwände beim Abteufen des Schachts stabilisiert. Bei günstigeren hydraulische Verhältnissen könnte auch ein lokaleres Einfrieren oder Injektion von abdichtendem Material ausreichend sein. Bei entsprechend gesicherten Bedingungen kann der Ausbruch mit konventionellen Mitteln (Bohren und Sprengen) oder mit Schneidköpfen erfolgen. Die Werkzeuge für beide Verfahren werden üblicherweise an der untersten Ebene einer mehrtägigen Arbeitsbühne aufgehängt, von der aus alle Schachtbauprozesse mit einem hohen Grad an Fernsteuerung und Automatisierung durchgeführt werden können. Kurz nach dem Aushub muss abschnittsweise der vorläufige Ausbau für die temporäre Sicherung der Schachtkontur eingebracht werden. Kurze Zeit später wiederum erfolgt die Einbringung des endgültigen und dauerhaften Ausbaus. Beide müssen die Anforderungen an die mechanische Stabilität

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

und die evtl. die Wasserdichtheit über ihren jeweiligen Funktionszeitraum erfüllen. Bei der vorläufigen Sicherung endet dieser bei Einbringung des endgültigen Ausbaus. Dieser soll seine Funktion über mehrere Jahrzehnte beibehalten. Das Ausbausystem stützt sich voraussichtlich hauptsächlich auf (Stahl-)Beton für die strukturelle Stabilität. Andere Materialien können erforderlich sein, z. B. ein Metallblech zur Abdichtung oder eine bituminöse Schicht, um dem Ausbausystem eine gewisse Elastizität zu verleihen. Spezifische Schachtbau- und Ausbaumethoden werden zukünftig auf der Grundlage detaillierter geologischer Untersuchungen des jeweiligen Standorts gewählt. Gerade die Wirtsgesteine können sich erheblich im notwendigen Aufwand für die Sicherung der Schachtwand unterscheiden.

Die Schächte des Endlagers werden der Dreh- und Angelpunkt für alle Transporte zwischen der Erdoberfläche und dem Endlagerbergwerk. Die korrekte Auslegung der entsprechenden Transportsysteme ist daher von entscheidender Bedeutung für den kontinuierlichen und störungsfreien Endlagerbetrieb. Die folgenden Funktionen bei der Schachtplanung müssen berücksichtigt werden:

- Personaltransport
- Transport von Baustoffen, Maschinen, Fertigteilen (z. B. Ausbau, Gleisbau), Werkzeugen, Verbrauchsmaterialien, Versorgungseinrichtungen etc.
- Abtransport von Gestein
- Transport von Endlagergebinden
- Transport von Versatzmaterial
- Zuführung von frischen Wettern und Ableitung von Abwettern

Entsprechend der Unterteilung des Endlagers in Strahlenschutzbereiche nach § 52 Abs. 2 StrSchV (Kapitel 4.2.6.1) werden die Schächte dauerhaft jeweils einem der beiden Strahlenschutzbereiche zugeordnet. Der Schacht, in dem der Endlagergebindetransport stattfindet, gehört damit zum Kontrollbereich. Dieser Schacht dient auch als Abwetterschacht. Infolgedessen strömen alle Wetter, die unter Tage einem Endlagergebinde begegnen, auf direktem Wege durch den Kontrollbereich zu diesem Schacht. Eine Kontaminationsverschleppung über die Wetter aus dem Kontrollbereich heraus ist damit bei planmäßiger Wetterführung ausgeschlossen. Der Schacht ist über Tage mit Schleusensystemen, Filteranlagen und Messeinrichtungen auszustatten, um die Abwetter kontinuierlich auf Kontamination zu überprüfen und die Einhaltung von Emissionsschutzgrenzwerten sicherzustellen.

Der zweite Schacht ist damit dem Überwachungsbereich zuzuordnen. Um unnötige Freimessprozedere bei Verlassen des Kontrollbereichs zu vermeiden, ist es sinnvoll, diesem Schacht alle weiteren notwendigen Transporte zuzuordnen. Die vorläufige Endlagerauslegung der rvSU geht also von diesen zwei Schächten aus:

1. Transportschacht für Endlagergebinde und Abwetter (Endlagergebindetransportschacht)
2. Schacht für konventionelle Transporte und Frischwetter (Bergbauschacht)

Der Endlagergebindetransportschacht erfordert ein primäres Fördersystem mit ausreichender Nutzlast. Bei den zu erwartenden großen Nutzlasten ist aus Gründen der Sicherheit und Energieeffizienz

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

eine Förderanlage mit Treibscheibenantrieb empfehlenswert, in denen mehrere Seile verwendet werden können und die Betriebslast durch ein Gegengewicht teilweise ausgeglichen werden kann. Die Transportgeschwindigkeit kann gering sein, da eine hohe Transportfrequenz nicht erforderlich ist. Die Förderanlage verfügt über alle dem Stand der Technik entsprechenden Sicherheitseinrichtungen und kann mit zusätzlichen Vorrichtungen, z. B. an den Anschlägen (Haltestellen der Schachtförderanlage), ausgestattet werden, um die Sicherheit beim Be- und Entladen zu erhöhen. Das Fördersystem sollte als Turmförderanlage ausgeführt werden, um Seilablenkungen zu minimieren und zu vermeiden, dass insbesondere die Förderseile Wettereinflüssen ausgesetzt ist. Der lichte Durchmesser des Schachts wird voraussichtlich etwa 8 m bis 9 m betragen. Neben der Förderanlage für den Transport der Endlagergebinde ist mindestens eine Hilfsfahranlage vorzusehen, um Personal im Notfall aus dem Schacht retten zu können. Weiterhin sind Daten- und Stromkabel im Schacht anzunehmen.

Ein großer Anteil der Förderleistung des Bergbauschachts entfällt auf den Gesteinstransport aus der Streckenauffahrung unter Tage. Eine Förderanlage mit Treibscheibenantrieb und zwei Fördergefäßen ist dafür voraussichtlich gut geeignet. Darüber hinaus ist eine Förderanlage mit Förderkorb für den Transport von Personal, Baustoffen, Werkzeugen usw. notwendig. Es ist ebenfalls mindestens eine Hilfsfahranlage vorzusehen, um Personal aus dem Schacht retten zu können. Der lichte Durchmesser des Schachts wird voraussichtlich etwa 8 m betragen. Der Bergbauschacht kann darüber hinaus mit mehreren Daten- und Stromkabeln sowie Rohren ausgestattet werden, um z. B. Verbrauchsmaterialien und Baustoffe nach unter Tage zu bringen. Auch die Förderanlagen des Bergbauschachts sollten in Turmaufstellung vorgesehen werden, um Seilablenkungen zu minimieren und Wettereinflüsse auf die Förderanlage auszuschließen.

Unter Tage treffen die Schächte auf den Infrastrukturbereich. Auch hier werden die Strecken und Kammern den beiden Strahlenschutzbereichen zugeordnet. Die Grubenräume, in denen Tätigkeiten mit Kontakt zu Endlagergebinden stattfinden oder in denen sich Personal und Gerät aufhält, das planmäßig Kontakt zu diesen hat, werden dem Kontrollbereich zugeordnet. Der Übergang von Personal oder Gerät vom Kontrollbereich in den Überwachungsbereich ist hier räumlich möglich, aber nur nach Freimessen zulässig und damit im Betrieb nicht die Regel. Grundsätzlich geht die Endlagerauslegung im Rahmen der rvSU im gesamten Endlagerbergwerk von einer strengen Trennung zwischen Kontrollbereich und Überwachungsbereich aus. Demnach sind diverse Funktionsräume des Infrastrukturbereichs für beide Bereiche getrennt auszuführen, z. B. Aufenthaltsräume und Arbeitsplätze für Personal, Werkstätten und Materiallager. Um das Wirtsgestein möglichst wenig zu schädigen, ist bei der Planung des Infrastrukturbereichs zu prüfen, welche Funktionen zwangsläufig unter Tage vorgehalten werden müssen und welche auch von über Tage erfüllt werden können. Für die rvSU wird davon ausgegangen, dass der Infrastrukturbereich im Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion liegt. Der Bau des Infrastrukturbereichs erfolgt dann unter vergleichbaren Randbedingungen und mit vergleichbaren Methoden wie die Streckenauffahrungen im Einlagerungsbereich. Die Prozesse zur Errichtung des Endlagerbergwerks unter Tage werden in Kapitel 4.2.6.4.2 beschrieben.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

4.2.6.4.2 Der Einlagerungsbereich

Die Strecken des Einlagerungsbereichs gliedern sich in

- die Richtstrecke des Endlagergebindetransports,
- die Richtstrecke des Auffahrungsbetriebs,
- die Querschläge, die beide Richtstrecken miteinander verbinden und
- Einlagerungsstrecken.

Ab Beginn des Einlagerungsbetriebs wird die Richtstrecke des Endlagergebindetransport dem Kontrollbereich zugeordnet und verbleibt für die gesamte Betriebszeit des Endlagers darin. Die Richtstrecke des Auffahrungsbetriebs wird dagegen dem Überwachungsbereich zugeordnet. Querschläge und Einlagerungsstrecken gehören zunächst zum Überwachungsbereich und ab Nutzung für den Einlagerungsbetrieb zum Kontrollbereich. In Kapitel 4.2.6.4.3 wird dieses Vorgehen im Zusammenhang mit den betrieblichen Prozessen und der Bewetterung erläutert.

Für den Bau der Strecken kommen je nach Gebirgseigenschaften die Verfahren des Bohrens und Sprengens sowie das Auffahren im Teilschnitt in Frage. Bei beiden Varianten ist nach § 9 Abs. 2 EndlSiAnfV darauf zu achten, gebirgsschonend vorzugehen.

Der lichte Querschnitt aller Strecken muss ausreichende Breite wie Höhe aufweisen, um die Einrichtung der notwendigen Technik sowie die Durchfahrt aller Transportgüter zu erlauben. Für die verschiedenen Strecken ergeben sich deshalb unterschiedliche notwendige lichte Maße.

In der Richtstrecke des Endlagergebindetransports und in den Querschlägen findet der gleisgebundene Transport der Endlagergebinde statt. Darüber hinaus sind die Befahrung der Strecke durch die Einlagerungsvorrichtung, Befahrungsfahrzeuge (PKW) und Baustoff- sowie Gerätetransporte für die Verfüll- und Verschlussarbeiten vorzusehen.

Die Richtstrecke des Auffahrungsbetriebs dient dem Transport von Vortriebsmaschinen zu den Einlagerungsstrecken, dem Gesteinstransport von den Einlagerungsstrecken zum Bergbauschacht (z. B. mit Bandanlage) und der Durchfahrt von Befahrungsfahrzeugen und Bergbaumaschinen (z. B. Radlader, Muldenkipper).

Die Einlagerungsstrecken benötigen ausreichend Raum für die Befahrung mit der Einlagerungsvorrichtung. Auch hier sind das Einfahren von Gerät und Material für Verfüllarbeiten notwendig. Im Querschnitt muss außerdem die Möglichkeit bestehen, eine Wetterlutte und Lüfter für die Sonderbewetterung der Strecke unterzubringen. In Richtung der Einlagerungsstrecken ist ein Abstand der Endlagergebinde von mindestens etwa einem Meter zu wählen, so dass eine vollständige Umhüllung mit Verfüllmaterial gewährleistet werden kann.

Beispiel 8 und Beispiel 9 zeigen exemplarisch die Annahmen zum Einlagerungsbereich für Opalinuston und Steinsalz in steiler Lagerung für die rvSU.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

Beispiel 8: Wirtsgesteinsspezifische Festlegungen für den Einlagerungsbereich im Opalinuston

Wirtsgesteinsspezifische Festlegungen für den Einlagerungsbereich im Opalinuston

Für die vorläufige Endlagerauslegung der rvSU findet keine detaillierte betriebliche Planung und Maschinen- oder Geräteauswahl statt. Aus diesem Grund werden die erforderlichen lichten Maße der Strecken auf Basis überschlägiger Schätzungen für Opalinuston wie folgt vorläufig festgelegt:

- Lichter Durchmesser der Richtstrecke für Endlagergebindetransport: 7,6 m
- Lichter Durchmesser der Querschläge: 7,6 m
- Lichter Durchmesser der Richtstrecke für bergbauliche Betriebsprozesse: 6,8 m
- Höhe x Breite der Einlagerungsstrecke: 5,1 m x 5,1 m (siehe Abbildung 24)

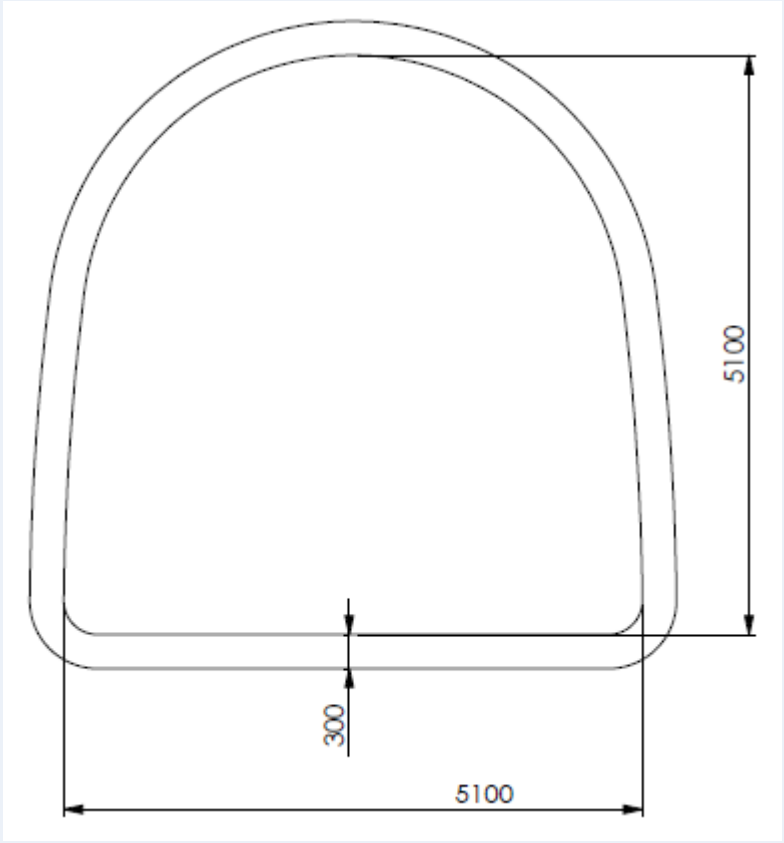


Abbildung 24: Skizze des Querschnitts der Einlagerungsstrecke für die Streckenlagerung im Opalinuston

Im Opalinuston ist davon auszugehen, dass in allen Strecken ein tragender Ausbau eingebracht werden muss, um die Strecken über ihre Betriebszeit offen zu halten. Nach Anhang 1ist insbesondere in Bereichen mit einer langen Standzeit (Infrastrukturbereich, Richtstrecken,

Wirtsgesteinsspezifische Festlegungen für den Einlagerungsbereich im Opalinuston

Querschläge) mit einem betonbasierten Vollausbau zu rechnen. Eine abgerundete Querschnittsform der Strecken (rund oder elliptisch) ist dann vorteilhaft. Bei sehr schwierigen langfristigen Bedingungen kann der Ausbau mehrschalig und mit Nachgiebigkeitselementen ausgeführt werden. Geeignete Materialen für den Ausbau sind entsprechend den Gebirgsbedingungen im Bereich der Positionierung des Ausbaus auszuwählen und müssen dem erwarteten Gebirgs- und Fluiddruck mindestens für die Dauer der Betriebszeit standhalten und eine geringe chemische Reaktivität ausweisen. Die Einlagerungsstrecken müssen nur über vergleichsweise geringe Zeiträume offengehalten werden. Sie sind nach entsprechend § 18 Abs. 2 EndlSiAnfV „zügig aufzufahren, zu beladen und zu verfüllen“. Dementsprechend kann hier der Ausbau voraussichtlich starr und mit geringerer Dicke eingebaut werden, z. B. als Spritzbetonschicht von wenigen Dezimetern. Bei sehr günstigen Bedingungen ist möglicherweise ein Anker-Stahlnetzsystem zur Vermeidung von herabfallendem Gestein ausreichend. Zur Vermeidung von Hohlraumvolumen wird bei den Einlagerungsstrecken eine hufeisenförmige Querschnittsform der Strecken verfolgt, da eine vollständige Abrundung hin zum Kreis oder zur Ellipse aufgrund der kurzen Standzeit voraussichtlich nicht notwendig ist. Die Abhängigkeiten der Querschnittsformen und der Ausbausysteme von den gebirgsmechanischen Bedingungen (und der Endlagerteufe) werden in Kapitel 4.2.7 weiter erläutert.

Im Opalinuston wird ein Sockel für die Ablage der Endlagergebinde vorgesehen, um den direkten Kontakt vom Endlagergebinde zum Betonausbau zu vermeiden. In Abbildung 25 sind die vorläufigen Maße für die beiden Endlagergebinde mit wärmeentwickelnden Abfällen auf einem solchen Sockel dargestellt. Der Sockel wird aus Formsteinen mit hohem Tonmineralanteil gemauert. Seine Länge entspricht dem Endlagerbehälter. Er liegt in der Mitte der Einlagerungsstrecke.

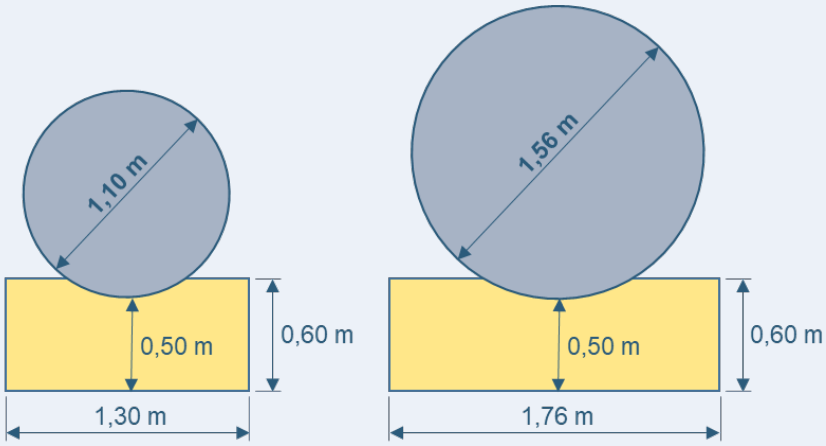


Abbildung 25: Skizze des Sockels mit Endlagergebinde (links: Endlagergebinde mit Brennstäben aus Leistungsreaktoren, rechts: Endlagergebinde mit CSD-V)

Beispiel 9: Wirtsgesteinsspezifische Festlegungen für den Einlagerungsbereich im steilen Steinsalz

Wirtsgesteinsspezifische Festlegungen für den Einlagerungsbereich in Steinsalz in steiler Lagerung

Für die vorläufige Endlagerauslegung der rvSU findet keine detaillierte betriebliche Planung und Maschinen- oder Geräteauswahl statt. Aus diesem Grund werden die erforderlichen lichten Maße der Strecken auf Basis von (Bollingerfehr et al. 2012) für Steinsalz in steiler Lagerung wie folgt vorläufig festgelegt:

- Höhe x Breite der Richtstrecke für Einlagerungsbetrieb: 3,5 m x 7,6 m
- Höhe x Breite der Querschläge: 3,5 m x 7,6 m
- Höhe x Breite der Richtstrecke für Auffahrungsbetrieb: 3,8 m x 6,8 m
- Höhe x Breite der Einlagerungsstrecke: 3,7 m x 5,1 m (siehe Abbildung 26)

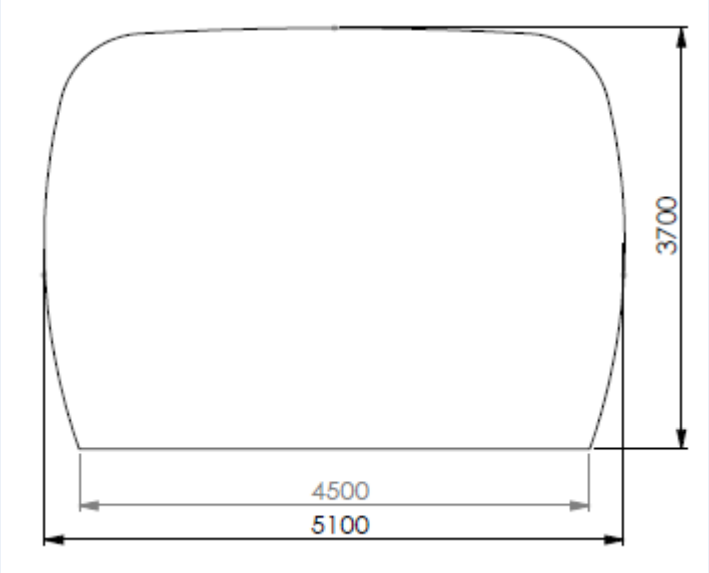


Abbildung 26: Skizze des Querschnitts der Einlagerungsstrecke für die Streckenlagerung im steilen Steinsalz

Im Steinsalz wird von grundsätzlich günstigen gebirgsmechanischen Bedingungen ausgegangen. Ein tragender Ausbau wird deshalb nicht vorgesehen, allenfalls lokale Systemankerung mit Netzen zur Vermeidung von Steinfall. Streckenquerschnitte werden mit gebirgsmechanisch ausreichenden Abrundungen aufgefahren, um Spannungsspitzen in Ecken zu vermeiden.

In der Einlagerungsstrecke wird der Behälter zentral auf der Sohle abgelegt. Zur Verbesserung seiner Lagestabilität wird die Sohle seiner runden Form leicht nachempfunden, sodass das Endlagergebinde ca. 5 cm unterhalb des Sohlniveaus zum Liegen kommt.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

4.2.6.4.3 Betrieb und Bewetterung des Endlagers

In Vorbereitung auf die Betriebsphase erfolgt die Errichtung großer Teile des Endlagers (siehe § 15 EndlSiAnfV). Vor der Anlieferung des ersten Endlagergebindes unter Tage ist mindestens die Auffahrung der Richtstrecken, aller Querschläge und der Einlagerungsstrecken im schachtfernsten Einlagerungsfeld notwendig. Hier kann dann der Probebetrieb des Endlagers nach § 16 EndlSiAnfV stattfinden. Der Betrieb des Endlagers selbst beginnt mit der ersten Anlieferung radioaktiver Abfälle. Im Wesentlichen bestehen die untertägigen Tätigkeiten im Betrieb aus der Auffahrung von Einlagerungsstrecken, der Einlagerung von Endlagergebinden und der anschließenden Verfüllung von Einlagerungsstrecken, Querschlägen und nicht weiter genutzten Teilen der Richtstrecken. Es ist immer sicherzustellen, dass das Endlagerbergwerk ausreichend bewettert wird und von allen Arbeitsstätten aus Fluchtwege vorhanden sind.

Der Betrieb beginnt im schachtfernsten Einlagerungsfeld. Die Auffahrung der Einlagerungsstrecken, die Einlagerung und die Verfüllung schreiten von dort aus in Richtung der Schächte fort. So wird das nach § 18 Abs. 2 EndlSiAnfV geforderte zügige Verfüllen nach der Einlagerung ermöglicht. Zwischen jedem Querschlag und der Richtstrecke des Einlagerungsbetriebs werden Wetter- und Zugangsbauwerke errichtet. Nach vollständiger Errichtung eines Einlagerungsfeldes mit Einlagerungsstrecken wird für dieses Feld das Wetterbauwerk zum Übergang vom Querschlag zur Richtstrecke des Auffahrungsbetriebs verschoben. Diese Bauwerke dienen der Trennung des Endlagerbergwerks in Kontrollbereich und Überwachungsbereich sowie der Regulierung der Wetterströme. Abbildung 27 zeigt schematisch und beispielhaft einen Betriebszustand des Endlagerbergwerks.

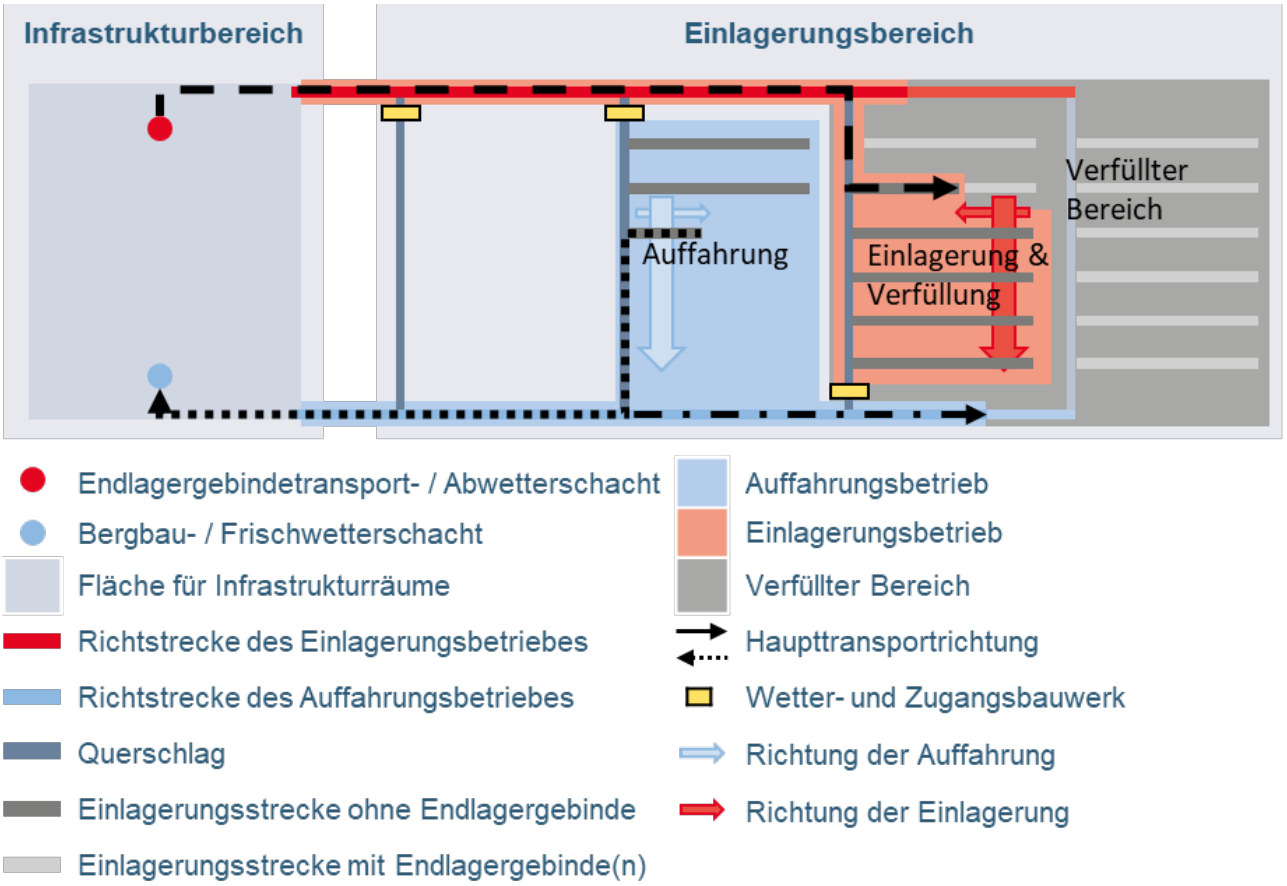


Abbildung 27: Schematische Darstellung des Endlagerbergwerks im Betrieb

Nach der Übergabe des ersten Einlagerungsfeldes an den Einlagerungsbetrieb beginnt die Auffahrung des nächsten Feldes vom benachbarten Querschlag aus. Der Auffahrungsbetrieb, bestehend aus dem Bergbauschacht, der Richtstrecke des Auffahrungsbetriebs und den in Auffahrung befindlichen Einlagerungsfeldern, wird aufgrund der bergbaulichen Tätigkeiten dem Überwachungsbereich zugeordnet. Sämtliche damit in Zusammenhang stehenden Transporte von Gestein, Ausbau, Material und Personen erfolgen daher im Regelfall über diese Verbindung. Auf dem gleichen Weg strömen frische Wetter in das Endlager. Vom Hauptwetterstrom im Querschlag aus werden die Einlagerungsstrecken über Wetterlutten und Lüfter sonderbewettert. Die Abwetter strömen in den Querschlag zurück, wo sie vom Hauptwetterstrom erfasst, verdünnt und in Richtung Kontrollbereich abtransportiert werden. Am Übergang zur Richtstrecke des Einlagerungsbetriebs gehen sie über ein entsprechendes Wetter- und Zugangsbauwerk in den Kontrollbereich über und werden durch den Endlagergebindetransportschacht aus dem Endlager geleitet.

Der Einlagerungsbetrieb transportiert die Endlagergebinde über den Endlagergebindetransportschacht in das Endlager und dann, gleisgebunden, über die Richtstrecke des Einlagerungsbetriebs in das jeweilige Einlagerungsfeld. Im Querschlag vor der jeweiligen Einlagerungsstrecke nimmt die Einlagerungsvorrichtung den Behälter auf und transportiert ihn in die Einlagerungsstrecke. Hier legt sie ihn, zentral in der Strecke, ab und verlässt die Einlagerungsstrecke. Das Verfüllmaterial der Einlagerungsstrecke wird über den gleichen Weg von über Tage in das Einlagerungsfeld transportiert.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

Der Streckenabschnitt um ein Endlagergebinde herum wird direkt nach dessen Einlagerung vollständig verfüllt. Im Anschluss kann der nächste Einlagerungsvorgang beginnen. Wie bei der Auffahrung beginnt auch die Einlagerung angrenzend zur Richtstrecke des Einlagerungsbetriebs und setzt sich dann bis zur Richtstrecke des Auffahrungsbetriebs fort. Die Wetter gelangen dann aus dieser Richtstrecke über ein Wetter- und Zugangsbauwerk in den Kontrollbereich im Querschlag. Wie im Auffahrungsbetrieb wird dem durchgehenden Hauptwetterstrom für die Sonderbewetterung der Einlagerungsstrecke ein Teil entnommen. Das Bewetterungsschema wird in Abbildung 28 schematisch dargestellt.

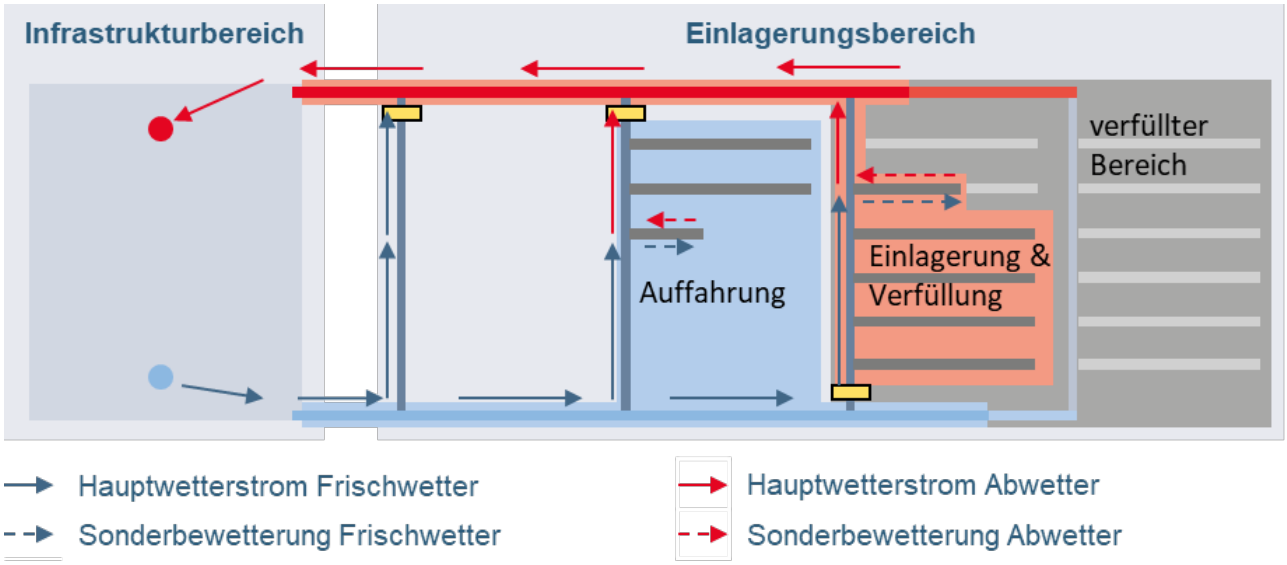


Abbildung 28: Schematische Darstellung der Bewetterung bei Streckenlagerung

Sind alle Einlagerungsstrecken eines Einlagerungsfeldes mit Endlagergebinden beladen und verfüllt, folgt schließlich auch die Verfüllung des zugehörigen Querschlages und der Richtstrecken bis etwa zum nächsten Querschlag. Der Querschlag und die Richtstrecke des Einlagerungsbetriebs, die vollständig dem Kontrollbereich zugeordnet sind, werden durch den Einlagerungsbetrieb gefüllt. Die Verfüllung beginnt am Wetterbauwerk des Einlagerungsfeldes zur Bergbaustrecke und setzt sich im Rückbau fort. Hierfür ist eine starke Sonderbewetterung einzusetzen. Die Verfüllung des Abschnitts der Richtstrecke des Auffahrungsbetriebs kann mit Gestein aus dem aktuellen Auffahrungsbetrieb oder auch über den Bergbauschacht erfolgen. Auf diese Weise muss der Kontrollbereich nicht erweitert werden und Gestein aus der Auffahrung kann mit geringem Aufwand genutzt werden.

4.2.6.4.4 Fluchtwege

Auch wenn davon ausgegangen wird, dass die Regeln zur Unfallvermeidung im geplanten Endlager angewandt werden und dass das Verhalten jedes einzelnen Mitarbeiters diesbezüglich angemessen ist, besteht das Restrisiko eines Unfalls. Insbesondere Brände sind untertage ausgesprochen bedrohlich für die Gesundheit des Personals. Deshalb müssen jederzeit geeignete Fluchtwege vorhanden sein, um Bränden und den entstehenden Rauchgasen entkommen zu können. Eine schematische Darstellung einer exemplarischen Fluchtwegsituation ist in Abbildung 29 zu sehen.

Befindet sich der Brand auf der Frischwetterseite einer Person, führen Rauchgase, Asche und Hitze schnell zu einer Verschlechterung der Atemluft und der Sicht. Für diesen Gefahrenfall muss nach § 11 Abs. 1 Satz 2 ABBergV gewährleistet sein, dass „*geeignete Fluchtwege und Notausgänge sowie Flucht- und Rettungsmittel für ein sicheres Verlassen der Arbeitsstätten für alle Beschäftigten vorhanden sind*“. Aufgrund der geringen Wahrscheinlichkeit eines Brandes wird ein einzelner Brand im Endlager betrachtet. Darauf aufbauend ist die Flucht aus einem Gefahrenbereich immer möglich, wenn, wie in § 15 ABBergV gefordert, eine Arbeitsstätte zwei Fluchtwege besitzt. Für das Endlager insgesamt ist dies durch die beiden Schächte gegeben. In den meisten Bereichen des Endlagers ermöglicht außerdem die Kombination aus Richtstrecken und Querschlägen die Flucht in Richtung beider Schächte. Insofern sich Strecken jedoch in der Auffahrung oder Verfüllung befinden, müssen besondere Maßnahmen ergriffen werden. Während für sehr kurze Strecken angenommen werden kann, dass niemand durch einen Brand eingeschlossen wird, steigt die Gefahr mit zunehmender Länge an. Bei Längen über 400 m müssen daher, in Übereinstimmung mit § 49 Abs. 3 ABVO, Rettungskammern vorgesehen werden, die einen wirksamen Schutz vor Bränden bieten. Einlagerungsstrecken gelten in diesem Sinne ebenfalls als Strecken, die sich in Auffahrung oder Verfüllung befinden. Ihre Länge wird deshalb auf 400 m begrenzt. Um trotz der schadstoffbelasteten und sauerstoffarmen Wetter sicher flüchten zu können, ist gemäß § 15 Abs. 10 ABBergV, jede Person im Endlager mit einem Sauerstoffselbstretter auszustatten. Die Flucht vor einer Gefahrenquelle, die sich auf der Frischwetterseite einer Person befindet, führt mit der Wetterrichtung bis zum nächsten unbelasteten Wetterstrom. Mit Übertritt in diesen Frischwetterstrom wird der Gefahrenbereich verlassen. Dabei ist zu beachten, dass es aufgrund starker Hitzeentwicklung beim Brand auch zu einer lokalen Umkehr der Wetter kommen kann. Aus diesem Grund sind daher solche Frischwetterbereiche zu bevorzug, die nicht leicht durch den Brand beeinflusst werden können bzw. die sich näher am Frischwetterschacht befinden.

Befindet sich ein Brand auf der Abwetterseite einer Person, besteht in der Regel nur eine geringe Gefahr. In diesem Fall begibt sich die Person auf kürzestem Weg und den frischen Wettern entgegen zum Frischwetterschacht, von wo aus die Tagesoberfläche erreicht werden kann.

Um die Flucht auch über Distanzen durchführen zu können, die die Haltedauer der persönlich mitgeführten Sauerstoffselbstretter übersteigen, können im Bereich der Wetterbauwerke Fluchtkammern eingerichtet werden, in denen die Flucht sicher unterbrochen werden kann, um sie anschließend gestärkt, mit neuer Ausrüstung und mit aktuellen Informationen fortzusetzen oder auf eine Rettung zu warten.

Um im Gefahrenfall die Ausbreitung von Rauchgasen bei gleichzeitiger Bewetterung großer Teile des Endlagers einzudämmen, bieten sich Wetterbauwerke auf beiden Seiten der Querschläge an. Damit ließen sich Wetterströme in den jeweiligen Querschlägen kurzfristig stark reduzieren und so eine Kontamination anderer Bereiche abwenden. Im Normalbetrieb stehen diese Bauwerke offen und dürfen den Einlagerungsbetrieb und Auffahrungsbetrieb nicht behindern.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

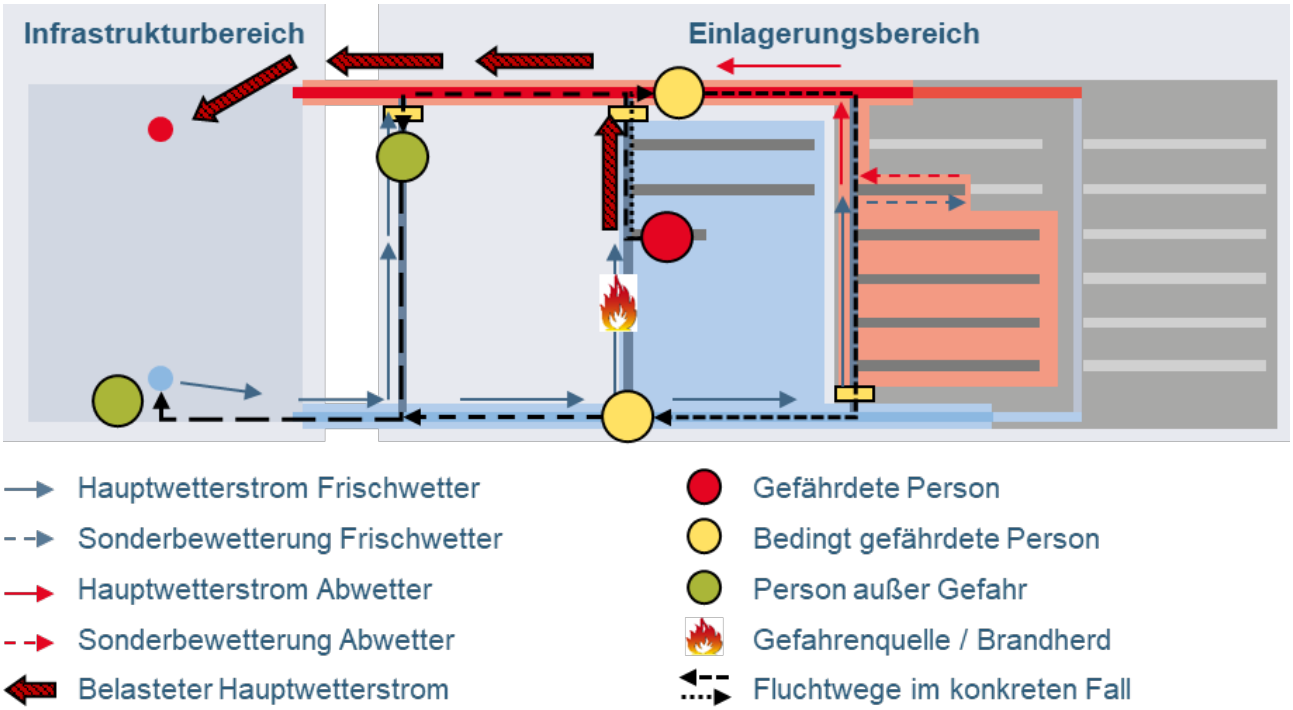


Abbildung 29: Schematische Darstellung des Endlagerbergwerks für Streckenlagerung mit Bewetterungsströmen und exemplarischer Fluchtwegsituation

4.2.6.5 Mögliche Maßnahmen zur Rückholbarkeit

Der Begriff der Endlagerung beschreibt per Definition die Einlagerung radioaktiver Abfälle ohne die Absicht einer Rückholung (§ 2 Nr. 3 StandAG). Um die Reversibilität von Entscheidungen und ihre nachträgliche Korrektur zu ermöglichen, ist nach § 13 EndlSiAnfV dennoch die Rückholbarkeit der eingelagerten Abfälle bis zum Beginn der Stilllegung des Endlagers sicherzustellen. Bei der Rückholbarkeit handelt es sich gemäß § 2 Nr. 3 StandAG um „*die geplante technische Möglichkeit zum Entfernen der eingelagerten Abfallbehälter mit radioaktiven Abfällen während der Betriebsphase*“. Demzufolge endet der Zeitraum, für den die Rückholbarkeit nachzuweisen ist, mit dem Beginn der Stilllegung des Endlagers; daran anschließend wird von einer Bergung der eingelagerten Abfälle gesprochen. Bei der Bergung handelt es sich um ein „*ungeplantes Herausholen von radioaktiven Abfällen aus einem Endlager*“ (§ 2 Nr. 4 StandAG); sie soll während der Stilllegung und für einen Zeitraum von 500 Jahren nach dem vorgesehenen Verschluss des Endlagers möglich sein (§ 14 Abs. 1 EndlSiAnfV). Die Berücksichtigung einer möglichen Bergung bei der vorläufigen Endlagerauslegung im Rahmen der rvSU wird in § 6 Abs. 4 EndlSiUntV nicht gefordert. Sie ist damit nicht Bestandteil der vorläufigen Endlagerauslegung der rvSU, wird aber im Rahmen der Endlagerbehälterentwicklung berücksichtigt, siehe (BGE 2021b). Für die Endlagerauslegung ab Phase II des Standortauswahlverfahrens, die auf der vorläufigen Endlagerauslegung der rvSU aufbaut, muss die Bergung dann entsprechend § 14 EndlSiAnfV berücksichtigt werden. In § 13 EndlSiAnfV werden die Anforderungen an die Rückholung genauer spezifiziert. „*Die Rückholung ist so zu planen, dass der dafür voraussichtlich erforderliche technische und zeitliche Aufwand den für die Einlagerung erfor-*

derlichen Aufwand nicht unverhältnismäßig übersteigt. Die für eine Rückholung erforderlichen technischen Einrichtungen sind während des Betriebs vorzuhalten“ (§ 13 Abs. 2 EndlSiAnfV). „*Maßnahmen, die der Gewährleistung der Rückholbarkeit dienen, dürfen die Langzeitsicherheit des Endlagers nicht gefährden*.“ (§ 13 Abs. 3 EndlSiAnfV).

Bei der Rückholung handelt es sich um eine „*Rückfalloption für noch weniger plausible Entwicklungen*“ (BT-Drs. 19/19291) mit dementsprechend geringer Eintrittswahrscheinlichkeit. Daher wird der Fokus der vorläufigen Endlagerauslegung auf den sicheren Betrieb des Endlagers und die Gewährleistung der Langzeitsicherheit gelegt. Zur Erleichterung der Rückholung sollen möglichst wenige Anpassungen an der Auslegung vorgenommen werden. Trotzdem muss die Endlagerauslegung so erfolgen, dass eine Rückholung möglich ist.

Die Berücksichtigung der Rückholung beginnt bereits mit der Planung des Grubengebäudes, insbesondere der Strecken bzw. der Dimensionierung der Sicherheitspfeiler (vgl. Kapitel 4.2.6.1 und 4.2.7). Diese sollten je nach Rückholungsstrategie entweder breit genug für eine Neuauffahrung einer oder mehrerer Strecken parallel zu einer alten Strecke sein oder ausreichend breit dimensioniert, um trotz Ausbildung einer Auflockerungszone vor der Stilllegung des Endlagerbergwerks ihre Standfestigkeit nicht maßgeblich zu verlieren. Das Grubengebäude wird auf das Mindestmaß an betriebs- und sicherheitstechnisch erforderlichen Strecken, Arbeitsbereichen sowie Tageszugängen begrenzt. Dies minimiert zum einen die Schädigung des Wirtsgesteines und zum anderen die Menge des einzubringenden Versatzes bzw. die Anzahl der Verschlussbauwerke. Die Anbindung der Einlagerungsbereiche an die Tageszugänge über den kürzesten Weg reduziert die Transportstrecken der Endlagergebinde bei der Einlagerung, aber auch bei der Rückholung. Ein weiterer Vorteil kurzer Transportwege ist der verringerte Zeitaufwand zur Wiederauffahrung der einzelnen Strecken bei einer möglichen Rückholung. Die Planung des Grubengebäudes im Rahmen der Einlagerung entspricht also bereits den Anforderungen an das Grubengebäude mit Blick auf eine mögliche Rückholung.

Die Rückholung ist zu jedem Zeitpunkt der Betriebsphase und für eine beliebige Anzahl von Gebinden dann einfach möglich, wenn jeder Teilschritt der Einlagerung umkehrbar ist. Mögliche Maßnahmen zur Gewährleistung der Rückholbarkeit ergeben sich also aus der zusätzlichen Anforderung der Reversibilität in jedem Teilschritt. Nachfolgend sind die Teilschritte aufgeführt und mögliche Maßnahmen zur Umsetzung am Beispiel der Endlagerauslegung für ein Endlager in Tongestein, auf Grundlage des im Rahmen des Forschungs- und Entwicklungsvorhabens ERNESTA (Herold et al. 2018b) erstellten Konzepts zur Rückholung von Endlagergebinden aus Endlagern in Tongestein, beschrieben.

- **Entfernung oder Umfahrung etwaiger Streckenverschlüsse:** Sofern in der jeweiligen Auslegung Streckenverschlüsse oder Migrationssperren vorgesehen sind, müssen diese für die Rückholung entfernt oder umfahren werden. Mögliche Maßnahmen zur Umsetzung für ein Endlager in Tongestein werden in Beispiel 10 aufgeführt.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

Beispiel 10: Mögliche Maßnahmen zur Entfernung oder Umfahrung etwaiger Streckenverschlüsse bei der Rückholung aus einem Endlager in Tongestein

Mögliche Maßnahmen zur Entfernung oder Umfahrung etwaiger Streckenverschlüsse bei der Rückholung aus einem Endlager in Tongestein

In bisherigen Planungen für Tongestein (Herold et al. 2018a) ist eine Umfahrung der massiven Streckenverschlüsse (bestehend aus Betonwiderlagern, Bentonit-Dichtelementen und Asphalt-Dichtelementen) im Übergang vom Infrastrukturbereich zum Einlagerungsbereich bei der Neuauffahrung der Hauptstrecken vorgesehen. Hierfür sollen bei der Planung des Grubengebäudes ausreichend breite Sicherheitspfeiler vorgesehen werden. Dies soll den Prozess der Wiederauffahrung beschleunigen und den Einsatz einer Teilschnittmaschine (TSM) ermöglichen. Im weiteren Verlauf könnte eine Umfahrung aufgrund des begrenzten Platzangebotes im Einlagerungsbereich ggf. nicht möglich sein; dies beträfe auch die dort verbauten Streckenverschlüsse. In einem solchen Fall wäre z. B. der Rückbau der Streckenverschlüsse oder eine Durchörterung mit entsprechend abgestimmter Vortriebtechnologie möglich.

- **Freilegen der Querschläge, Richtstrecken und Einlagerungsstrecken[14]:** Um an die eingelagerten Gebinde zu gelangen, müssten die verfüllten Querschläge, Richtstrecken und Einlagerungsstrecken wieder freigelegt werden. Mögliche Maßnahmen zur Umsetzung für ein Endlager in Tongestein werden in Beispiel 11 aufgeführt.

Beispiel 11: Mögliche Maßnahmen zum Freilegen der Querschläge, Richtstrecken und Einlagerungsstrecken bei der Rückholung aus einem Endlager in Tongestein

Mögliche Maßnahmen zum Freilegen der Querschläge, Richtstrecken und Einlagerungsstrecken bei der Rückholung aus einem Endlager in Tongestein

Eine Wiederauffahrung der verfüllten Strecken in Tongestein würde eine von der Auffahrung selber abweichende Technik erfordern. Die Auffahrung der Strecken bei Errichtung erfolgt im erarbeiteten Konzept gebirgsschonend über TSM. Diese könnten dann bei einer Auffahrung neuer Strecken im Rahmen der Rückholung ebenfalls eingesetzt werden. Für die Wiederauffahrung versetzter Strecken eignet sich der Einsatz einer TSM nicht, da der Zeitaufwand und Verschleiß durch wechselnde Versatzmaterialen zu groß wäre. Außerdem führt die anzunehmende Beschaffenheit des Versatzes möglicherweise durch ein Verkleben des Schneidwerkes zu hohen Stillstandzeiten der TSM. Daher wäre für die Rückholung von Gebinden aus versetzten Strecken der Einsatz von Tunnelbaggern von Vorteil, die weniger anfällig gegen-

[14] In den vorläufigen Auslegungen des Endlagers im Tongestein sowie im Steinsalz wird das Konzept der Streckenlagerung zugrunde gelegt, siehe Kapitel 4.2.5.

Mögliche Maßnahmen zum Freilegen der Querschläge, Richtstrecken und Einlagerungsstrecken bei der Rückholung aus einem Endlager in Tongestein

über wechselnden und sehr weichen Versatzmaterialen sind. In die Planung des Streckenausbaus muss der mögliche Rückholungszeitraum einbezogen werden, um eine Einschätzung über den erwarteten Zustand des Ausbaus zum Zeitpunkt der Rückholung treffen zu können. Es ist nicht davon auszugehen, dass der Ausbau zum spätesten Rückholungszeitraum noch intakt ist. In diesem Fall müssten die gelösten Teile des Ausbaus analog zum Versatz geräumt werden. Eine erneute Ertüchtigung des Ausbaus oder ein Neueinbau würde dann zwingend erforderlich sein, um die Betriebssicherheit während der Rückholung zu gewährleisten.

In einigen Einlagerungskonzepten kann aufgrund zu hoher Temperaturen in den verfüllten Einlagerungsstrecken ggf. eine Neuauffahrung von parallelen Strecken und ein anschließender Rückbau des verbleibenden Pfeilers sinnvoll sein, um die Strecken freizulegen (Herold et al. 2018b). Hierbei wäre jedoch zu berücksichtigen, dass dies durch die notwendigerweise breiteren Pfeiler den Flächenbedarf des Endlagers erhöht und sich so negativ auf die Langzeitsicherheit auswirken kann. Falls dies der Fall sein sollte, sind nach Möglichkeit andere Maßnahmen zur Rückholung zu wählen, auch wenn sie mit einem höheren Aufwand verbunden sind.

- **Transport des rückgewonnenen Haufwerks:** Ein untertägiger Verbleib des Haufwerks kann die anzupassende Prozesskette verkürzen. Gegebenenfalls sind zusätzlich Räume und Flächen für die Lagerung des Materials vorzuhalten bzw. ist zu überlegen dieses freizumessen. Es muss sichergestellt werden, dass der Massenstrom an gewonnenem Haufwerk vom Gewinnungsort z. B. in eine andere Strecke oder nach Übertage transportiert werden kann. Dazu gehören gegebenenfalls Fahrzeuge, Wagons aber auch Transportkapazitäten in den Schächten, die je nach Strahlenschutzbereich zu unterscheiden sind.
- **Freilegen des Gebindes:** Dokumentierte Positionen von Abfallgebinden erleichtern das Auffinden und Freilegen konkreter Abfallgebinde. Zusätzlich können geophysikalische Verfahren zur genauen Lokalisierung verwendet werden. Die Aufteilung unterschiedlicher Abfälle auf verschiedene Strecken hilft ebenfalls bei der selektiven Rückholung bzw. beim Identifizieren des rückzuholenden Abfalls und der erforderlichen Schutzmaßnahmen. Auch der Verzicht auf Tragzapfen am Behälter kann das Freilegen erleichtern. Die Rückgewinnung des Versatzes führt zu einer Mischung der bergbaulichen Tätigkeiten, die üblicherweise im Überwachungsbereich erfolgen, mit denen der Rückholung, die im Kontrollbereich erfolgen. Während der Annäherung an das Gebinde sind die Wetter zu überwachen und regelmäßige Messungen der Aktivität des Haufwerks vorzunehmen (Herold et al. 2018a). Mögliche Schritte zum Freilegen des Gebindes für ein Endlager in Tongestein werden in Beispiel 12 aufgeführt.

Beispiel 12: Mögliche Maßnahmen zum Freilegen des Gebindes bei der Rückholung aus einem Endlager in Tongestein

Mögliche Maßnahmen zum Freilegen des Gebindes bei der Rückholung aus einem Endlager in Tongestein

Im Rahmen eines möglichen Rückholungskonzepts in Tongestein (Herold et al. 2018a) wurde geplant, die Endlagergebinde vollständig freizulegen, um sie anschließend mit entsprechendem Gerät aus der Strecke entnehmen und abtransportieren zu können. Dieser Vorgang wurde grundsätzlich in 4 Schritten geplant:

1. Entfernung des Buffers[15] mit Hilfe eines Hydraulikbaggers
2. Aufschütten eines temporären Arbeitsplanums neben dem Sockel, auf dem das Gebinde liegt
3. Entfernen des übrigen Buffers durch den Hydraulikbagger
4. Entfernen des temporären Schotterplanums

- **Wiederaufnahme des Gebindes:** Eine Maschine muss die Endlagergebinde erreichen, unabhängig von eventuell vorhandenen Tragzapfen greifen, anheben und bis zu einem Transportwagen transportieren und ihn auf diesen verladen können. In Beispiel 13 wird eine entsprechende Vorrichtung skizziert. Handhabbarkeit und Identifizierbarkeit der Gebinde können durch entsprechend ausgelegte Kennzeichnungen an den Gebinden und eine lückenlose Dokumentation des Einlagerungsbetriebes unterstützt werden. Dementsprechend ergeben sich aus der Rückholbarkeit Anforderungen an den Behälter, die bei dessen Entwicklung zu berücksichtigen sind (siehe hierzu auch BGE (2021b, Kapitel 4.3)).

Beispiel 13: Mögliche Maßnahmen zur Wiederaufnahme des Gebindes bei der Rückholung aus einem Endlager in Tongestein

Mögliche Maßnahmen zur Wiederaufnahme des Gebindes bei der Rückholung aus einem Endlager in Tongestein

Für die Entnahme des Gebindes aus der Strecke wurde im Rahmen des Forschungs- und Entwicklungsvorhabens ERNESTA (Herold et al. 2018b) eine „modifizierte Einlagerungsvorrichtung in Strecken“ (mELVIS, siehe Abbildung 30) skizziert. Diese Vorrichtung wurde in Anlehnung an eine mögliche gleislose Einlagerungsvorrichtung konzipiert und soll das Endlagergebinde analog zum Prozess des Ablegens beim Versatz bei einer möglichen Rückholung aus der freigelegten Strecke wiederaufnehmen.

[15] Als Buffer wird das Versatzmaterial der Einlagerungsstrecken bezeichnet.

Mögliche Maßnahmen zur Wiederaufnahme des Gebindes bei der Rückholung aus einem Endlager in Tongestein

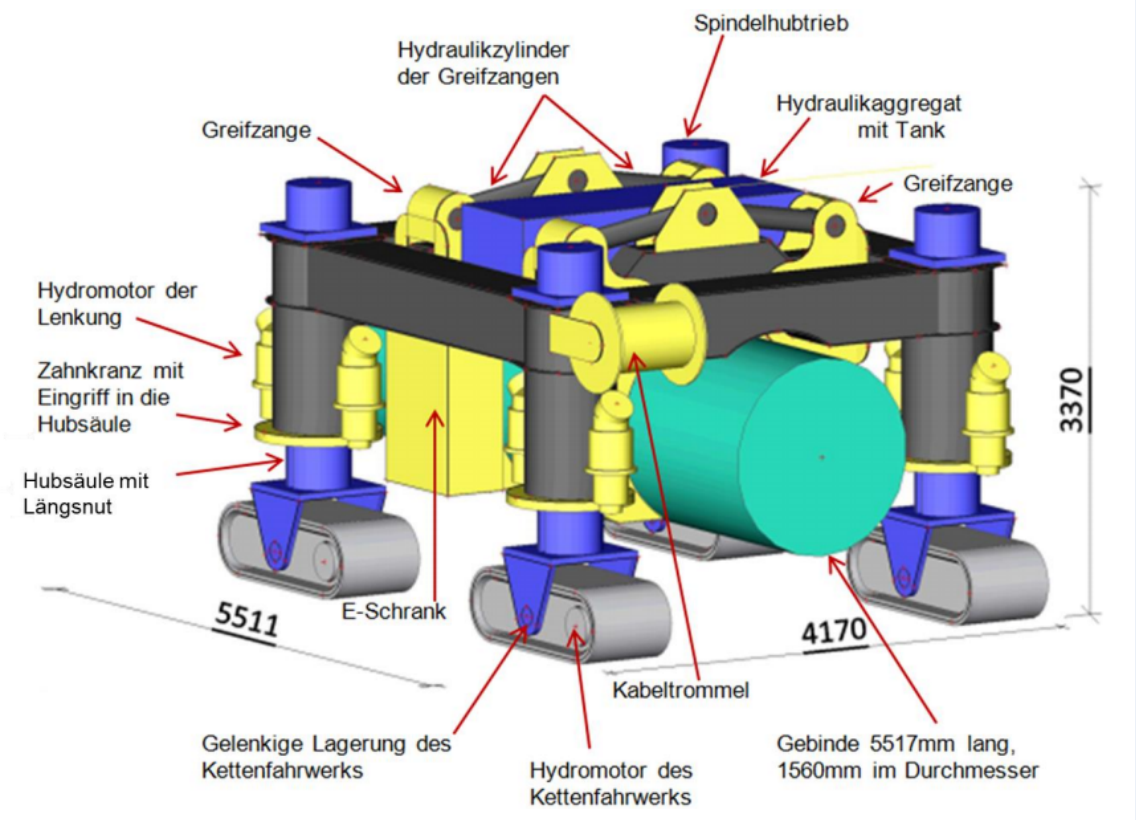


Abbildung 30: Darstellung der mELVIS im angehobenen Zustand mit Endlagerbehälter (Herold et al. 2018b)

- **Transport zum Schacht[16]:** Abhängig von der noch vorhandenen Gleistechnik können gleisgeführte oder gleislose Wagen verwendet werden, um die Gebinde zum Schacht zu transportieren. Diese können bei entsprechender Auslegung auch im Schacht und Übertage verwendet werden. Nachfolgend ist exemplarisch die im Forschungs- und Entwicklungsvorhaben ERNESTA (Herold et al. 2018b) skizzierte Variante des Transports beschrieben:

  Die mELVIS würde demzufolge das jeweilige Gebinde von der Einlagerungsstrecke bis zum zentralen Übergabepunkt des gesamten Einlagerungsfeldes im Querschlag transportieren und ihn dort an einen gleisgebundenen Plateauwagen übergeben. Der Plateauwagen mit dem Gebinde würde dann von einer batteriebetriebenen Lok bis zum Schacht transportiert.

[16] Gemäß der Annahme in Kapitel 4.2.6.1 wird von einem Schacht als Tageszugang ausgegangen.

- **Transport des Gebindes an die Tagesoberfläche:** Die Schachtförderung muss den Transport der Gebinde nach Übertage sicherstellen. Am Schacht können z. B. Plateauwagen mit Gebinden auf Schienen in den Förderkorb verfahren werden und nach Übertage transportiert werden.

Durch die Einlagerung von wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen kommt es zu einer Erwärmung des umliegenden Gebirges. Die resultierenden Temperaturen sind insbesondere abhängig von den Eigenschaften des Gesteins, dem Endlagerkonzept inklusive der räumlichen Konfiguration der Einlagerungsbereiche und der Auslegungstemperatur an der Behälteroberfläche. Die hierdurch veränderten Umgebungsbedingungen sind in allen Teilschritten einer möglichen Rückholung zu beachten. Für den sicheren Betrieb sind die Umgebungstemperaturen zu begrenzen. Für das Personal sind die maximalen Arbeitstemperaturen gemäß der KlimaBergV einzuhalten. Daher ist eine entsprechende Kühlung zwingend notwendig. Als erste Kühlungsmaßnahme ist eine Bewetterung vorzusehen. Hierfür kann je nach Platzangebot eine zusätzliche Zugangsstrecke zur Vergrößerung der Wettermenge sinnvoll sein. Zur Einhaltung der aus den Anforderungen an einen sicheren Betrieb resultierenden Temperaturgrenzwerte kann zudem eine zusätzliche technische Kühlung der Wetter notwendig werden.

4.2.6.6 Mögliche Verschluss- und Versatzmaßnahmen

Entsprechend des Endlagersystems Typ 1 wird der langzeitsichere Einschluss des radioaktiven Abfalls von einem oder mehreren einschlusswirksamen Gebirgsbereichen im Zusammenwirken mit den technischen und geotechnischen Barrieren des Endlagersystems sichergestellt. Durch die Erstellung des Endlagerbergwerks werden im Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion jedoch Hohlräume erstellt, die über die Tageszugänge mit dem Deck- und Nebengebirge und schließlich mit der Biosphäre verbunden sind. Damit besteht ein direkter Transportweg für Grundwasser in das Endlager hinein sowie für in Grundwasser gelöste oder gasförmige Radionuklide aus dem Endlager heraus. Dieser Transportweg muss abgedichtet werden, um die Abfälle im einschlusswirksamen Gebirgsbereich in der Nachverschlussphase so gut wie möglich einzuschließen. Zu diesem Zweck werden die Hohlräume nach § 18 Abs. 2 EndlSiAnfV möglichst zügig und möglichst vollständig (§ 19 Abs. 2 EndlSiAnfV) nach Ende ihrer betrieblichen Funktion verfüllt („versetzt“) und verschlossen. Durch die Verschluss- und Versatzmaßnahmen werden also geotechnische Barrieren errichtet, um den Einschluss der radioaktiven Abfälle im Zusammenwirken mit dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich für den gesamten Untersuchungszeitraum sicherzustellen. Für das geotechnische Barrieresystem gilt § 4 Abs. 2 EndlSiAnfV, nach dem ein *„robustes, gestaffeltes System verschiedener Barrieren mit unterschiedlichen Sicherheitsfunktionen“* vorzusehen ist. Es sind also entlang des Transportwegs zwischen den radioaktiven Abfällen und der Biosphäre mehrere verschiedene Barrieren erforderlich (vgl. Kapitel 4.1).

Im Rahmen des geotechnischen Barrierensystems wird zwischen Verschluss- und Versatzmaßnahmen unterschieden. Als Verschlussbauwerke werden räumlich begrenzte Bauwerke verstanden, die an ausgewählten Stellen im Endlagerbergwerk aus verschiedenen Materialien und Funktionselementen errichtet werden. Ein Verschlussbauwerk soll seine abdichtende Funktion möglichst zügig

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

nach Einbau erfüllen. Der Versatz dient der Verfüllung aller weiteren Hohlräume. Seine Abdichtfunktion ist vor allem langfristig vorgesehen und basiert auf der zunehmenden Verbindung mit dem Wirtsgestein in der Nachverschlussphase (z. B. durch Gebirgskonvergenz und Kompaktion des Versatzmaterials oder durch Quellen bei Tonmineralen durch Kontakt mit Grundwasser). Die Abdichtwirkung des Versatzes im Verbund mit dem Wirtsgestein soll seine volle Funktionsfähigkeit erreichen, bevor die Gültigkeit der bautechnischen Nachweise der Verschlussbauwerke aufgrund ihrer langen Lebensdauer eingeschränkt ist. Neben der Abdichtfunktion können Versatzmaßnahmen auch weiteren oder anderen Zwecken dienen wie der mechanischen Stützung des Gebirges zur Verringerung von Gebirgsbewegungen und Rissbildung oder der Bereitstellung von Porenvolumen zur Speicherung von Fluiden. Weitere Verschluss- und Versatzmaßnahmen betreffen Erkundungsbohrungen. Diese können Transportwege durch das Wirtsgestein eröffnen und müssen deshalb langzeitsicher verfüllt und verschlossen werden. Die Sicherheitsfunktionen der Verschluss- und Versatzmaßnahmen sind in Kapitel 4.1.3.3 dargestellt.

Nach § 18 Abs. 2 EndlSiAnfV ist der für die Endlagerung genutzte Bereich des Endlagerbergwerks gegen das restliche Endlagerbergwerk zu verschließen. Diese Anforderung wird erfüllt, indem jeweils ein Verschlussbauwerk in den beiden Richtstrecken zwischen Einlagerungsbereich und Infrastrukturbereich platziert wird. Diese Verschlussbauwerke können baugleich sein und bestehen jeweils aus mehreren abdichtenden Elementen. Innerhalb des Einlagerungsbereichs ist auch das abschnittsweise Verschließen im Zuge des Einlagerungs- und Verfüllfortschritts eine mögliche Maßnahme. Einzelne Einlagerungsfelder können z. B. an beiden Enden des Querschlags mit einem Verschlussbauwerk versehen werden (Jobmann & Lommerzheim 2015). Alternativ können auch Verschlussbauwerke in den Richtstrecken im Einlagerungsbereich platziert werden. Selbst der Verschluss der einzelnen Einlagerungsstrecken ist denkbar, um die eingelagerten Endlagergebinde schon in der Betriebsphase vom restlichen Endlagerbergwerk abzuschließen und Wechselwirkungen zum Einlagerungsbetrieb (z. B. über den luftgefüllten Porenraum des Versatzes) zu minimieren.

Die Anzahl und Platzierung von Verschlussbauwerken über die mindestens notwendigen Streckenverschlüsse zum Infrastrukturbereich hinaus wird im Anschluss an die rvSU mit Blick auf die Langzeitsicherheitsuntersuchungen und die Betriebssicherheitsuntersuchungen für die jeweiligen Untersuchungsräume erarbeitet. Im Rahmen der rvSU beschränkt sich die vorläufige Endlagerauslegung auf die unbedingt notwendigen Streckenverschlüsse. Deren Lage und die Lage weiterer denkbarer Streckenverschlüsse mit dem Ziel des Einschlusses der Abfälle in der Nachverschlussphase wird in Abbildung 31 dargestellt.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

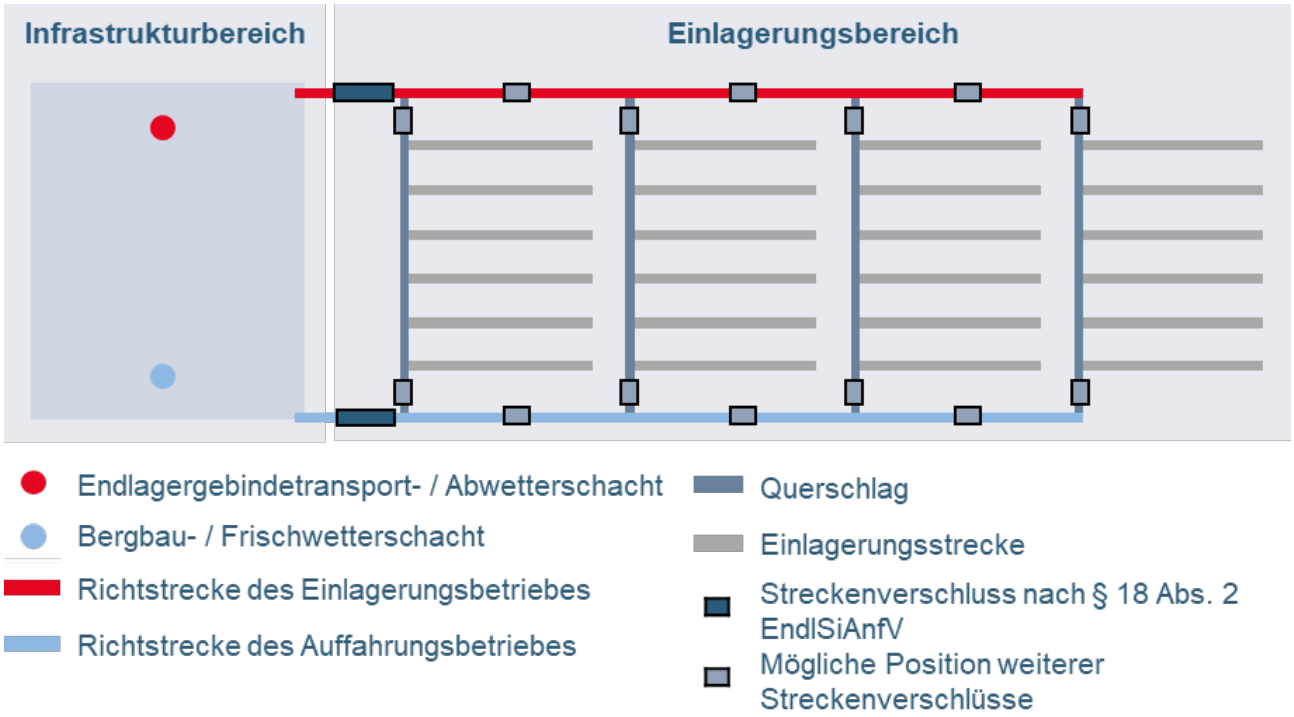


Abbildung 31: Darstellung von Positionen von Streckenverschlüssen im Endlager

Für den Einschluss der radioaktiven Abfälle sind die Verschlussbauwerke innerhalb der Grenzen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs maßgeblich. Diese schließen mindestens den Einlagerungsbereich ein. In diesem Fall schneidet die Grenze des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs die Richtstrecken bei den vorgesehenen Streckenverschlüssen. Die für die Langzeitsicherheit relevanten Verschlussbauwerke sind dann ausschließlich die genannten Streckenverschlüsse. Umfasst der einschlusswirksame Gebirgsbereich außerdem den Infrastrukturbereich, schneiden seine Grenzen die Schächte. Dann sind auch die Schachtverschlüsse als Teil des Barrierensystems vorzusehen. Die Funktion der Schachtverschlüsse besteht vor allem in der Abdichtung des Endlagers gegenüber wasserführenden Schichten im Deckgebirge. Der Schachtverschluss weist hierfür ebenfalls mehrere Dichtelemente auf. Weitere Funktionselemente stellen die Stabilität und dauerhafte Funktion der Dichtelemente sicher. Im Deckgebirge ist der Schacht weiterhin so zu verfüllen, dass wasserführende Schichten des Deckgebirges in unterschiedlichen Teufen voneinander getrennt bleiben.

Im Rahmen der rvSU kann nach § 7 Abs. 6 EndlSiUntV davon ausgegangen werden, dass die geotechnischen Barrieren ihre Funktion im vorgesehenen Funktionszeitraum erfüllen. Eine genaue Planung und Bemessung der Verschlussbauwerke oder eine Festlegung der Zusammensetzung von Versatzmaterial findet deshalb im Rahmen der rvSU nicht statt.

Beispiel 14 und Beispiel 15 zeigen mögliche Verschluss- und Versatzmaßnahmen für die Endlagerung im Opalinuston und in steil lagerndem Steinsalz.

Beispiel 14: Wirtsgesteinsspezifische Verschluss- und Versatzmaßnahmen im Opalinuston

Wirtsgesteinsspezifische Verschluss- und Versatzmaßnahmen im Opalinuston

Im laufenden FuE Projekt „Aktualisierung der Sicherheits- und Nachweismethodik für die HAW-Endlagerung im Tongestein in Deutschland“ (PTKA 2021) wurde zusammengetragen und näher erläutert, welche Elemente und Materialien für die Verschluss- und Verfüllmaßnahmen eines Endlagers im Tongestein in Frage kommen. Diese Liste umfasst:

An Versatzmaßnahmen:

- Versatz in den Einlagerungsstrecken (Buffermaterial)
- Ausbruchsmaterial angereichert mit quellfähigen Tonmineralen
- Verfüllsäulen und Widerlager aus Schotter, evtl. mit Sand vermischt

An Verschlussmaßnahmen:

- Dichtelemente aus Bentonit
- Dichtelemente aus Bentonit mit Äquipotenzialsegmenten
- Dichtelemente aus Asphalt und Bitumen
- Dichtelemente aus Beton
- Widerlager aus Beton
- Filterschichten

Die folgenden Ausführungen, sofern nicht anders referenziert, wurden diesen Arbeiten sinngemäß mit leichten Anpassungen für die Anforderungen der rvSU entnommen.

Buffermaterial

Das Versatzmaterial der Einlagerungsstrecken wird als Buffer bezeichnet. Es umschließt die Endlagergebinde am Einlagerungsort. Der Buffer kann bei Freisetzung von Radionukliden schon eine erste rückhaltende Wirkung entfalten. Um das Endlagergebinde vollständig zu umschließen, wird der Behälter auf einem Sockel aus Formsteinen aus quellfähigem Tonmaterial abgelegt und mit Granulat und/oder Formsteinen aus dem gleichen Material umschlossen, das den Resthohlraum möglichst vollständig ausfüllen soll. Die gesamte Einlagerungsstrecke wird so verfüllt. Durch den hohen Tonmineralanteil des Materials quillt es bei Lösungszutritt auf. Dadurch werden verbleibende Lücken im Laufe der Zeit geschlossen bis der angestrebte Stützdruck vollständig aufgebaut ist. Dieser Stützdruck muss spätestens dann aufgebaut sein, wenn durch Korrosionsprozesse der verbliebene Ausbau nachgibt. Der Buffer verhindert in diesem Fall durch den aufgebrachten Stützdruck die Ausbildung einer neuen Auflockerungszone im umliegenden Gebirge. Während der frühen Nachverschlussphase, in der mit Gasbildung durch Korrosionsprozessen zu rechnen ist, soll der Buffer außerdem eine ausreichende Durchlässigkeit zur Aufnahme dieser aufweisen. Diese austretenden Gase sollen sich nach

Wirtsgesteinsspezifische Verschluss- und Versatzmaßnahmen im Opalinuston

dem Prinzip des geringsten Widerstandes den Weg zur Ausbreitung durch den Buffer suchen und nicht durch den Ausbau und die umliegende Auflockerungszone ins Gebirge gelangen. Der Buffer übernimmt zusammenfassend also folgende Aufgaben (Jobmann & Lommerzheim 2015):

- Aufbau eines Stützdrucks gegenüber dem auflaufenden Gebirge
- Erhöhte Aufnahmefähigkeit für Gase in der frühen Nachverschlussphase
- Rückhaltung von Radionukliden

Denkbar wäre der Einsatz von arteigenem Ausbruchsmaterial das bei Bedarf zusätzlich mit quellfähigen Tonmineralen versetzt wird (Jobmann & Lommerzheim 2015). Von dem Einsatz von reinem Bentonit wird in (Jobmann & Lommerzheim 2015) abgesehen, da die Beschaffung des Bentonits auf Grund der Menge aus verschiedenen Gewinnungsgebieten erforderlich wäre und somit eine Homogenisierung des eingesetzten Buffermaterials schwierig wäre.

Ausbruchsmaterial als Streckenversatz

Für den Streckenversatz im Grubengebäude wird arteigenes Ausbruchsmaterial vorgesehen, dass bei Bedarf mit Bentonit oder weiteren Tonmineralen versetzt werden kann. Das Tonmaterial weißt sehr gute Quelleigenschaften auf und kann somit eine Dichtwirkung durch das Verschließen der offenen Poren erzeugen sowie dem Gebirge gegenüber einen Stützdruck entfalten. Zugemischtes Bentonit weist gute Eigenschaften bezogen auf die Rückhaltung von Radionukliden auf. Ein entscheidender weiterer Vorteil bei der Verwendung arteigner Ausbruchsmaterialen ist die gute Verfügbarkeit am Standort in weitestgehend homogener Qualität.

Verfüllsäulen und Widerlager aus Schotter

Der Einsatz von Hartgesteinsschotter, bei dem eine geringe Setzung nachgewiesen werden kann (z. B. Basalt), eignet sich gut für das Verfüllen von Schachtsäulen. Dabei muss die Festigkeit ausreichend groß sein, um den Belastungen durch die gesamte Verschlusssäule standzuhalten. Sollte eine chemische Beständigkeit der Schachtverfüllung gefordert sein, kann chemisch reaktionsträger Quarz als Schottermaterial eingesetzt werden. Eine Beimischung von Sand kann dazu beitragen, die Kapillarspannung gegenüber Gasen zu verringern.

Dichtelemente aus Bentonit

Unter Bentonit wird ein quellfähiges Gemisch verschiedener Tonminerale verstanden, das einen Montmorillonitgehalt von größer 50 % beinhaltet. Bei Wasserzutritt reagiert der Bentonit mit Volumenvergrößerung (er quillt), verspannt sich gegen die Streckenkontur und dichtet den Streckenquerschnitt ab. Der Einsatz von Bentonit zur Abdichtung von Tageszugängen und untertägigen Bereichen im konventionellen Bergbau ist Stand der Technik und seit Jahren erfolgreich im Einsatz. Besonders bezogen auf den Einsatz von Calzium-Bentonit (Ca-Ben-

Wirtsgesteinsspezifische Verschluss- und Versatzmaßnahmen im Opalinuston

tonit) gibt eine Vielzahl von Forschungsprojekten, die die günstigen Eigenschaften als Verschlussmaterial belegen. (z. B. (Breidung 2002)). Eine weitere wichtige Eigenschaft des Bentonits als Verschlussmaterial ist die Sorptionsfähigkeit gegenüber vielen Radionukliden.

Dichtelemente aus Bentonit mit Äquipotenzialsegmenten

Bei diesem Dichtelement wechseln sich Bentonitelemente und Sandelemente ab. Bei Zufluss von Grundwasser kann die resultierende Aufsättigung und Quellung des Bentonits ungleichmäßig erfolgen. Durch die Sandelemente werden diese Ungleichmäßigkeiten auf ein Betonitelement beschränkt und damit in ihrer Ausbreitung unterbrochen. In Schachtverschlüssen wird lokal zutretendes Grundwasser über den Porenraum der Sandelemente gleichmäßig über die Querschnittsfläche des Schachts verteilt. Damit wird Kanalisierungen im Schachtverschluss vorgebeugt. Der Aufsättigungsprozess der Bentonitelemente wird damit vergleichmäßigt.

Dichtelemente aus Asphalt und Bitumen

Bei Bitumen handelt es sich um ein Gemisch aus verschiedensten Kohlenwasserstoffen. Bei Zimmertemperatur ist Bitumen im Allgemeinen fest. Mit zunehmender Temperatur sinkt die Viskosität und das Material wird zähflüssiger. Bitumen ist wasserunlöslich und gleichzeitig von Wasser undurchdringlich sowie gegenüber Salzen, aggressiven Wässern, Säuren und Laugen weitgehend beständig. Im zähflüssigen Zustand eignet es sich sehr gut, um Risse und Klüfte zu verschließen und weißt eine hohe Haftung an anderen Materialen auf.

Werden dem Bitumen Gesteinskörnungen zugemischt, spricht man von Asphalt. Durch ein frei wählbares Verhältnis von Bitumen und Gesteinszusätzen können die Materialeigenschaft an das Einsatzgebiet angepasst werden. Bitumen/Asphalt wird seit Jahren zur sofortigen Abdichtung von wasserführenden Gebirgsbereichen im Bergbau eingesetzt.

Der Einfluss der Alterungsprozesse (physikalische und chemische Alterungsprozesse sowie mikrobieller Abbau) bezogen auf die Langzeitbeständigkeit und die damit zeitlich begrenzt mögliche Nachweisführung für den Einsatz in einem Endlager für radioaktive Abfälle wird aktuell fortlaufend weiter untersucht. Bitumen wird als Material mit sofortiger Dichtwirkung im Verschlusssystem berücksichtigt.

Dichtelemente aus Beton

Beton besteht im Wesentlichen aus Zement, Gesteinskörnung, Zusatzstoffen und Wasser. International wurde die Machbarkeit von Dichtelementen aus Beton im Tongestein und im Kristallingestein in verschiedenen Experimenten untersucht: z. B. im DOPAS Projekt (Hansen et al. 2016) mit den Experimenten DOMPLU und POPLU und im Experiment TSX (Chandler et al. 1998).

Wirtsgesteinsspezifische Verschluss- und Versatzmaßnahmen im Opalinuston

Widerlager aus Beton

Widerlager werden im Rahmen des Verschlusskonzeptes vorgesehen um quellfähige Materialien wie z. B. Bentonit an einer Ausbreitung längs des Streckenquerschnitts zu hindern und somit den Aufbau des notwendigen Stützdruckes an die Gebirgskontur sicher zu stellen. Widerlager müssen durch ihre Geometrie fest im Gebirge verankert sein. Zur Vermeidung von Wechselwirkungen und vorzeitigen Alterungserscheinungen durch eintretende Porenwässer wird der Einsatz von low-pH Beton empfohlen. Dieser besteht nach aktuellem Stand aus rissarmen, alkalifreien Zementphasen frei von Portlandit.

Filterschichten

Filterschichten dienen dem Erosions- und Suffosionsschutz, sowie einer gleichmäßigen Verteilung des hydraulischen Druckes durch zutretende Lösungen. Die mineralische Zusammensetzung und Dicke der Filterschicht ist anforderungsgerecht an den Einsatzort anzupassen.

Beispiel Streckenverschluss Richtstrecken

In den Richtstrecken zwischen dem Einlagerungsbereich und dem Infrastrukturbereich werden Streckenverschlüsse positioniert. Diese sollen den Zutritt von Grundwasser aus dem Schacht in den Einlagerungsbereich verzögern. Diese Funktion soll der Verschluss möglichst lange aufrechterhalten. Hierzu ist ein Asphaltdichtelement für eine instantane Abdichtung nach Einbau schachtseitig vorgesehen. Es werden zwei Bentonitdichtelemente vorgesehen. Durch Schlitze in das umliegende Gebirge soll die Auflockerungszone durchbrochen und effizienter abgedichtet werden. Der Verschluss wird von Betonwiderlagern eingespannt und am Platz gehalten. Zwischen den Bentonitelementen befindet sich ein zusätzliches Widerlager. Der Streckenverschluss hat zu einem späteren Zeitpunkt auch eine rückhaltende Wirkung gegenüber migrierenden Lösungen aus dem Einlagerungsbereich heraus. Eine beispielhafte Skizze für den Streckenverschluss zeigt Abbildung 32. Folgende Anforderungen werden an den Streckenverschluss gestellt:

- Verzögerung des Schachtseitigen Lösungszutrittes (auch instantan nach Einbau)
- Verzögerung der Fluidbewegung aus den Einlagerungsbereichen
- Mechanische Stabilität gegenüber dem Gebirgsdruck
- Chemische Stabilität über den Funktionszeitraum

Die Materialauswahl kann entsprechend der Umgebungsbedingungen vor Ort variiert werden. Mögliche Zusammensetzungen und geeignete Materialkennwerte wie z. B. die Permeabilität werden in (Jobmann & Lommerzheim 2015) diskutiert.

Wirtsgesteinsspezifische Verschluss- und Versatzmaßnahmen im Opalinuston

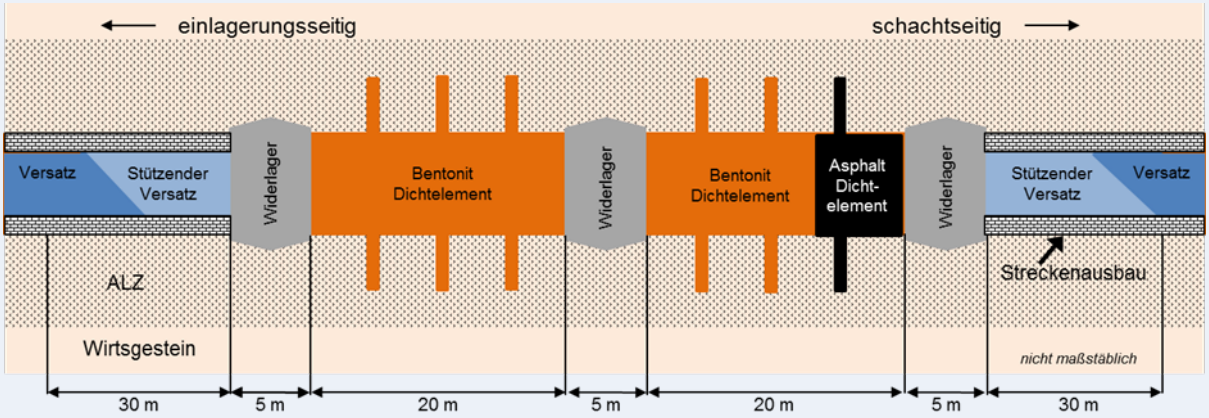


Abbildung 32: Beispiel für ein Konzept für einen Streckenverschluss im Opalinuston (Jobmann & Lommerzheim 2015)

Werden weitere Streckenverschlüsse im Einlagerungsbereich vorgesehen, können diese prinzipiell identisch oder mit nur einem Bentonitdichtelement vorgesehen werden. Das Asphaltdichtelement ist dann vorzugsweise in der Richtung des Einlagerungsbereichs zu platzieren, um in der frühen Nachverschlussphase evtl. radionuklidbelastete Lösungen in ihrer Migration aus dem Einlagerungsbereich heraus zu verzögern.

Beispiel Schachtverschluss

Für das Endlagerkonzept in einer geringmächtigen Tonformation wird in (Jobmann & Lommerzheim 2015) das geologische Profil aus (Reinhold et al. 2016) zu Grunde gelegt. Als Wirtsgestein wird ein Opalinuston angenommen und das generische Endlager in einer Teufe von 680 m errichtet. Ein mögliches Konzept für einen Schachtverschluss mit den erläuterten Funktionselementen kann Abbildung 33 entnommen werden.

Folgende Anforderungen werden im Sicherheitskonzept (Kapitel 4.1.3.3) an den Schachtverschluss gestellt:

- Verzögerung von Lösungsbewegungen längs der Schachtachse
- Mechanische Langzeitstabilität der Widerlager gegen litho- und hydrostatische Drücke und gegenüber dem Quelldruck der Tonelemente
- Chemische Stabilität über den Funktionszeitraum

Wirtsgesteinsspezifische Verschluss- und Versatzmaßnahmen im Opalinuston

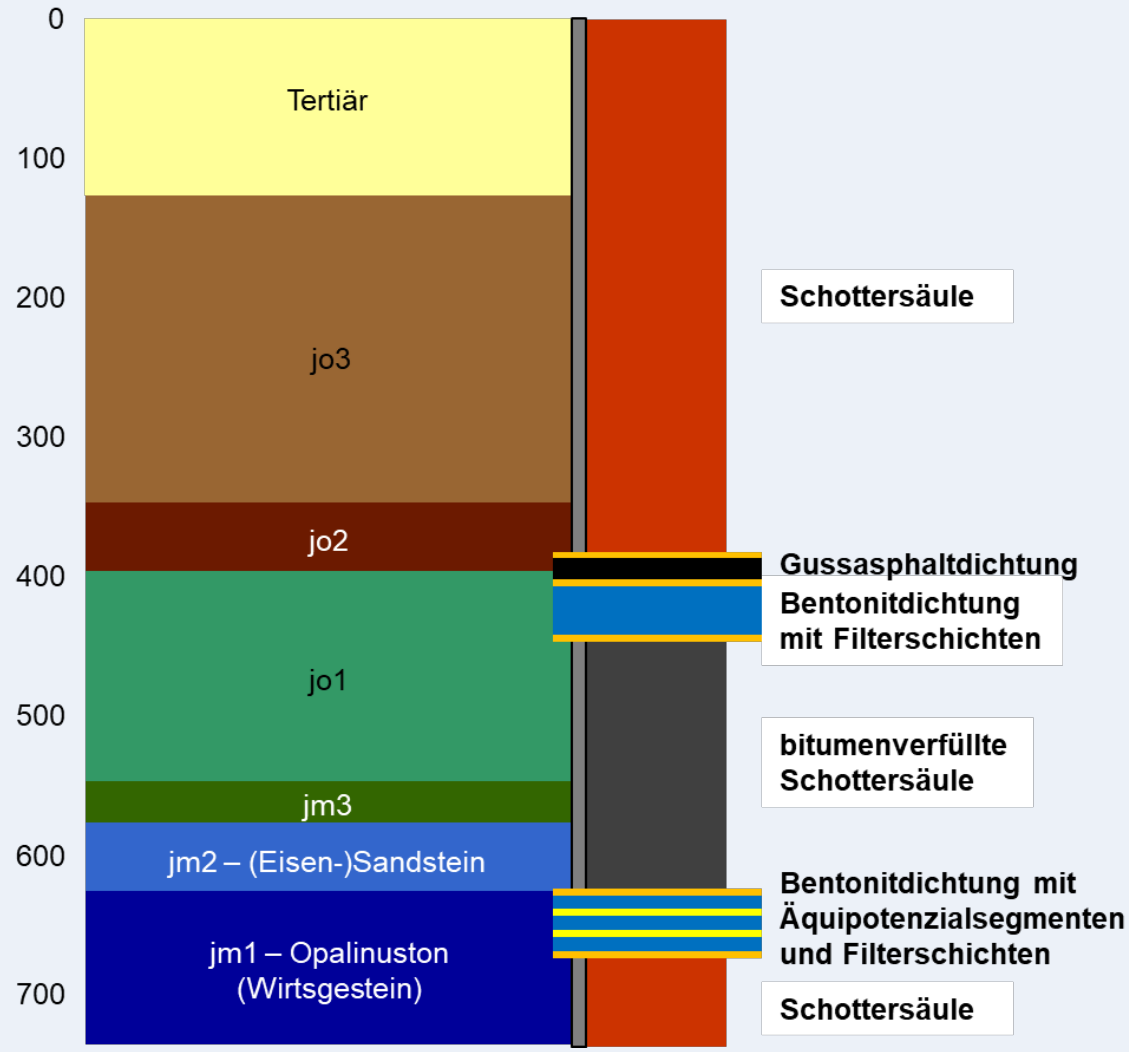


Abbildung 33: Beispiel für ein Konzept für einen Schachtverschluss für ein Endlager im Opalinuston (Herold et al. 2020b)

Beispiel 15: Wirtsgesteinsspezifische Verschluss- und Versatzmaßnahmen in steil lagerndem Steinsalz

Wirtsgesteinsspezifische Verschluss- und Versatzmaßnahmen in Steinsalz in steiler Lagerung

In steil lagernden Salzformationen wurden die Maßnahmen zum Verschluss- und Versatz des Endlagers insbesondere im Rahmen der Vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG) detailliert untersucht und insbesondere in (Bollingerfehr et al. 2012) sowie in (Müller-Hoeppe et al. 2012) detailliert dargestellt. In (Bertrams et al. 2020a) wurde zuletzt ein aktualisierter Stand zusammengefasst. Diese Dokumente stellen die Basis für die folgenden Ausführungen dar, sofern nicht anders referenziert.

Im Rahmen der rvSU werden folgende Verschluss- und Versatzmaßnahmen für ein Endlager in steil lagerndem Steinsalz vorgesehen:

Der Einlagerungsbereich wird vollständig mit naturtrockenem Salzgrus versetzt. Der Versatz erfolgt sukzessive: innerhalb der Einlagerungsstrecken wird der Hohlraum um ein Endlagergebinde herum direkt nach dessen Einlagerung verfüllt. Querschläge und Abschnitte der Richtstrecken werden verfüllt, sobald sie für den Betrieb des Endlagers nicht mehr notwendig sind. Auch in den Richtstrecken wird nach (Bollingerfehr et al. 2018) naturtrockener Salzgrus verwendet, um keine Feuchtigkeit in den Einlagerungsbereich einzutragen. Das Salzgrus kann per Schleuderversatz mit Fahrzeugen eingebracht werden.

Die Abdichtung des Einlagerungsbereiches gegen den Infrastrukturbereich erfolgt nach Bollingerfehr et al. (2018) über kombinierte Sorelbeton-Salzgrus-Verschlüsse, die einen Austritt von Gasen und Zustrom von Grundwasser kurzfristig und langfristig verhindern. Innerhalb der beiden Richtstrecken zwischen Infrastrukturbereich und Einlagerungsbereich werden jeweils baugleiche Verschlusssysteme errichtet. Die primären Dichtelemente bestehen aus Sorelbeton. Sorelbeton ist bei zufließenden Lösungen mit hohem Magnesiumchlorid ($MgCl_2$) Anteil dauerhaft. Solche Lösungen werden als Zufluss durch die Schächte bei Endlagerung in steil lagerndem Steinsalz durch Aufsättigung von Grundwasser an angrenzenden Carnallitit-Flözen erwartet. Je Richtstrecke werden zwei dieser Dichtelemente vorgesehen. Der Streckenabschnitt zwischen diesen Dichtelementen wird mit angefeuchtetem Salzgrus verfüllt. Einerseits kompaktiert dieser schneller als trockener Salzgrus, andererseits wird der Einlagerungsbereich durch die Sorelbetonelemente von dieser eingebrachten Feuchte abgedichtet. Nach der vollständigen Kompaktion erreicht Salzgrus eine ähnlich geringe Permeabilität wie das anstehende Steinsalz und ist aufgrund des arteigenen Materials chemisch stabil im einschlusswirksamen Gebirgsbereich.

Für die Pufferung von Lösungen, die über die Schächte dem Endlager zutreten können, wird der Infrastrukturbereich mit einem porösen Material, z. B. Schotter, verfüllt. Das dadurch entstehende Speichervolumen dient als verzögerndes Element für den Zutritt von Lösungen im Gesamtsystem der Barrieren. In (Bollingerfehr et al. 2018) hat sich dieses Speichervolumen

Wirtsgesteinsspezifische Verschluss- und Versatzmaßnahmen in Steinsalz in steiler Lagerung

als sensitiv für die Ergebnisse der Sicherheitsuntersuchungen herausgestellt. Je größer dieses Speichervolumen ausfällt, desto später erreicht einströmendes Grundwasser die Endlagergebinde. Dies verzögert letztendlich auch den Radionuklidaustrag aus dem Einlagerungsbereich.

Ein Schachtverschluss in steil lagerndem Steinsalz besteht im Wesentlichen aus den Funktionselementen

- Dichtelemente
- Widerlager
- Filterschichten

Verschiedene Materialien können dabei mehrfache Funktionen übernehmen. Abbildung 34 zeigt beispielhaft einen Schachtverschluss für ein Endlager in Steinsalz in steiler Lagerung aus (Bertrams et al. 2020a):

Wirtsgesteinsspezifische Verschluss- und Versatzmaßnahmen in Steinsalz in steiler Lagerung

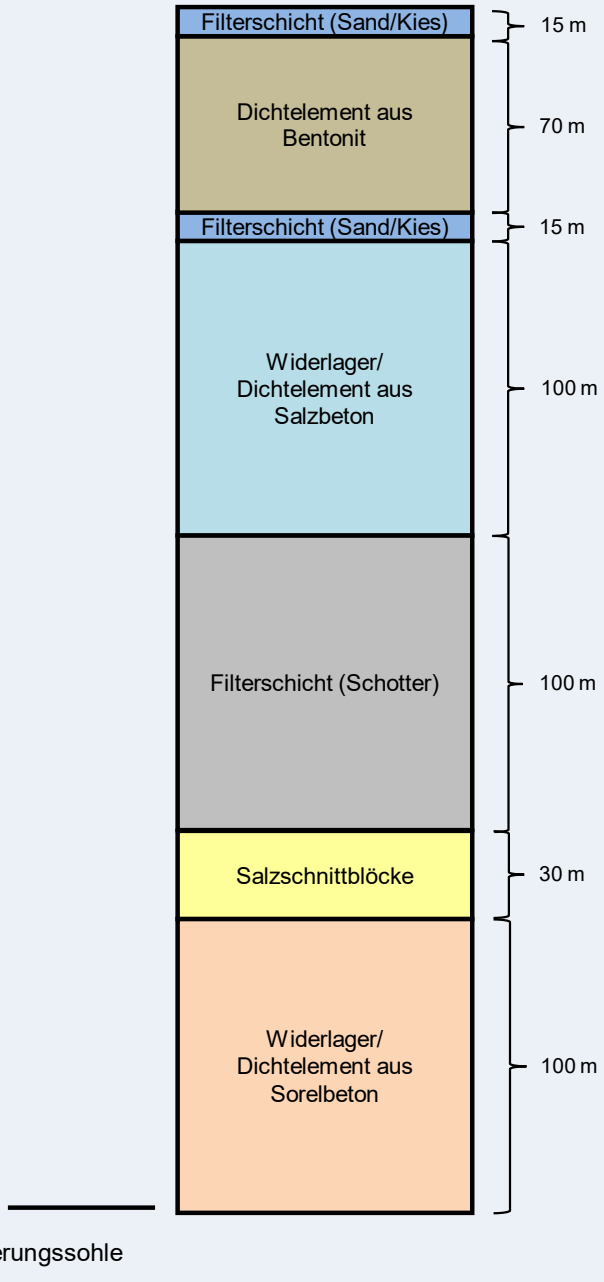


Abbildung 34: Beispiel eines Schachtverschlusses für ein Endlager in Steinsalz in steiler Lagerung (Bertrams et al. 2020a)

4.2.6.7 Mögliche Maßnahmen zur Geringhaltung der Schädigung der wesentlichen Barrieren

Die vorläufige Endlagerauslegung hat nach § 6 Abs. 4 Nr. 6 EndlSiUntV unter anderem *„mögliche Maßnahmen zur Geringhaltung der Schädigung der wesentlichen Barrieren während der Erkundung, der Errichtung, dem Betrieb und der Stilllegung des Endlagers“* zu enthalten. Die Bearbeitung folgt der Definition der wesentlichen Barrieren gemäß Kapitel 4.1. Da der Einschluss innerhalb der wesentlichen Barrieren so erfolgen soll, dass die Radionuklide aus den radioaktiven Abfällen weitestgehend am Ort ihrer ursprünglichen Einlagerung verbleiben (§ 4 Abs. 4 EndlSiAnfV), ist der Schutz der wesentlichen Barriere vor einer Schädigung im Rahmen einer der genannten Betrachtungszeiträume (Erkundung, Errichtung, Betrieb und Stilllegung) eine wichtige Vorgabe. Die Funktion als wesentliche Barrieren für den sicheren Einschluss kann nach § 4 Abs. 3 EndlSiAnfV entweder von einem oder mehreren einschlusswirksamen Gebirgsbereichen bzw. von einem Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion (Endlagersystem Typ 1), oder aber für den Fall des Wirtsgesteins Kristallingestein, sofern kein einschlusswirksamer Gebirgsbereich ausgewiesen werden kann, von technischen und geotechnischen Barrieren (Endlagersystem Typ 2) erfüllt werden.

Die Betrachtungszeiträume, für die die Maßnahmen zur Geringhaltung der Schädigung der wesentlichen Barriere ermittelt werden sollen, werden im Folgenden näher beschrieben. Nach § 9 Abs. 1 EndlSiAnfV ist das Ziel der Erkundung, die Erhebung von sicherheitsrelevanten Daten über die Eigenschaften des Standortes. Nach § 15 Abs. 1 EndlSiAnfV umfasst die Errichtung eines Endlagers *„alle Auffahrungen sowie die weiteren über- und untertägigen baulichen und technischen Maßnahmen, durch die das Endlager so vorbereitet wird, dass anschließend die Einlagerung von radioaktiven Abfällen erfolgen kann*“. Es folgt der Probebetrieb nach § 16 EndlSiAnfV und anschließend der Einlagerungsbetrieb. Während des Betriebs werden weitere Hohlräume im Einlagerungsbereich aufgefahren, Endlagergebinde eingelagert und bereits gefüllte Bereiche des Einlagerungsbereichs verfüllt und gegebenenfalls gegenüber dem Endlagerbergwerk verschlossen. Der Probe- und Einlagerungsbetrieb werden für die Betrachtung möglicher Maßnahmen als Betrieb zusammengefasst. Ist die Einlagerung der Abfallgebinde abgeschlossen, erfolgt die Stilllegung des Endlagers mit dem Ziel, *„dass das Endlagersystem den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle nach § 4 während des Bewertungszeitraumes passiv und wartungsfrei gewährleistet*“ (§ 19 Abs. 1 EndlSiAnfV).

Die im Folgenden erläuterte Methodik gibt eine Übersicht, wie die möglichen Maßnahmen für die genannten Betrachtungszeiträume in einer ortsunabhängigen Sammlung für alle Wirtsgesteinstypen zusammengetragen werden. Ziel ist es dabei – unter Berücksichtigung des eingeschränkten Kenntnisstandes in einer solch frühen Phase des Standortauswahlverfahrens – eine möglichst umfassende Abdeckung der Maßnahmen zu erzielen.

In einem ersten Schritt werden Maßnahmengruppen zur Geringhaltung der Schädigung der wesentlichen Barrieren aus den Anforderungen der EndlSiAnfV abgeleitet. Eine Maßnahmengruppe beschreibt einen wesentlichen Schutzmechanismus, mit dem die Geringhaltung der Schädigung der wesentlichen Barrieren gewährleistet werden soll. Die Maßnahmengruppen enthalten Maßnahmen, die auf Grundlage dieser Schutzziele die Schädigung der wesentlichen Barrieren geringhalten sollen. In Tabelle 15 werden die Maßnahmengruppen entsprechend ihrer Relevanz den in § 6 Abs. 4

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

Nr. 6 EndlSiUntV genannten Betrachtungszeiträumen (Erkundung, Errichtung, Betrieb und Stilllegung) zugeordnet. Dabei wird der Zeitraum der Erkundung in die übertägige Erkundung der Phase II der Standortauswahl nach § 16 StandAG und in die untertägige Erkundung der Phase III nach § 18 StandAG untergliedert, da sich durch die unterschiedlichen Erkundungsmethoden der beiden Phasen unterschiedliche Anforderungen bzw. Maßnahmen zur Geringhaltung der Schädigung der wesentlichen Barrieren ergeben. Für die wesentlichen Barrieren der beiden Endlagersysteme (Typ 1 und 2) werden unterschiedliche Maßnahmengruppen formuliert. Außerdem werden die Maßnahmengruppen „Hohlraumvermeidung, Hohlraumminimierung, Minimierung der Offenhaltungsdauer, gebirgsschonendes Auffahren und gebirgsschonender Betrieb sowie Hohlraumverfüllung und Hohlraumverschluss“ noch einmal zu der übergeordneten Maßnahmengruppe „Geringhaltung der mechanischen Schädigung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs bzw. Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion“ zusammengefasst. Eine umfassende Beschreibung der Maßnahmengruppen folgt in Beispiel 16. Die Bewertung der Relevanz einer Maßnahmengruppe in einer der genannten Betrachtungszeiträume erfolgt in drei Stufen. Ist eine Maßnahmengruppe für den entsprechenden Zeitraum nicht relevant, wird dies durch das Symbol „-“ gekennzeichnet. Sind eine oder mehrere Maßnahmen der Maßnahmengruppen für den Betrachtungszeitraum relevant, wird dies mit einem „x“ dargestellt. Sind die Maßnahmen einer Maßnahmengruppe nur in bestimmten Fällen oder bei bestimmten Konfigurationen des Endlagersystems im Betrachtungszeitraum relevant, wird dies als bedingt relevant bezeichnet und mit einem „(x)“ gekennzeichnet.

Anschließend werden für jede Maßnahmengruppe die Maßnahmen und ihre Relevanz während der Betrachtungszeiträume aufgeführt (siehe Beispiel 16). Externe Prozesse, wie der Transport der leeren Endlagerbehälter zum Endlagerstandort, oder qualitätssichernde Prozesse, wie der Verschluss von Endlagergebinden, werden hier nicht betrachtet.

Für die Erhebung möglicher Maßnahmen zur Geringhaltung der Schädigungen der wesentlichen Barrieren für einen spezifischen Untersuchungsraum bzw. Teiluntersuchungsraum werden in Abhängigkeit von Wirtsgestein und Endlagerkonzept einzelne Maßnahmen aus der Sammlung extrahiert und für den konkreten Fall präzisiert. Die Maßnahmen werden dabei entsprechend ihrer Relevanz nach den Betrachtungszeiträumen gegliedert.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

Geschäftszeichen: SG02303/97-2/2-2022#10 – Objekt-ID: 919256 – Stand: 28.03.2022

Tabelle 15: Zuordnung der Maßnahmengruppen zur Geringhaltung der Schädigung der wesentlichen Barrieren zu den Betrachtungszeiträumen gemäß § 6 Abs.4 Nr. 6 EndlSiUntV

Zuordnung der Maßnahmengruppen zur Geringhaltung der Schädigung der wesentlichen Barrieren zu den Betrachtungszeiträumen gemäß § 6 Abs. 4 Nr. 6 EndlSiUntV				Betrachtungszeiträume gemäß § 6 Abs. 4 Nr. 6 EndlSiUntV				
				Erkundung Phase II	Erkundung Phase III	Errichtung	Betrieb	Stilllegung
Maßnahmengruppen	Endlagersystem Typ 1	Geringhaltung mechanisch induzierter Schädigungen des ewG bzw. Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion	Hohlraumvermeidung	x	x	x	x	-
			Hohlraumminimierung	x	x	x	x	-
			Minimierung Offenhaltungsdauer	x	x	x	x	(x)
			Gebirgsschonendes Auffahren und Betrieb	(x)	x	x	x	(x)
			Hohlraumverfüllung	(x)	(x)	-	x	x
			Hohlraumverschluss	(x)	(x)	-	x	x
		Geringhaltung chemisch induzierter Schädigungen des ewG bzw. Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion		x	x	x	x	x
		Geringhaltung thermisch induzierter Schädigungen des ewG bzw. Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion		-	(x)	(x)	(x)	(x)
	Optimierung aller Prozesse zum Zweck der Langzeitsicherheit gemäß § 12 Abs.1 EndlSiAnfV			-	x	x	x	x
	Schutz der technischen und geotechnischen Barrieren im Fall von Endlagersystem Typ 2 nach § 4 Abs. 3 Nr. 2 EndlSiAnfV (siehe Kapitel 4.1)			-	-	-	x	x

Legende: x relevant - nicht relevant (x) bedingt relevant

Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung

BGE BUNDESGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG

Projekt	PSP-Element	Funktion / Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
SG	0330				EA	TF	0002	00

Beispiel 16: Ortsübergreifende Sammlung - Maßnahmen zur Geringhaltung der Schädigungen der wesentlichen Barrieren

Ortsübergreifende Sammlung – Maßnahmen zur Geringhaltung der Schädigung der wesentlichen Barrieren

In diesem Beispiel werden die Maßnahmengruppen aus Tabelle 15 erläutert und den Gruppen in Form einer ortsübergreifenden Sammlung entsprechend der beschriebenen Methodik einzelnen Maßnahmen zugeordnet.

Hohlraumvermeidung

Die Maßnahmengruppe der Hohlraumvermeidung leitet sich aus den Vorgaben aus *§ 11 Abs. 4 EndlSiAnfV* ab:

„*Die Verletzung des Gebirges im Endlagerbereich, und im Fall des § 4 Absatz 3 Nummer 1 insbesondere des vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, mit Schächten, Auffahrungen oder Bohrungen ist auf das für die sichere Errichtung, den sicheren Betrieb und die sichere Stilllegung des Endlagers unvermeidliche Ausmaß zu beschränken.*“

Die Maßnahmengruppe beinhaltet Maßnahmen, die die Schädigung der wesentlichen Barrieren des Endlagersystems Typ 1 reduzieren, indem das Auffahren von Hohlräumen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich bzw. im Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion auf das minimal notwendige Maß reduziert wird. Hohlräume bilden potenzielle Wegsamkeiten im Bereich des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs bzw. des potenziellen Einlagerungsbereichs. Außerdem kommt es beim Auffahren der Hohlräume zur Ausbildung von Auflockerungszonen im Gebirge, die die Einschlusswirksamkeit des Wirtsgesteins herabsetzen können. Das Auffahren und Offenhalten von Hohlräumen stellt eine Störung des hydraulischen und geomechanischen Gleichgewichts im Gebirge dar. Hohlräume im Bereich des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs bzw. im Einlagerungsbereich sind daher nach Möglichkeit zu vermeiden. Im Folgenden werden die Maßnahmen genannt, erläutert und die Bewertungszeiträume erläutert, in denen die Maßnahme eine Relevanz besitzt.

Um eine ausreichende Kenntnis über die lokale Geologie und das Wirtsgestein im Besonderen im Rahmen der Erkundung zu erlangen, sind zerstörungsfreie Erkundungsmethoden vorzuziehen. Dies gilt im Besonderen, wenn ein einschlusswirksamer Gebirgsbereich als wesentliche Barriere herangezogen wird. Dies ist für den Erkenntnisgewinn jedoch nicht immer ausreichend, weshalb auch zerstörende Erkundungsmethoden verwendet werden müssen. Vor jedem Einsatz einer solchen gebirgszerstörenden Erkundungsmethode ist abzuwägen, ob der Erkenntnisgewinn durch diese Maßnahme die verursachte Schädigung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs rechtfertigt. Eine Relevanz besitzen diese Maßnahmen während der Erkundungen in Phase II und III sowie während der Errichtung und dem Betrieb des Endlagers.

Ortsübergreifende Sammlung – Maßnahmen zur Geringhaltung der Schädigung der wesentlichen Barrieren

Erkundungsbohrungen in das Wirtsgestein sollten nach Möglichkeit nicht bzw. im minimal möglichen Umfang in den potenziellen Bereich des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs abgeteuft werden, um die Schädigung der wesentlichen Barriere und die Schaffung von primären Fließwegen zu vermeiden. Eine Relevanz besitzt diese Maßnahme besonders in der Phase der Standorterkundung, wenn eine übertägige Erkundung stattfindet, ist jedoch auch zu späteren Zeitpunkten bei der Abteufung bzw. Erstellen jeder Bohrung zu beachten.

Eine Erkundung des potenziellen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs kann in der Phase II untertägig ausgehend von einem Tageszugang erfolgen oder mit Hilfe abgelenkter Horizontalbohrungen aus Vertikalbohrungen, die im Bereich potenzieller Lokationen von zukünftigen Tageszugängen abgeteuft werden. Dies reduziert die Anzahl der Hohlräume im einschlusswirksamen Gebirgsbereich und die Anzahl von potenziellen Wegsamkeiten in den einschlusswirksamen Gebirgsbereich bzw. Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion. Hierbei sind die minimal möglichen Kurvenradien der abgelenkten Bohrungen anzustreben, um eine zusätzliche Schädigung der wesentlichen Barriere zu verringern. Werden die Bohrungen nicht im Bereich potenzieller Tageszugänge abgeteuft, kann durch das Abteufen mehrerer horizontaler Bohrungen aus einer vertikalen Bohrung zwar die Anzahl der Bohrungen verringert werden, es ist jedoch zu berücksichtigen, dass es zur Ausbildung vernetzter Wegsamkeiten im Wirtsgestein kommen kann, die anschließend qualitätsgerecht zu verschließen sind. Die Horizontalbohrungen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich bzw. Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion sollten dabei möglichst entlang potenzieller Strecken gestoßen werden, da so eine zusätzliche Schaffung von Hohlräumen vermieden wird. Diese Maßnahme besitzt eine Relevanz während der beiden Erkundungsphasen und während der Errichtung des Endlagers.

Die vorgenannten Maßnahmen erfordern eine möglichst detaillierte Kenntnis der Größe und der Raumlage des zukünftigen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs bzw. des Wirtsgesteinsbereichs mit Barrierefunktion und der möglichen Tageszugänge. Aus diesem Grund sind die Erkenntnisse der vorläufigen Endlagerauslegungen, der rvSU der Phase I und der weiterführenden vorläufigen Sicherheitsuntersuchung der Phase II des Standortauswahlverfahrens in den jeweils folgenden Erkundungsphasen zu berücksichtigen. In Abhängigkeit vom Fortschritt der Erkundung kann so eine Abschätzung über die Lage des Bereichs getroffen werden, in dem nach Möglichkeit keine Schädigung erfolgen soll, während außerhalb dieses Bereiches Informationen über das Wirtsgestein durch Bohrungen gesammelt werden können. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die vorläufige Endlagerauslegung aufgrund des geringen Kenntnisstandes zum Standort die spätere Größe und Lage des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs speziell in Phase I nur eingeschränkt prognostizieren kann. Eine Relevanz besitzt diese Maßnahme während beider Erkundungsphasen und der Errichtung des Endlagers.

Um die Wirksamkeit von Streckenverschlüssen zu erhalten, sollte es nach Möglichkeit vermieden werden, in Bereiche potenzieller Verschlusslokationen Bohrungen von Übertage in den

Ortsübergreifende Sammlung – Maßnahmen zur Geringhaltung der Schädigung der wesentlichen Barrieren

einschlusswirksamen Gebirgsbereich abzuteufen, die nicht dem Verlauf der potenziellen zukünftigen Strecke folgen, sondern diese in einem anderen Winkel durchörtern. Generell sollten auch untertägig erstellte Bohrungen ausgehend von Strecken im Bereich potenzieller Verschlusslokationen vermieden werden. Eine Relevanz besitzt diese Maßnahme während beider Erkundungsphasen.

Um die Anzahl an Bohrungen zu reduzieren, können bohrlochgeophysikalische Methoden, wie die Bohrlochseismik, herangezogen werden, die eine genauere Erkundung des Wirtsgesteins um das Bohrloch ermöglichen und so eventuell weitere Bohrungen nicht notwendig sind. Eine Relevanz besitzt diese Maßnahme während beider Erkundungsphasen sowie bei der Errichtung und dem Betrieb des Endlagers.

Auch bei der Anwendung von Monitoringmaßnahmen ist immer die Schädigung der wesentlichen Barrieren (einschlusswirksamer Gebirgsbereich und geotechnische Barrieren) gegen den Erkenntnisgewinn durch die Monitoringmaßnahme abzuwägen. Hier ist zu klären, ob für ein Monitoring Hohlräume innerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs aufgefahren werden sollten und ob diese Bohrungen auch nach der Stilllegung des Endlagers weitergenutzt werden können. Da nach der Begründung zu § 9 Abs. 3 EndlSiUntV

„[…] spätestens bei der Stilllegung des Endlagers alle tatsächlich vorhandenen Hohlräume sachgerecht verschlossen […]“

sein sollen, ist zu klären, ob ein Verschluss der Bohrungen, die Technik zur Informationsübermittlung und somit potenzielle Wegsamkeiten enthalten, als qualitätsgerechter Hohlraumverschluss betrachtet werden kann.

Zusammenfassend werden die möglichen Maßnahmen der Maßnahmengruppe Hohlraumvermeidung aufgezählt:

- Zerstörungsfreie Erkundungsverfahren
- Abwägung des möglichen Erkenntnisgewinns gebirgszerstörender Erkundungsmaßnahmen gegenüber einer möglichen Beeinträchtigung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs bei Erkundung
- Erkundungsbohrungen möglichst außerhalb des potenziellen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs
- Erkundung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs mit Horizontalbohrungen ausgehend von Schächten oder mit abgelenkten Bohrungen im Bereich potenzieller Schächte

Ortsübergreifende Sammlung – Maßnahmen zur Geringhaltung der Schädigung der wesentlichen Barrieren

- Erstellen von Horizontalbohrungen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich entlang potenzieller Strecken
- Bohrlochgeopyhsikalische Erkundungsmethoden
- Berücksichtigung der Erkenntnisse aus der vorläufigen Endlagerauslegung zur potenziellen Raumlage und Größe des Endlagers bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs im Wirtsgestein
- Erkundungsbohrungen möglichst außerhalb von potenziellen Standorten von Streckenverschlüssen
- Abwägung des möglichen Erkenntnisgewinns von Monitoringmaßnahmen gegenüber einer möglichen Beeinträchtigung der wesentlichen Barrieren

Hohlraumminimierung

Ist eine Vermeidung der Hohlräume nicht möglich, sollte das aufgefahrene Hohlraumvolumen möglichst minimiert werden, um die Schädigung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs als wesentliche Barriere möglichst gering zu halten. Als Begründung für die Maßnahmengruppe wird erneut § 11 Abs. 4 EndlSiAnfV herangezogen. Zusätzlich besagt § 18 Abs. 2 EndlSiAnfV, dass „*der für die Einlagerung von radioaktiven Abfällen genutzte Bereich des Endlagerbergwerkes […] auf das notwendige Maß zu beschränken*“ ist.

Die Maßnahmen dieser Maßnahmengruppe werden im Folgenden genannt, erläutert und die Bewertungszeiträume genannt, in denen die Maßnahme eine Relevanz besitzt.

Die Durchmesser von Erkundungsbohrungen sind auf das Minimum zu begrenzen. Dabei sind die Realisierung eines Bohrlochausbaus, der Durchmesser von eventuell verwendeter Bohrlochmesstechnik und der Mindestdurchmesser von Kernbohrproben für die laborative Bestimmung von Gesteinsparametern zu berücksichtigen. Eine Relevanz besitzt diese Maßnahme während beider Erkundungsphasen und der Errichtung des Endlagers.

Die untertägige Erkundung in Phase III des Standortauswahlverfahrens sollte in gleicher Tiefenlage wie die spätere Endlagerung erfolgen. So können zusätzliche Hohlräume im einschlusswirksamen Gebirgsbereich bzw. im Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion oberhalb oder unterhalb des Einlagerungsbereichs vermieden werden. Zudem ist eine Weiternutzung dieser Hohlräume beispielsweise in Form von Infrastrukturbereichen und Richtstrecken denkbar.

Sowohl bei der Erkundung in Phase II und III als auch bei Auffahrung von Strecken bei der Errichtung und beim Betrieb des Endlagers ist unter Berücksichtigung weiterer Faktoren, wie beispielsweise dem Ausbau der Hohlräume und der Einlagerungstechnik, der Streckenquer-

Ortsübergreifende Sammlung – Maßnahmen zur Geringhaltung der Schädigung der wesentlichen Barrieren

schnitt möglichst gering zu halten, um eine Schädigung der wesentlichen Barriere zu minimieren. Aus diesem Grund sind auch gebirgsschonende und platzsparende Querschnittsformen zu wählen. Für den Opalinuston wählt z. B. die Nagra (2009) daher einen kreisrunden bzw. annähernd kreisrunden Hohlraumquerschnitt.

Nach § 15 Abs. 5 EndlSiAnfV sind mit Beginn des Endlagerbetriebs technische Lösungen für die mögliche Rückholung von Endlagergebinden vorzuhalten. Gleiches gilt nach § 18 Abs. 4 EndlSiAnfV für den kurzfristigen Verschluss des Endlagers. Es ist zu prüfen, in wie weit diese Vorhaltung Übertage erfolgen kann, um das Hohlraumvolumen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich bzw. Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion geringzuhalten. Alternativ sind Einlagerungstechniken zu entwickeln, die auch für die Rückholung der Gebinde verwendet werden können. Grundsätzlich ist bei der Auslegung des Infrastrukturbereichs eine Minimierung des Flächenbedarfs anzustreben. Diese Maßnahmen besitzen während des Betriebs und der Stilllegung des Endlagers Relevanz.

Aus dem Ziel der Langzeitsicherheit des Endlagers ergeben sich eine Reihe von Anforderungen, die Einfluss auf die Teufe des Endlagers haben können und nicht Teil dieser Betrachtung sind. Aus der Forderung zur Geringhaltung der Schädigung der wesentlichen Barriere ergeben sich zusätzliche Empfehlungen an die Teufe des Endlagers. Durch die Wahl einer geringeren Endlagerteufe kann beispielsweise der Flächenbedarf des Endlagers je nach Wirtsgestein und damit die Durchörterung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs deutlich verringert werden (siehe Kapitel 4.2.6.9). Der mit zunehmender Teufe steigende Gebirgsdruck macht z. B. in Tongestein wie Opalinuston zusätzliche Ausbausysteme notwendig, um eine Schädigung des Gebirges zu reduzieren. Dies gilt es während der Endlagerauslegung und damit bei der Errichtung zu berücksichtigen. Mit einer zunehmenden Teufe steigt auch die Komplexität einer Grubenbewetterung an. Durch die Wahl einer geringeren Einlagerungsteufe und durch weitere Maßnahmen zur Optimierung der Wetterführung kann möglicherweise die Anzahl der Tageszugänge reduziert werden. Diese Maßnahmen gilt es während der Endlagerauslegung und damit bei der Errichtung des Endlagers zu berücksichtigen.

Neben der Teufe beeinflusst eine weitere Größe wesentlich den Flächenbedarf und somit das aufzufahrende Hohlraumvolumen. Durch eine Erhöhung der zulässigen Grenztemperatur an der Oberfläche des Endlagergebindes ist eine Verringerung des Flächenbedarfs möglich. Die Höhe der zu wählenden Grenztemperatur ist abhängig vom Wirtsgestein und dem verwendeten Material der geotechnischen Barrieren. Da eine Festlegung der zulässigen Grenztemperatur erst zum Ende des zweiten Schritts der Phase I erfolgen soll, findet eine solche Maßnahme keine Anwendung im Rahmen der rvSU.

Ortsübergreifende Sammlung – Maßnahmen zur Geringhaltung der Schädigung der wesentlichen Barrieren

Zusammenfassend werden die möglichen Maßnahmen der Maßnahmengruppe Hohlraumminimierung aufgezählt:

- Minimierung des Durchmessers von Erkundungsbohrungen
- Erkundung in gleicher Tiefenlage wie Endlagerung
- Minimierung Hohlraumquerschnitt und Verwendung günstiger Querschnittsformen für Strecken
- Rückhol- und Verschlusstechnik möglichst Übertage vorhalten
- Minimierung des Flächenbedarfs der Infrastrukturräume
- Wahl möglichst geringer Endlagerteufen
- Optimierung der Wetterführung

Minimierung Offenhaltungsdauer

Die Maßnahmengruppe der Minimierung der Offenhaltungsdauer leitet sich aus den Vorgaben der EndlSiAnfV ab:

„Die Arbeiten sind so zügig durchzuführen, wie dies unter Gewährleistung der erforderlichen Sicherheit möglich ist." (§ 9 Abs. 4 EndlSiAnfV)

und

„Der für die Einlagerung von radioaktiven Abfällen genutzte Bereich des Endlagerbergwerkes ist auf das notwendige Maß zu beschränken. Dieser Bereich ist jeweils zügig aufzufahren, zu beladen, zu verfüllen und gemäß dem Verschlusskonzept gegen das restliche Endlagerbergwerk zu verschließen." (§ 18 Abs. 2 EndlSiAnfV)

Ähnliche Vorgaben werden von Nagra (2009) formuliert. Ziel muss es sein, aufgefahrene Hohlräume möglichst kurz offenzuhalten. Dabei ist bei Richtstrecken eine Offenhaltung bis zur Stilllegung des Endlagers zwecks einer möglichen Rückholung von Endlagergebinden nach § 1 Abs. 4 StandAG vorzusehen. Durch das Auffahren der Hohlräume im Gestein kommt es zu einer Veränderung des Gebirgsspannungszustands, was zu einer Spannungserhöhung im Gebirge führt. Die daraus evtl. resultierenden Schädigungen und Verformungsprozesse sind zeitabhängige Prozesse. Eine Verkürzung der Offenhaltungsdauer führt daher zu einer Begrenzung des Zeitraums, in dem Schädigungsprozesse erfolgen können. Die Maßnahmen dieser Maßnahmengruppe werden im Folgenden genannt, erläutert und die Bewertungszeiträume genannt, in denen die Maßnahme eine Relevanz besitzt.

Die Auffahrung der Einlagerungsstrecke und die Einlagerung der Endlagergebinde sollten möglichst in parallelen Arbeitsschritten erfolgen, damit die Strecken so kurz wie möglich aber

Ortsübergreifende Sammlung – Maßnahmen zur Geringhaltung der Schädigung der wesentlichen Barrieren

so lang wie nötig offengehalten werden. Dabei sind jedoch die Vorgaben von § 18 Abs. 3 EndlSiAnfV zu berücksichtigen, dass *„Die Handhabung von Endlagergebinden […] von den bergmännischen Arbeiten im Endlagerbergwerk […] zu trennen."* ist. Um diese Trennung zu gewährleisten, sind mehrere Möglichkeiten denkbar. Das in Kapitel 4.2.6.1 dargestellte grundsätzliche Layout des Endlagers für das Endlagersystem Typ 1 sieht hierzu eine Trennung des Endlagers in einen Überwachungsbereich und einen Kontrollbereich nach § 52 StrlSchV vor. Während von der Richtstrecke des Überwachungsbereichs bereits ein neues Endlagerfeld aufgefahren wird, werden von der Richtstrecke des Kontrollbereichs aus Gebinde in ein kurz zuvor fertiggestelltes Endlagerfeld eingelagert. Die Arbeiten erfolgen dabei vom Punkt, der am weitesten von den Tageszugängen entfernt ist, hin zu den Tageszugängen. Alternativ können mobile Strahlenschutzwände zur Trennung der beiden Bereiche verwendet werden. Die Verwendung eines abgeschirmten Behälters würde die Trennung der Strahlenschutzbereiche grundsätzlich erleichtern. Zu diskutieren ist zudem die Nutzung von ferngesteuerter bzw. automatisierter Auffahr- und Einlagerungstechnik, da so der räumliche Abstand und somit auch die zeitliche Differenz zwischen den Prozessen des Hohlraumauffahrens und des Einlagerns der Abfälle verringert werden könnte. Diese Maßnahmen sind während des Endlagerbetriebs relevant.

Durch die zeitgerechte Bereitstellung der Abfallgebinde kann die Offenhaltungsdauer von Einlagerungsstrecke zusätzlich verringert werden. Hierzu sind entsprechende interne (z. B. Transport der Gebinde und Pufferlagerung) und externe (z. B. Anlieferung der Transport- und (Zwischen-)Lagerbehälter (TLB) und der Endlagergebinde zum Standort) Prozesse zu optimieren und Betriebsstörungen zu vermeiden.

Einlagerungsstrecken und Querschläge sind unmittelbar nach der Einlagerung qualitätsgerecht zu verfüllen und zu verschließen. Gleiches gilt für Hohlräume zur untertägigen Erkundung, die im späteren Endlager keine Weiternutzung erfahren und für Bohrungen in den einschlusswirksamen Gebirgsbereich.

Zusammenfassend werden die möglichen Maßnahmen der Maßnahmengruppe Minimierung Offenhaltungsdauer aufgezählt:

- Auffahrung und Einlagerung möglichst parallel
- Unmittelbare qualitätsgerechte Verfüllung und Verschluss von befüllten Einlagerungsstrecken und zugehörigen Querschlägen
- Zeitnah qualitätsgerechtes Verfüllen und Verschließen von Hohlräumen zur untertägigen Erkundung
- Zeitnah qualitätsgerechter Verschluss von Bohrungen

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

Ortsübergreifende Sammlung – Maßnahmen zur Geringhaltung der Schädigung der wesentlichen Barrieren

- Zeitgerechte Bereitstellung der Abfallgebinde zur Einlagerung

Gebirgsschonendes Auffahren und Betrieb

Die Maßnahmengruppe des gebirgsschonenden Auffahrens leitet sich aus § 9 Abs. 2 EndlSi-AnfV ab:

„Alle untertägigen Hohlräume sind gebirgsschonend aufzufahren und nach Gebrauch so zu verschließen, dass die für den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle relevanten Eigenschaften des Gebirges im Endlagerbereich, insbesondere des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs im Fall des § 4 Absatz 3 Nummer 1, erhalten bleiben."

Die Maßnahmen dieser Maßnahmengruppe werden im Folgenden genannt, erläutert und die Bewertungszeiträume genannt, in denen die Maßnahme eine Relevanz besitzt.

Beim Abteufen der Bohrungen soll die Ausbildung ausgeprägter Auflockerungszonen (ALZ) in der wesentlichen Barriere minimiert werden. Zu diesem Zweck sollen gebirgsschonende Bohrverfahren zum Einsatz kommen. Die Maßnahme ist während beider Erkundungsphasen und während der Errichtung des Endlagers relevant. Um die Ausbildung der ALZ im einschlusswirksamen Gebirgsbereich bzw. Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion auf den Konturbereich der Strecke bzw. der Tageszugänge zu beschränken, sollen gebirgsschonende Auffahrmethoden zum Einsatz kommen. Die Methoden sind entsprechend des Wirtsgesteins und der Art des aufgefahrenen Hohlraums zu wählen. So werden im Salz und in Tongesteinen meist Teilschnittmaschinen verwendet, während für das Kristallingestein nach Bertrams et al. (2017) das Konturssprengen zu nennen ist. Eine weitere Möglichkeit bieten im Kristallingestein nach Bertrams et al. (2017) Vollschnittmaschinen (Tunnelbohrer), die jedoch aufgrund weiter Kurvenradien nur für das Auffahren von Rampen und Richtstrecken geeignet sind. Diese Maßnahme ist relevant bei der Errichtung und dem Betrieb des Endlagers. Außerdem kann die Maßnahme im Fall einer untertägigen Erkundung in Form eines Bergwerkes bei der Erkundung in der Phase III eine Relevanz besitzen. Werden im Rahmen der Stilllegung Hohlräume für mögliche Verschlussbauwerke erweitert, kann die Maßnahme auch hier relevant sein.

Durch die Wahl geeigneter Ausbaumethoden und des günstigen Einbauzeitpunkts kann bei Bedarf die Ausbildung von Auflockerungszonen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich bzw. Gebirgsbereich mit Barrierefunktion verringert werden. Im Tongestein sollte ein stützender Ausbau in möglichst kurzen Abständen der Auffahrung folgen, um einer Entfestigung vorzubeugen. Gegebenenfalls sind sogar vorauseilende Vorpfändungsmaßnahmen vorzusehen. Diese Maßnahme hat während der Erkundung der Phase III des Standortauswahlverfahrens, der Errichtung und dem Betrieb des Endlagers eine Relevanz. Durch die Wahl einer geringeren Endlagerteufe wird die Machbarkeit eines starren, tragenden Ausbaus wahrscheinlicher.

Ortsübergreifende Sammlung – Maßnahmen zur Geringhaltung der Schädigung der wesentlichen Barrieren

Dies ist abhängig vom Wirtsgestein und während der Errichtung, dem Betrieb und möglicherweise auch der untertägigen Erkundung in Phase III relevant.

Nach Nagra (2009) sollten Einlagerungsstollen im Opalinuston so angeordnet werden, dass ihre gegenseitige geomechanische Beeinflussung gering ist und sie normal zu möglichen Störungssystemen sowie in Richtung der maximalen horizontalen Hauptspannung ausgerichtet sind. Diese Maßnahme ist während der Endlagerauslegung, der Errichtung und dem Betrieb des Endlagers relevant.

Nach § 16 Abs. 2 Nr. 3 EndlSiAnfV ist beim Probebetrieb des Endlagers die Funktionsfähigkeit aller technischen Einrichtungen, die für eine mögliche Rückholung von eingelagerten Endlagergebinden erforderlich sind, darzustellen. Nach BT-Drs. 19/19291 kann dabei auf eine Erprobung des Rückhohlvorgangs vor Ort verzichtet werden, um eine Schädigung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs zu verhindern.

Um die Ausbildung und Ausweitung der ALZ zu minimieren sollte die Förder- und Transporttechnik so ausgelegt werden, dass eine möglichst geringe Erschütterung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs bzw. Gebirgsbereichs mit Barrierefunktion erfolgt.

Zusammenfassend werden die möglichen Maßnahmen der Maßnahmengruppe gebirgsschonendes Auffahren und Betrieb aufgezählt:

- Gebirgsschonende Bohrverfahren
- Gebirgsschonendes Auffahren von Hohlräumen:
- Wahl von Ausbaumethoden, die die Ausbildung von Auflockerungszonen geringhalten
- Berücksichtigung der Wirkung der Endlagerteufe auf Spannungszustände im Gebirge und Entfestigungsprozesse bei/nach Auffahrung
- Günstige Anordnung und Ausrichtung der Einlagerungsstollen
- Gebirgsschonender Probebetrieb
- Erschütterungsarme Förder- und Transporttechnik
- Vorbeugungs- und Abwehrmaßnahmen für Schadensfälle im Endlager

Hohlraumverfüllung und -verschluss

Die Maßnahmengruppen Hohlraumverfüllung und Hohlraumverschluss werden in diesem Dokument gemeinsam betrachtet, da die Maßnahmen häufig äquivalent sind oder sich gegenseitig bedingen. Zu einem späteren Zeitpunkt im Verfahren wird jedoch eine getrennte Detailbetrachtung empfohlen. Beide Maßnahmengruppen leiten sich aus den Vorgaben der EndlSiAnfV ab:

Ortsübergreifende Sammlung – Maßnahmen zur Geringhaltung der Schädigung der wesentlichen Barrieren

„Die Stilllegung des Endlagers umfasst insbesondere die möglichst vollständige Verfüllung aller untertägigen Hohlräume und ihren Verschluss sowie den Rückbau der die Langzeitsicherheit beeinträchtigenden technischen Einrichtungen." (§ 19 Abs. 2 EndlSiAnfV)

„Der für die Einlagerung von radioaktiven Abfällen genutzte Bereich des Endlagerbergwerkes ist auf das notwendige Maß zu beschränken. Dieser Bereich ist jeweils zügig aufzufahren, zu beladen, zu verfüllen und gemäß dem Verschlusskonzept gegen das restliche Endlagerbergwerk zu verschließen." (§ 18 Abs. 2 EndlSiAnfV)

und

„Alle untertägigen Hohlräume sind gebirgsschonend aufzufahren und nach Gebrauch so zu verschließen, dass die für den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle relevanten Eigenschaften des Gebirges im Endlagerbereich, insbesondere des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs im Fall des § 4 Absatz 3 Nummer 1, erhalten bleiben." (§ 9 Abs. 2 EndlSiAnfV)

Die Maßnahmen dieser Maßnahmengruppe werden im Folgenden genannt, erläutert und die Bewertungszeiträume genannt, in denen die Maßnahme eine Relevanz besitzt. Mögliche Verschluss- und Versatzmaßnahmen werden umfassend in Kapitel 4.2.6.6 betrachtet. Dort erfolgt auch eine beispielhafte wirtsgesteins- und (teil-)untersuchungsraumspezifische Betrachtung der Maßnahmen.

Um eine weitere Schädigung des Gebirges in Folge offener Hohlräume zu vermeiden und die Entstehung von Fließwegen zu reduzieren, sind die erstellten Hohlräume und Bohrungen zeitnah qualitätsgerecht zu verfüllen und zu verschließen. Ziel der geotechnischen Barrieren ist es nach § 9 Abs. 2 EndlSiAnfV mit Hilfe dieser Maßnahmen die für den sicheren Einschluss relevanten Eigenschaft des Gebirges im einschlusswirksamen Gebirgsbereich zu erhalten. Sie sind damit die einzige Möglichkeit erfolgte Schädigungen der wesentlichen Barriere zu reduzieren. Die Verfüllung und der Verschluss erfolgt je nach Funktion und Erstellungszeitpunkt des Hohlraums oder der Bohrung im Zeitraum zwischen der Erkundung und der Stilllegung, spätestens jedoch während der Stilllegung des Endlagers. Die Verfüll- und Verschlussmaßnahmen orientieren sich am Endlagerkonzept und dem Wirtsgestein. Wie bereits zuvor erläutert, sollten die Verfüllung und der Verschluss befüllter Einlagerungsstrecken dabei unmittelbar nach der Einlagerung im jeweiligen Grubengebäudeteil erfolgen. Die Möglichkeit des qualitätsgerechten Verschlusses von Bohrungen ist zu prüfen. Dabei sind auch mögliche Monitoringmaßnahmen zu prüfen. Zum Verfüllen von Hohlräumen bietet sich die Verwendung von stützendem Versatz an.

Insofern eine negative Wirkung des Streckenausbaus auf die Langzeitsicherheit nicht auszuschließen ist, sollte das Rauben (Rückbau) des Ausbaus und das Entfernen technischer Einrichtungen vor dem Verfüllen der Hohlräume geprüft werden. Generell ist das Ausmaß des

Ortsübergreifende Sammlung – Maßnahmen zur Geringhaltung der Schädigung der wesentlichen Barrieren

vorgesehenen Ausbaus unter Berücksichtigung der Anforderungen der Betriebssicherheit auf das erforderliche Maß zu beschränken. Der Rückbau des Streckenausbaus erfolgt im Zuge der Endlagerstillegung bzw. im Rahmen der Verfüllung der Einlagerungsstrecken während des Endlagerbetriebs. Beim Rauben des Ausbaus können die konturnahen Auflockerungszonen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich ausgeweitet werden. Um dieser Schädigung entgegenzuwirken, kann ein Nachschneiden der Kontur erforderlich werden.

Alternativ zum vollständigen Rückbau des Streckenausbaus werden durch die Nagra (2014c) im Ausbausystem Lücken bzw. ein verminderter Ausbau mit Stahlringen für Verschlussbauwerke vorgesehen. Eine solche Berücksichtigung der Verschlussbauwerke im Streckenausbau oder ein schnell entfernbarer Streckenausbau sind auch für den in § 18 Abs. 4 EndlSiAnfV genannten Fall des vorzeitigen Verschlusses des Endlagers günstig.

Zusammenfassend werden die möglichen Maßnahmen der Maßnahmengruppe Hohlraumverfüllung und -verschluss aufgezählt:

- Qualitätsgerechte Verfüllung von Hohlräumen und Bohrungen
- Qualitätsgerechte Verschlussbauwerke
- Stützender, möglichst arteigener Versatz
- Rückbau technischer Einrichtungen
- Nachschneiden der Hohlraumkontur
- Berücksichtigung von Verschlussbauwerken im Streckenausbau

Geringhaltung chemisch induzierter Schäden

Die Maßnahmengruppe der Geringhaltung chemisch induzierter Schäden leitet sich aus § 5 Abs. 2 Nr. 3 EndlSiAnfV ab:

Es ist darzulegen, dass *„die möglichen Änderungen der chemischen Verhältnisse im Einlagerungsbereich, insbesondere auf Grund der in das Endlagerbergwerk eingebrachten Materialien, die Barrierewirkung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht erheblich beeinträchtigen.“*

Die Maßnahmen dieser Maßnahmengruppe werden im Folgenden genannt, erläutert und die Bewertungszeiträume genannt, in denen die Maßnahme eine Relevanz besitzt.

Beim Abteufen bzw. Erstellen von Erkundungsbohrungen in den Phasen der Erkundung und während der Errichtung und des Betriebs ist die verwendete Bohrspülung an das Wirtsgestein anzupassen, um Lösungsprozesse oder andere negative Beeinflussungen des Wirtsgesteins zu vermeiden. Gleiches gilt für andere verwendete Betriebslösungen, wie zur Durchführung

Ortsübergreifende Sammlung – Maßnahmen zur Geringhaltung der Schädigung der wesentlichen Barrieren

von Pumpversuchen. Ist eine Verwendung von Lösungen, die das Gestein des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs als wesentliche Barriere schädigen könnten, erforderlich, sind Vorkehrungen zu treffen, um diesen Schäden vorzubeugen und sie gering zu halten. Die Maßnahme besitzt während aller Betrachtungszeiträume eine Relevanz.

Beim Einsatz von Spritzbeton und anderen zementhaltigen Materialien kann es nach Herold et al. (2020c) im Opalinuston zur Bentonitumwandlung und zur Ausbildung einer pH-Fahne (alkalische Porenlösung) im Gestein kommen. Um diese Prozesse zu begrenzen, wird empfohlen den Ausbau so minimal wie möglich zu gestalten und nach Möglichkeit in den Einlagerungsstrecken komplett auf diesen zu verzichten. Durch den Einsatz von sogenannten low pH-Beton kann nach Herold et al. (2020c) die negative Beeinflussung der Barriereeigenschaften des Gesteins reduziert werden. Auch die Menge an verwendetem Stahl soll nach Nagra (2014c) geringgehalten werden. Durch die anaerobe Korrosion von Eisen wird Gas gebildet (Herold et al. 2020c). Der sich dabei aufbauende Gasdruck ist potenziell geeignet unter anderem die geologische Barriere zu schädigen. Gleiches gilt beim Ausbau der Erkundungsbohrungen. Es ist zu beachten, dass möglichst keine Komponenten in den Bohrungen verbleiben.

Auch bei der Errichtung von geotechnischen Barrieren, wie Verschlussbauwerken, sind die Wechselwirkungen mit dem Wirtsgestein zu berücksichtigen und zu minimieren.

Zusammenfassend werden die möglichen Maßnahmen der Maßnahmengruppe Geringhaltung chemisch induzierter Schäden aufgezählt:

- Bohrspülung an Wirtsgestein anpassen
- Lösungsprozesse durch Betriebslösungen minimieren
- Berücksichtigung von Wechselwirkungen des Ausbaus mit dem Wirtsgestein
- Berücksichtigung und Minimierung von Wechselwirkungen der Materialien zur Errichtung geotechnischer Barrieren mit dem Wirtsgestein

Geringhaltung thermisch induzierter Schäden

Die Maßnahmengruppe der Geringhaltung thermisch induzierter Schäden leitet sich aus § 5 Abs. 2 Nr. 2 EndlSiAnfV ab:

Es ist darzulegen, dass *„durch die Temperaturentwicklung die Barrierewirkung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht erheblich beeinträchtigt wird.“*

Die Schädigung des Wirtsgesteinsbereichs mit Barrierefunktionen ist durch mehrere Wirkmechanismen bei einer übermäßigen Wärmezufuhr möglich. Nach Meleshyn et al. (2016) ist es möglich, dass es durch Inhomogenitäten im Gestein bei der thermisch bedingten Ausdehnung

Ortsübergreifende Sammlung – Maßnahmen zur Geringhaltung der Schädigung der wesentlichen Barrieren

des Gesteins zu ungünstigen Spannungszuständen kommen kann. In porösen und fluidgesättigten Gesteinen ist darüber hinaus nach Alfarra et al. (2020b) auch eine thermisch induzierte Erhöhung des Porenwasserdruckes zu berücksichtigen. Dabei kann es zur Ausbildung ungünstiger Spannungszustände kommen. In beiden Fällen ist die Ausbildung von Sekundärpermeabilitäten möglich.

Bei Tongesteinen sind nach Bräuer et al. (2016) zusätzlich mögliche Mineralumwandlungen zu berücksichtigen. Nach Bracke et al. (2019) kann die thermisch induzierte Umwandlung von Tonmineralen die endlagerrelevanten Eigenschaften der Tongesteine, wie die Sorptionsfähigkeit und die Quellfähigkeit, und so deren Barrierewirksamkeit herabsetzen. Bei der Illitisierung wird beispielsweise mit zunehmender Temperatur Smektit in Illit umgewandelt (Mengel 2006). Die Umwandlung beginnt bei ca. 50 – 70 °C (Goulty et al. 2016; Mengel 2006; Thyberg & Jahren 2011) und wird bei erhöhten Temperaturen beschleunigt.

Die Maßnahmen, die eine solche Schädigung des Wirtsgesteinsbereichs mit Barrierefunktion verhindern bzw. verringern sollen, werden im Folgenden genannt, erläutert und die Bewertungszeiträume genannt, in denen die Maßnahme eine Relevanz besitzt.

So sind während des Auffahrens von Hohlräumen und beim Abteufen von Bohrungen geeignete Methoden zu wählen, die den Wärmeeintrag geringhalten. Darüber hinaus ist bei der Wahl und Anwendung von Materialien zur Erstellung von Verschlussbauwerken, wie Sorelbeton und Asphalt, wirtsgesteinsspezifisch die thermische Wechselwirkung mit dem Gebirge zu berücksichtigen.

Eine wesentliche Wärmequelle stellen ab der Einlagerung in der Betriebsphase die Endlagergebinde dar (siehe Kapitel 4.2.8.2). Um eine Schädigung der wesentlichen Barrie während der Betrachtungszeiträume und darüber hinaus zu minimieren, ist nach § 27 Abs. 4 StandAG eine maximal physikalisch mögliche Grenztemperatur an der Behälteraußenwand für die betrachteten Wirtsgesteine zu definieren. Die Grenztemperatur wird als eine der wesentlichen Eingangsgrößen bei der vorläufigen Endlagerauslegung berücksichtigt (siehe Kapitel 4.2.8.5). Eine wirtsgesteinsspezifische Festlegung dieser Grenztemperaturen erfolgt bis zum Ende von Schritt 2 der Phase I des Standortauswahlverfahrens.

Zusammenfassend werden die möglichen Maßnahmen der Maßnahmengruppe Geringhaltung thermisch induzierter Schäden aufgezählt:

- Festlegung einer (wirtsgesteinsspezifischen) Grenztemperatur nach § 27 Abs. 4 StandAG
- Potenziellen Einfluss der Bewetterung oder Temperatur auf Wassergehalt im Gestein beachten

Ortsübergreifende Sammlung – Maßnahmen zur Geringhaltung der Schädigung der wesentlichen Barrieren

Optimierung aller Prozesse zum Zweck der Langzeitsicherheit

§ 12 EndlSiAnfV sieht eine wiederkehrende Optimierung des Sicherheitskonzepts und der Endlagerauslegung vor. Als eines der Optimierungsziele wird in § 12 Abs. 1 Nr. 1 EndlSiAnfV die Langzeitsicherheit des Endlagers genannt. Die Geringhaltung der Schädigung der wesentlichen Barrieren kann als eine der Grundlagen dieser Langzeitsicherheit betrachtet werden. Die Optimierung nach § 12 EndlSiAnfV im Rahmen der rvSU wird in Kapitel 4.2.9 erläutert. Darüber hinaus sind das Sicherheitskonzept sowie die Endlagerauslegung und damit auch die hier betrachteten Maßnahmen sind in den nächsten Schritten des Standortauswahlverfahrens und auch nach der Standortentscheidung unter anderem auf das Ziel der Geringhaltung der Schädigung der wesentlichen Barrieren zu optimieren. Diese Maßnahmengruppe gilt sowohl für das Endlagersystem Typ 1 als auch Typ 2.

Schutz der technischen und geotechnischen Barrieren im Fall § 4 Abs. 3 Nr. 2 EndlSiAnfV

Kann im Kristallingestein kein geeigneter einschlusswirksamer Gebirgsbereich ausgewiesen werden, kann die Funktion der wesentlichen Barrieren nach § 4 Abs. 3 Nr. 2 EndlSiAnfV von geotechnischen und technischen Barrieren erfüllt werden. In diesem Fall sind die Maßnahmengruppen, die sich ausschließlich auf den einschlusswirksamen Gebirgsbereich bzw. den Wirtsgesteinsbereich mit Barriereeigenschaften beziehen, nicht Teil dieser Betrachtung, da ausschließlich die wesentlichen Barrieren und nicht die weiteren Barrieren betrachtet werden. Eine Berücksichtigung der Maßnahmen für des Endlagersystem Typ 1 ist jedoch auch für den Typ 2 zu empfehlen, da auch hier das Wirtsgestein als weitere Barriere relevant ist. Maßnahmen, die sich auf die geotechnischen Barrieren beziehen, behalten auch in diesem Fall ihre Relevanz. Als zusätzliche Maßnahmengruppe umfasst diese Gruppe Maßnahmen, die ausschließlich für den Fall von technischen und geotechnischen Barrieren als wesentliche Barrieren Anwendung finden. Prozesse wie die Herstellung der Endlagerbehälter, die Erstellung der Endlagergebinde oder der Transport der Komponenten zum Standort des Endlagerbergwerks werden hierbei nicht betrachtet. Auf eine Aufschlüsselung in einzelne Maßnahmengruppen nach mechanischen, thermischen und chemischen Einwirkungen wird verzichtet.

In einem Sicherheitskonzept, das auf geotechnischen und technischen Barrieren als wesentliche Barrieren beruht, besitzt der Endlagerbehälter die wesentliche Funktion des sicheren Einschlusses der Radionuklide. Die Integrität des Endlagerbehälters ist daher entscheidend für die Langzeitsicherheit des Endlagers und die Einlagerung eines beschädigten Endlagerbehälters strikt zu vermeiden. Alle Aktivitäten, die mit und um den Endlagerbehälter erfolgen, müssen daher so ausgelegt werden, dass eine Beschädigung im Rahmen des bestimmungsgemäßen Betriebs ausgeschlossen ist. Zusätzlich erfolgt eine Sichtprüfung des Behälters am Einlagerungsort.

Ortsübergreifende Sammlung – Maßnahmen zur Geringhaltung der Schädigung der wesentlichen Barrieren

Das Personal muss in den Abläufen geschult werden und für den hohen Stellenwert der Schadensvermeidung für den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle sensibilisiert werden. Eine Schadensmeldung muss so einfach erfolgen können wie möglich und darf keine negativen Konsequenzen für den Meldungsgeber verursachen. Außerdem muss die verwendete Technik ausreichend unter realistischen Bedingungen erprobt sein. Dabei sind auch alle möglichen Fehlfunktionen zu berücksichtigen und auszuwerten.

Treten trotz der vorgesehenen Abläufe Schäden auf, ist eine sicherheitstechnische Bewertung durchzuführen, ob eine Neuverpackung erforderlich ist. Genauso sind Ereignisse zu definieren, wie der Absturz eines Behälters, das Anecken eines Behälters oder ein Brand, bei denen vorsorglich unabhängig vom Schadensmuster eine Neuverpackung initiiert wird.

Ein umfassender und kontinuierlicher Qualitätssicherungsprozess ermöglicht die Bewertung der Abläufe um Schäden vorzubeugen und Schadensereignisse in Prozessanpassung zu berücksichtigen.

Für die Handhabung der Behälter und Gebinde Übertage ist es unter Umständen möglich, sich an den Abläufen in den Zwischenlagern der radioaktiven Abfälle zu orientieren, die eine große Erfahrung bei der Handhabung von TLB für hoch radioaktive Abfälle besitzt.

Sollte die Einlagerung des Endlagergebindes in einem Bohrloch erfolgen, sollte dieses einen ausreichenden Durchmesser aufweisen, um ein Verkanten oder Verkratzen während der Einlagerung auszuschließen.

Als Beispiel für einen der im Ablauf zu optimierenden Prozesse, um eine Beschädigung des Endlagerbehälters zu verhindern, wird hier die Art und Weise aufgeführt, mit der der Versatz um das Endlagergebinde eingebracht wird.

Zusammenfassend werden die möglichen Maßnahmen der Maßnahmengruppe Schutz der technischen und geotechnischen Barrieren im Fall § 4 Abs. 3 Nr. 2 EndlSiAnfV aufgezählt:

- Geeignete Auslegung der Betriebsabläufe
- Sichtprüfung der Endlagerbehälter vor der Einlagerung
- Qualitätssicherungsmaßnahmen
- Schadensschwelle definieren
- Schulung und Sensibilisierung des Personals
- Erprobung der Technik
- Ausreichender Bohrlochdurchmesser
- Berücksichtigung bestehender Handhabungskonzepte

Ortsübergreifende Sammlung – Maßnahmen zur Geringhaltung der Schädigung der wesentlichen Barrieren

- Auswahl von Versatzformen um den Endlagerbehälter, die eine Beschädigung ausschließen

4.2.6.8 Flächenbedarfsbestimmung Infrastrukturbereich

Bei der vorläufigen Auslegung des Endlagers im Rahmen der rvSU müssen zur Abschätzung der maximalen Größe eines Endlagerbergwerks nach § 6 Abs. 4 Nr. 2 EndlSiUntV auch die untertägigen Infrastrukturbereiche des HAA-Endlagers berücksichtigt werden. Dies geschieht durch eine begründete und nachvollziehbare Abschätzung des für die Infrastrukturbereiche benötigten Flächenbedarfs. Analog zur Auslegung des Einlagerungsbereichs wird hierbei in Abhängigkeit des Wirtsgesteins und der Teufe des Endlagers gearbeitet.

Im ersten Schritt der Bearbeitung wird analog der Vorgehensweise der *Kommission Lagerung hochradioaktiver Abfallstoffe* im Gutachten zum Flächenbedarf für ein Endlager für wärmeentwickelnde, hoch radioaktive Abfälle (DBE TEC 2016) der Flächenbedarf in Anlehnung an die Arbeiten zur vorläufigen Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben (VSG) (Bollingerfehr et al. 2012) abgeschätzt. Für das Wirtsgestein Steinsalz wird der Flächenbedarf der VSG übernommen. Für die Wirtsgesteine Tongestein und Kristallin dient der Flächenbedarf im Salz als Grundlage. Allerdings stehen Gebirgspfeilerbreite und Streckenbreite jeweils in einem anderen Verhältnis, wodurch sich die Flächenbedarfe erhöhen. Die im Rahmen der Methodenentwicklung berechneten Flächenbedarfe basieren zunächst auf diesen Abschätzungen.

Im zweiten Schritt der Bearbeitung werden unter Heranziehung recherchierbarer Literatur und BGE-interner Erfahrungen bei der Planung von Infrastrukturbereichen in laufenden Endlagerprojekten die für die Errichtung, den Betrieb und die Stilllegung eines HAA-Endlagers notwendigen Infrastruktureinrichtungen aufgezählt und in ihrer Funktion beschrieben. Bereits dabei wird aufgrund wirtsgesteinsspezifischen Aspekten differenziert (z. B. Infrastruktureinrichtungen zur Herstellung von Ausbauten im Tongestein). Auch Anforderungen, die sich entsprechend § 13 EndlSiAnfV bzgl. der Rückholbarkeit der Abfälle ergeben, werden berücksichtigt. Demnach sind die für eine Rückholung erforderlichen technischen Einrichtungen bereits während des Betriebs des Endlagers vorzuhalten.

Vor dem Hintergrund der Minimierung der Auffahrung von Hohlräumen unter Tage wird anschließend erörtert, welche Infrastruktureinrichtungen unter Tage angelegt werden müssen und welche möglicherweise auch über Tage angelegt werden können.

Auf Basis der Liste und Beschreibung der erforderlichen Infrastruktureinrichtungen wird ein Layout mit räumlicher Anordnung der verschiedenen Infrastruktureinrichtungen und eine begründete Flächenbedarfsschätzung durchgeführt. Dabei werden (teufenabhängige) gebirgsmechanische Daten der verschiedenen Wirtsgesteine berücksichtigt. Insbesondere beim Tongestein sind in größeren Teufen größere Streckenabstände und damit ein größerer Flächenbedarf erforderlich. Damit wird

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

der Flächenbedarf für den gesamten Infrastrukturbereich ermittelt. Analog zur Flächenbedarfsbestimmung des Einlagerungsbereichs des HAA-Endlagers werden bei Flächenbedarfsabschätzungen für den Infrastrukturbereich Teufen betrachtet, mit denen die bisher betrachteten Teufenbereiche von 350 m bis 900 m für Tongestein (Opalinuston) und von 450 m bis 1 200 m für Steinsalz (in steiler Lagerung) abgedeckt sind. Die Festlegung eines zu betrachtenden Teufenbereichs für kristallines Wirtsgestein steht hingegen noch aus.

4.2.6.9 Festlegung und Begründung wesentlicher Maße des Endlagerbergwerks

Auf Basis der Beschreibung des Aufbaus des Endlagerbergwerks und der darin ablaufenden Prozesse in den voran gegangenen Unterkapiteln können zur Bestimmung des Endlagerflächenbedarfs die dafür notwendigen Maße entweder festgelegt werden oder es kann beschrieben werden, wie sie abzuleiten sind. Die für die Flächenberechnung notwendigen Maßangaben sind in Abbildung 35 gekennzeichnet und werden in Beispiel 17 beispielhaft für Opalinuston und Steinsalz in steiler Lagerung zusammengefasst dargestellt.

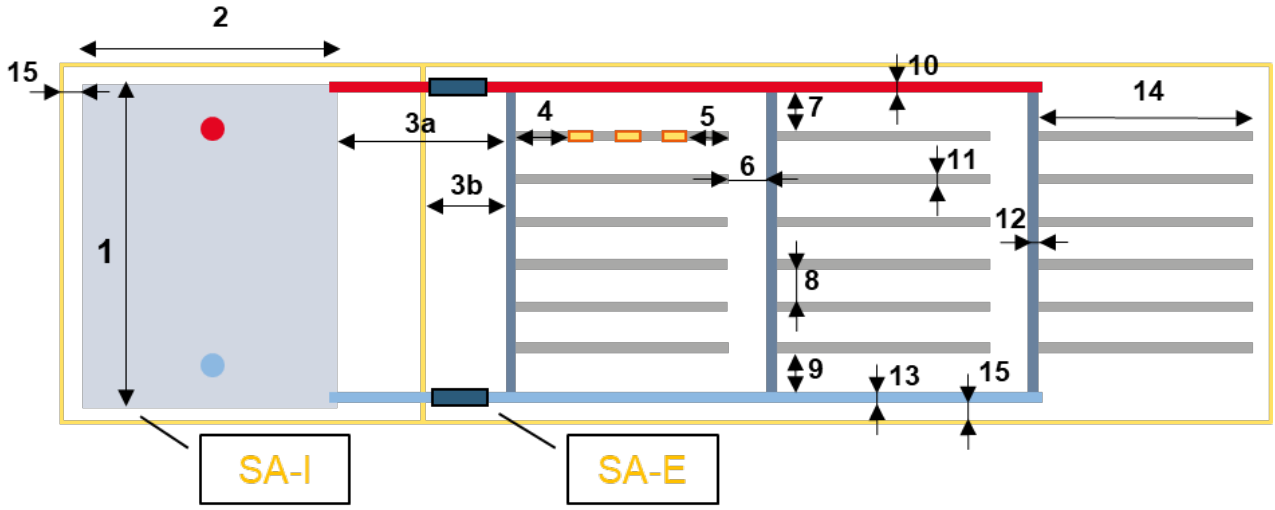


Abbildung 35: Allgemeiner Aufbau des Endlagerbergwerks mit Bemaßung für die Ermittlung des Flächenbedarfs

Für den gewählten Aufbau des Endlagerbergwerks stellt dessen geplante Breite (1) eine wichtige Größe dar. Von ihr leiten sich z. B. die Länge der Querschläge, die Anzahl der Einlagerungsstrecken je Einlagerungsfeld oder die notwendige Länge des Endlagers ab. Die Wahl der Endlagerbreite hängt zunächst vom Platzangebot im Wirtsgestein ab. Ist dieses ausreichend groß, wird eine Breite von 1 000 m veranschlagt. Dadurch bleiben die Fahrwege und Fahrzeiten für Transportfahrzeuge (z. B. Muldenkipper), die im Auffahrungsbetrieb zwischen den Einlagerungsstrecken und der Richtstrecke pendeln, in einer überschaubaren Größenordnung. Fällt das Platzangebot im Wirtsgestein, wie z. B. in einem schmalen, länglichen Salzstock, kleiner aus, orientieren sich die Lage des Endlagers und die geplante Endlagerbreite an der verfügbaren Breite. Bei dem hier gewählten Aufbau erhöht eine Verkleinerung der Endlagerbreite grundsätzlich den Flächenbedarf, da sich der Anteil der Richtstrecken und ihrer Gebirgspfeiler am Endlagerflächenbedarf vergrößert. Bei etwa 100 m geplanter Endlagerbreite besitzen allein die Richtstrecken schon einen Flächenanteil von ca. 20 %

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

am gesamten Endlagerflächenbedarf. Dieser hohe Flächenanteil der großen, langlebigen Richtstrecken ist nachteilig für die Erfüllung der Anforderung nach § 6 Abs. 4 EndlSiUntV (Geringhaltung der Schädigung der wesentlichen Barrieren), da das Wirtsgestein in diesem Fall zu einem großen Anteil durch die Richtstrecken gestört wird, die jedoch nur Mittel zum Zweck der Einlagerung darstellen. Eine Endlagerbreite kleiner als 100 m sollte deswegen vermieden werden.

Die Länge des Infrastrukturbereichs (2) ergibt sich aus seinem Flächenbedarf und der geplanten Breite des Endlagers. Sein Flächenbedarf wird im Rahmen der rvSU geschätzt (Kapitel 4.2.6.8).

Der Abstand zwischen Infrastrukturbereich und erstem Querschlag des Einlagerungsbereichs (3a) wird auf 300 m festgesetzt. Dieser Abstand ist voraussichtlich ausreichend für die Durchführung von Verschlussmaßnahmen zwischen Einlagerungsbereich und Infrastrukturbereich. Darüber hinaus werden die thermischen Auswirkungen der eingelagerten Abfälle auf den Infrastrukturbereich und die Schächte minimiert.

Für den Fall, dass nur der Einlagerungsbereich im Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion und der Infrastrukturbereich außerhalb liegt, wird ein Sicherheitsabstand definiert (3b). Entlang der Zugangsstrecken sollte der Abstand zwischen Einlagerungsbereich und Außengrenze des Wirtsgesteins mindestens 150 m betragen, um ausreichende Verschlussmaßnahmen innerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs vorsehen zu können.

Der Abstand vom Querschlag zum zuletzt eingelagerten Endlagergebinde (4) einer Einlagerungsstrecke beträgt mindestens 15 m, um den kurvenförmigen Eingang in die Einlagerungsstrecke frei zu halten. Der Abstand von der Ortsbrust der Einlagerungsstrecke zum ersten eingelagerten Endlagergebinde (5) beträgt 5 m um eine allseitige Umhüllung mit Buffer zu garantieren und ausreichend Platz für den Einlagerungsvorgang zu gewährleisten. Der Abstand zwischen Behältern wird auf Basis der thermischen Berechnungen abgeleitet.

Die Pfeilerbreiten (6 bis 9) ergeben sich aus der gebirgsmechanischen Bemessung derselben (Kapitel 4.2.7) Streckenbreiten (10 bis 13) ergeben sich aus der Planung des Einlagerungsbereichs (Kapitel 4.2.6.4.2). Die Streckenlänge der Einlagerungsstrecken wird mit 400 m angenommen. Diese Festlegung orientiert sich an § 49 ABVO, nach der in blind endenden Vortrieben mit einer Länge von mehr als 400 m Schutzbunker vorzusehen sind. Dies sollte in den Einlagerungsstrecken vermieden werden, da sie im Querschnitt so klein wie möglich bemessen werden, um das Wirtsgestein als wesentliche Barriere möglichst wenig zu schädigen. Die Festlegung von 400 m stellt deswegen ein vorläufiges Maximum dar. Dieses wird gewählt, da sich lange Einlagerungsstrecken mindernd auf den Flächenbedarf des Endlagerbergwerks und das notwendige Auffahrungsvolumen auswirken.

Es wird ein allseitiger vorläufiger Sicherheitsabstand (15) vorsorglich angenommen, damit um das Endlager herum ein einschlusswirksamer Gebirgsbereich ausgewiesen werden kann.

Beispiel 17 listet die Maßannahmen am Beispiel von Opalinuston und Steinsalz in steiler Lagerung auf, die für die rvSU verwendet werden.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

Beispiel 17: Festlegung/Beschreibung der Maße am Beispiel Opalinuston und Steinsalz (steile Lagerung)

Festlegung/Beschreibung der Maße am Beispiel Opalinuston und Steinsalz (steile Lagerung)

Tabelle 16: Maße am Beispiel Opalinuston und Steinsalz (in steiler Lagerung)

Abk. / Nr.	Erläuterung	Bsp. Opalinuston	Bsp. Steinsalz in steiler Lagerung
SA-E	Begrenzungslinie des Sicherheitsabstands (s. Nr. 3b und 15) um den Einlagerungsbereich		
SA-I	Begrenzungslinie des Sicherheitsabstands (s. Nr. 15) um den Infrastrukturbereich		
1	Geplante Breite des Endlagerbergwerks	1 000 m	500 m
2	Länge des Infrastrukturbereichs	Ergibt sich aus der Teufe, dem Flächenbedarf des Infrastrukturbereichs und der geplanten Breite des Endlagerbergwerks (1)	
3a	Abstand zwischen Infrastrukturbereich und erstem Querschlag des Einlagerungsbereichs	300 m	
3b	Vorläufiger Sicherheitsabstand des Einlagerungsbereichs in Richtung der Richtstrecken, falls die ewG-Grenzen die Richtstrecken schneiden	150 m	
4	Abstand vom Querschlag zum nächsten eingelagerten Endlagergebinde	15 m	
5	Abstand von der Ortsbrust der Einlagerungsstrecke zum nächsten eingelagerten Endlagergebinde	5 m	
6	Abstand von der Ortsbrust der Einlagerungsstrecke zum nächsten Querschlag	Annahme: entspricht Nr. 7	
7	Pfeilerbreite zwischen der Richtstrecke für Einlagerungsbetrieb und der nächsten Einlagerungsstrecke	Ergibt sich aus der teufenabhängigen Bemessung der Pfeilerbreite	

Festlegung/Beschreibung der Maße am Beispiel Opalinuston und Steinsalz (steile Lagerung)

8	Pfeilerbreite zwischen Einlagerungsstrecken	Ergibt sich aus der teufenabhängigen Bemessung der Pfeilerbreite
9	Pfeilerbreite zwischen der Richtstrecke für Auffahrungsbetrieb und der nächsten Einlagerungsstrecke	Ergibt sich aus der teufenabhängigen Bemessung der Pfeilerbreite
10	Streckenbreite der Richtstrecke für Einlagerungsbetrieb	7,6 m
11	Streckenbreite der Einlagerungsstrecke	5,1 m
12	Streckenbreite des Querschlags	7,6 m
13	Streckenbreite der Richtstrecke für Auffahrungsbetrieb	6,8 m
14	Streckenlänge der Einlagerungsstrecke	400 m
15	Allseitiger vorläufiger Sicherheitsabstand	50 m

4.2.7 Gebirgsmechanische Auslegung

Der Flächenbedarf eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle hängt von verschiedenen Faktoren ab. Für hochradioaktive Abfälle in Deutschland steht das Abfallmengengerüst bis auf geringe Ungewissheiten fest (siehe Kapitel 2). Im Rahmen der rvSU sind die wesentlichen variablen Einflussfaktoren auf den Flächenbedarf

- die Teufe des Einlagerungsbereichs
- der Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion, der den einschlusswirksamen Gebirgsbereich aufnimmt, mit seinen mechanischen und thermischen Eigenschaften
- Festlegungen, die bei der Endlagerauslegung und -planung getroffen werden (z. B. die Auslegungstemperatur, die Maßnahmen zur Einhaltung dieser, Planung insbesondere des Einlagerungsbereichs)

Die Endlagerteufe ist maßgeblich für den Flächenbedarf, da diese zusammen mit dem geothermischen Gradienten die Gebirgstemperatur im Einlagerungsbereich bedingt. Bei der Endlagerauslegung ist eine maximale Auslegungstemperatur zu berücksichtigen, um die Barrieren nicht thermisch zu schädigen. Die hochradioaktiven Abfälle müssen jedoch mit ihrer Gesamtwärmeleistung im Ein-

lagerungsbereich vollständig untergebracht werden. Die Gebirgstemperatur in-situ und die thermischen Eigenschaften des Gebirges entscheiden maßgeblich darüber, auf welcher Fläche die hochradioaktiven Abfälle verteilt werden müssen, damit die Auslegungstemperatur eingehalten wird. Zusätzlich zu den thermischen Gegebenheiten kann sich die Endlagerteufe auf die Endlagerfläche auswirken, da in größeren Teufen mit größeren Gebirgsdrücken zu rechnen ist, was beispielsweise durch entsprechend breitere Pfeiler, d. h. Abstände zwischen den einzelnen Strecken, berücksichtigt werden muss. Aus diesen Zusammenhängen ist absehbar, dass sich der Flächenbedarf eines Endlagers aufgrund der thermischen Gegebenheiten sowie aufgrund von bergbaulichen Aspekten bei erhöhter Endlagerteufe vergrößert. Die thermischen Randbedingungen werden im folgenden Kapitel erläutert.

Vor der Durchführung der thermischen Auslegung ist jedoch festzulegen, welche Abstände von Einlagerungsstrecken zueinander minimal zulässig sind. Begrenzend ist vor allem die mechanische Tragfähigkeit der Gebirgspfeiler, die zwischen den parallelen Einlagerungsstrecken tragend verbleiben. Für die rvSU ist nur eine orientierende Berechnung auf Basis von Annahmen möglich. Dabei wird die Tragfähigkeit eines einzelnen Pfeilers untersucht. Die Größe der Pfeiler im Vergleich zur Größe der benachbarten Strecken ist dafür die entscheidende Größe, da die Größe des Hohlraums wesentlich die mechanische Last auf die benachbarten Pfeiler definiert und andererseits die Pfeilergröße die Tragfähigkeit des Pfeilers bestimmt.

In diesem Kapitel werden überwiegend beispielhaft methodische Vorgehensweisen erläutert, wie im Rahmen der rvSU die minimalen Abstände von parallelen Strecken zueinander („minimale Pfeilerbreiten“) ermittelt werden können. Die jeweilige Methode der Ermittlung der aus gebirgsmechanischer Sicht minimal zulässigen Pfeilergrößen ist jedoch stark abhängig vom Wirtsgestein. Grundsätzlich werden die mechanischen Einwirkungen auf einen Pfeiler der Tragfähigkeit des Pfeilers gegenübergestellt. Übersteigt die Tragfähigkeit des Pfeilers die mechanischen Einwirkungen, kann der Pfeiler als standfest gelten. In diesem Zusammenhang wird auch die Notwendigkeit von (tragenden) Ausbaumaßnahmen erörtert. Die Gebirgsparameter werden für das jeweilige Wirtsgestein in den rvSU als homogen über den jeweiligen Untersuchungsraum hinweg angenommen, solange keine genaueren Daten vorliegen. Aufgrund der Begrenztheit der vorgestellten analytischen Ansätze und Analogieschlüsse wird angestrebt, die gebirgsmechanische Auslegung für spätere Phasen der Standortsuche um numerische Modellierungen zu erweitern. Diese können über die Betrachtung einzelner Pfeiler hinausgehen und die gebirgsmechanische Situation großräumiger untersuchen.

Über die Pfeilerauslegung hinaus ist zu prüfen, ob sich aus der weiteren Endlagerplanung weitere Anforderungen an die Größe der Pfeiler ergeben; insbesondere aus

- der Endlager- und Bergbautechnik (z. B. durch notwendige Kurvenradien)
- den Verfüll- und Versatzmaßnahmen
- den Maßnahmen zur Rückholung

Auf Basis der Annahmen in der vorläufigen Endlagerauslegung ist z. B. eine Pfeilerbreite kleiner als 10,2 m aus technischen Gründen nicht umsetzbar, da in diesem Fall zu wenig Platz an den Streckeneingängen zur Verfügung steht, um die notwendigen Kurvenradien der Transporttechnik vorzusehen.

Innerhalb der natürlich vorgegebenen Grenzen, die die Endlagerteufe und die thermischen und mechanischen Randbedingungen vorgeben, bestehen darüber hinaus Freiheitsgrade der Planung, die sich ebenfalls auf den Endlagerflächenbedarf auswirken können. Dazu gehören z. B. die geplante Breite und Länge des Einlagerungsbereichs oder die Länge der Einlagerungsstrecken.

Beispiel 18 und Beispiel 19 veranschaulichen die gebirgsmechanischen Annahmen und Berechnungen, wie sie im Rahmen der rvSU verwendet werden sollen.

Beispiel 18: Wirtsgesteinsspezifische Ermittlung der Pfeilerbreiten im Tongestein Opalinuston

Wirtsgesteinsspezifische Ermittlung der Pfeilerbreiten im Tongestein Opalinuston

Für die Ermittlung der Pfeilerbreiten im Opalinuston stehen einerseits orientierende numerischen Berechnungen aus (Herold et al. 2020c) für die generische Endlagerung im Tongestein zur Verfügung. Diese gehen teilweise über die Betrachtung einzelner Pfeiler hinaus und berücksichtigen darüber hinaus tragende Ausbausysteme. Für die rvSU können auf dieser Basis erste Annahmen insbesondere für den notwendigen Ausbau im Opalinuston generiert werden. Des Weiteren können überschlägige Formeln aus der Literatur für eine Abschätzung der minimalen Pfeilerbreiten verwendet werden. Aus beiden Ansätzen wird anschließend eine Arbeitshypothese für Ausbausysteme und Pfeilbreiten für die Endlagerung im Opalinuston generiert.

„Bei der Planung eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle in Tongesteinsformationen ist ein Ausbau der Grubenräume entsprechend der jeweiligen Teufenlage generell vorzusehen. Gründe dafür sind die Tongesteinseigenschaften wie zum Beispiel die geringe bis mäßige Festigkeit, das Kriechverhalten oder die Eigenschaftsänderungen in Abhängigkeit vom Wassergehalt. Bergbehördliche Vorgaben zur Wahrung der betrieblichen Sicherheit, radiologische Aspekte des Strahlenschutzes und weitere regulatorische Vorgaben führen zu hohen Anforderungen an die Ausbausysteme. Weiterhin kann mit Blick auf eine mögliche Rückholung der Endlagerbehälter ein langlebiger Streckenausbau von Vorteil sein, was wiederum zusätzliche Anforderungen an den Funktionszeitraum stellt. Auch für die Langzeitsicherheit des Endlagers hat der Ausbau Konsequenzen. Zum einen wird die Neigung zur Bildung von Wegsamkeiten beeinflusst, welche präjudizierend für potenziell eindringende Fluide wirken können. Zum anderen sind chemische Wechselwirkungen der Ausbaumaterialien mit dem Tongestein möglich“ (Herold et al. 2020c).

Zur Bearbeitung dieses Spannungsfeldes von Ausbausystemen, verwendeten Baustoffen, Bau- und Betriebssicherheit sowie der Langzeitsicherheit wurden durch (Herold et al. 2020c) verschiedene Untersuchungen angestellt. Betrachtungen zum Streckenausbau wurden unterteilt in kurzlebige Strecken, insbesondere Einlagerungsstrecken, und langlebige Strecken

Wirtsgesteinsspezifische Ermittlung der Pfeilerbreiten im Tongestein Opalinuston

(z. B. Richtstrecken), deren Lebensdauer mit bis zu 50 Jahren angesetzt wird. Der Einfluss verschiedener Parameter auf die Gestaltung der jeweiligen Ausbausysteme wurde untersucht, darunter:

- Anzahl benachbarter Einlagerungsstrecken
- Querschnittsform der Strecken
- Lateraler Trennflächenabstand („Bankung“) im Wirtsgestein
- Teufe
- Festigkeit des Gebirges

Auch wenn in (Herold et al. 2020c) nicht explizit Opalinuston in den Vordergrund gerückt wurde, liegen die zentralen Modellparameter in Größenordnungen, wie sie auch für Opalinuston in Deutschland auftreten können (s. Anhang 1). Die zweidimensionalen, numerischen Berechnungen ergaben folgendes:

Das Ausbausystem für Einlagerungsstrecken wurde, ähnlich der Vorgehensweise der NAGRA (Nagra 2014d), auf einen Ausbau aus Spritzbeton mit der Dicke von 30 cm festgelegt. Nach (Herold et al. 2020c) zeigt sich, dass Standfestigkeit für die Pfeiler und geringe Streckenverformungen bei neun benachbarten Einlagerungsstrecken mit folgenden Parametern erreicht werden können:

- Verhältnis von Pfeilerbreite zu Streckenbreite: 4
- Gesteinsfestigkeit: 20 MPa
- Lateraler Trennflächenabstand: 90 cm
- Teufe: 1 000 m

Damit liegt ein Indiz dafür vor, dass die technische Machbarkeit für den Bau und Betrieb von kurzlebigen Einlagerungsstrecken im Tongestein bis in eine Teufe von 1 000 m bei geringfügigem Ausbau gegeben ist. Voraussetzung ist, dass die gebirgsmechanischen Eigenschaften (Bankung, weitere Trennflächen, Festigkeit usw.) nicht allzu nachteilig ausfallen. Ein Ausbau aus Spritzbeton mit einer Dicke von 30 cm kann jedoch als planmäßig tragend bewertet werden. In (Herold et al. 2020c) wurden grundsätzlich 30 cm Spritzbeton für den Ausbau von Einlagerungsstrecken vorausgesetzt. Es wurde nicht geprüft, inwieweit die Ausbaumächtigkeit oder das Verhältnis von Pfeilerbreite zu Streckenbreite in geringeren Teufen reduziert werden kann.

Im Fall der langlebigen Grubenbaue mit Offenstandszeiten von bis zu 50 Jahren wurden in (Herold et al. 2020c) drei verschiedene Ausbausysteme einer einzelnen Strecke untersucht: einschalig, zweischalig und zweischalig mit nachgiebigen Elementen. Für alle drei Varianten

Wirtsgesteinsspezifische Ermittlung der Pfeilerbreiten im Tongestein Opalinuston

konnten Teufenbereiche identifiziert werden, in denen das jeweilige Ausbausystem an seine Grenzen kommt. Die ansonsten festgelegten Randbedingungen waren die folgenden:

- Gesteinsfestigkeit: 20 MPa
- Bankung: 90 cm
- Spannungsverhältnis vertikal/horizontal: 1
- Frühzeitiger Einbau des Ausbaus 50 cm hinter der Ortsbrust

Die Ergebnisse zeigen, dass ein einschaliges, starres Ausbausystem mit einer Betondicke des Ausbaus von 55 cm unterhalb von 750 m Teufe an seine Grenzen kommt, da eine Betondruckfestigkeit nötig wird, die das bautechnisch machbare überschreitet (>> 100 MPa). Gleiches gilt für ein zweischaliges, starres Ausbausystem mit einer Gesamtbetondicke von 55 cm im Teufenbereich zwischen 750 m und 1 000 m. Erst das zweischalige Ausbausystem mit einer Gesamtdicke von 75 cm und Nachgiebigkeitselementen lässt eine ausreichende Standfestigkeit der Strecke über 50 Jahre bis in eine Teufe von 1 000 m erwarten. Die Nachgiebigkeitselemente erlauben dem Ausbau, dem aufkriechenden Gebirge in geringem Umfang nachzugeben Die Annahme nachteiliger Gebirgseigenschaften (z. B. größere Kriechrate, Anisotropie, geringere Trennflächenabstände, geringere Gesteinsfestigkeit) kann jedoch auch solche Ausbausysteme in noch höherer Stärke notwendig machen oder an ihre Grenzen bringen. Andererseits führt der frühe Einbau des Ausbausystems schon 50 cm hinter der Ortsbrust zu einer hohen Belastung des Ausbaus, da nur eine verhältnismäßig geringfügige Vorentlastung stattfinden kann. Dadurch wird der Ausbauaufwand für die langlebigen Strecken voraussichtlich insgesamt überschätzt. Auf die Ergebnisse der rvSU hat dies jedoch keinen Einfluss, da der Ausbau der Richtstrecken nicht in die thermischen Auslegungsrechnungen eingeht und auch weiterhin die Berechnung des Endlagerflächenbedarfs nicht nennenswert beeinflusst.

Die Untersuchungen zeigen insgesamt, dass die Standfestigkeit der langlebigen Grubenbaue im Tongestein die größere Herausforderung darstellt im Vergleich zur Standfestigkeit der Einlagerungsstrecken. Ein tragender Ausbau ist bei diesen Strecken grundsätzlich anzunehmen. In kleineren Teufen wurde der Ausbau langlebiger Strecken nicht untersucht.

Für die Durchführung der rvSU sind die Erkenntnisse aus (Herold et al. 2020c) nutzbar, da sie erste Planungsannahmen für den Ausbau der Richt- und Einlagerungsstrecken ermöglichen. Dementsprechend geht die Endlagerauslegung der rvSU für Opalinuston von folgendem Ausbau aus, um die jeweiligen Strecken für ihre Betriebszeit zu stabilisieren (Tabelle 17):

Wirtsgesteinsspezifische Ermittlung der Pfeilerbreiten im Tongestein Opalinuston

Tabelle 17: Planungsannahmen für Streckenquerschnitte und Ausbau im Opalinuston im Rahmen der rvSU

Teufenbereich	Kurzlebige Strecken	Langlebige Strecken
< 750 m	Halbbogenförmiger Streckenquerschnitt, 30 cm Spritzbeton- Ausbau	Runder Streckenquerschnitt, 55 cm starrer Betonausbau
750 m bis 1 000 m	Halbbogenförmiger Streckenquerschnitt, 30 cm Spritzbeton- Ausbau	Runder Streckenquerschnitt, 75 cm Betonausbau mit Nachgiebigkeitselementen

Zur Bestimmung der zulässigen Verhältnisse von Streckenbreite zu Pfeilerbreite für verschiedene Teufen gibt es international weder Berechnungsvorschriften für Tongestein im Allgemeinen, noch für Opalinuston im Besonderen. Darüber hinaus sind die Parameterunsicherheiten im Opalinuston sehr groß. Die gebirgsmechanischen Eigenschaften können sich von Standort zu Standort deutlich unterscheiden. Für die Endlagerauslegung der rvSU war es jedoch notwendig, trotz aller Unsicherheiten geometrische Festlegungen zu treffen, um eine vorläufige Endlagerfläche berechnen zu können. Dazu wurde folgender Ansatz gewählt:

Die geometrische Anordnung der Strecken im Einlagerungsbereich hat Ähnlichkeit mit dem Kammer-Pfeilerbau des klassischen Bergbaus. Hier wird die Lagerstätte zunächst durch Strecken erschlossen. Anschließend werden die Pfeiler im Rückbau abgebaut, um das Wertmineral (z. B. Steinkohle) zu gewinnen. Aus dauerhaften Stabilitätsgründen und zur Abtrennung von Bewetterungsströmen sowie als hydraulische Barriere verbleiben einige Pfeiler. Für solche Pfeiler hat (Wagner 2019) Berechnungsvorschriften und Parameter zusammengefasst, um ihre Tragfähigkeit zu berechnen.

Mit einer Abschätzung der Pfeilertragfähigkeit mit Hilfe der „Power law strength formula“ nach (Wagner 2019) und der mechanischen Einwirkung auf den Pfeiler nach (Herold et al. 2018a) lässt sich eine minimal zulässige Pfeilerbreite errechnen. Der Berechnung zu Grunde liegen eine einaxiale Druckfestigkeit des Tongesteins von 20 MPa (Hypothese auf Basis der Werte für Opalinuston in Herold et al., 2018) und eine durchschnittliche Dichte des überlagernden Gesteins von 2,5 t/m³ sowie weitere Werte (nach (Wagner 2019)) für die Anwendung der Power law strengh formula aus dem Steinkohlebergbau. Bei der Wahl des „Reduktionsfaktors“ wird berücksichtigt, dass die Auffahrung möglichst gebirgsschonend ausfällt und der Hohlraum frühzeitig nach Auffahrung durch einen Ausbau gestützt wird.

Wenn die mechanische Einwirkung auf den Pfeiler geringer ausfällt als seine Tragfähigkeit, kann der Pfeiler als grundsätzlich standfest gelten. In Abbildung 36 werden die minimal zulässigen Verhältnisse von Pfeilerbreite zu Streckenbreite von Einlagerungsstrecken in Abhängig-

Wirtsgesteinsspezifische Ermittlung der Pfeilerbreiten im Tongestein Opalinuston

keit von der Teufe dargestellt, für die diese Aussage zutrifft. Die zugehörigen Berechnungsformeln und eingesetzten Parameter werden im Folgenden vorgestellt. Die eingesetzten Parameter des Endlagerbergwerks basieren auf den Festlegungen aus Kapitel 4.2.6.9. Die sich ergebenden Verhältnisse von Pfeilerbreite zu Streckenbreite werden ebenfalls zur Abschätzung der Pfeilerbreiten zwischen Richtstrecken und Einlagerungsstrecken angesetzt. Dabei ist die Breite der jeweiligen Richtstrecke die bemessungsrelevante Breite für die Ermittlung der Breite des Pfeilers zwischen Richtstrecke und benachbarter Einlagerungsstrecke. Da die Richtstrecken nur einseitig von ungestörtem Gestein umgeben sind, überschätzt dieser Ansatz eher die notwendige Pfeilerbreite.

Die so ermittelten minimalen Pfeilerbreiten werden zusammen mit den numerisch berechneten Ausbausystemen (s. o.) den thermischen Analysen zugrunde gelegt.

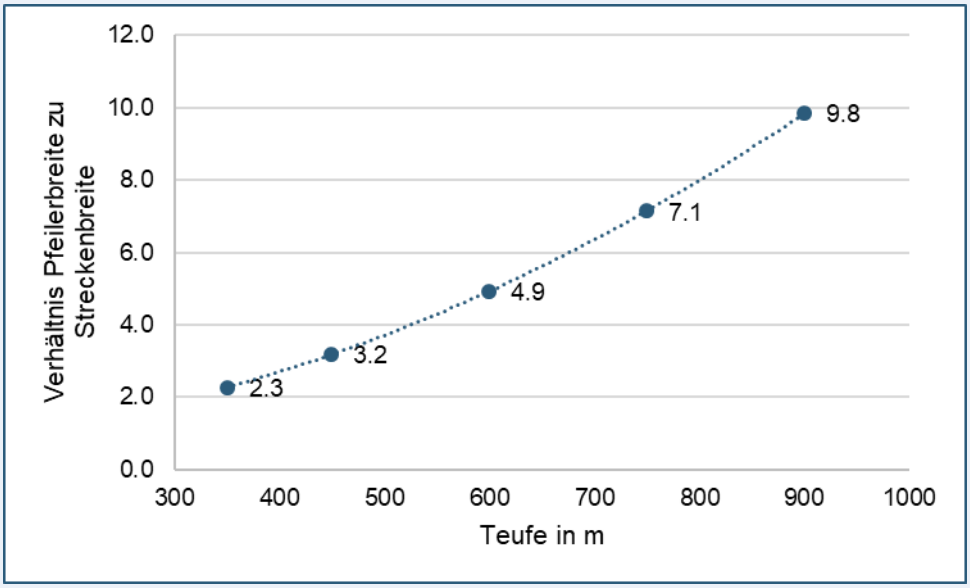


Abbildung 36: Errechnete Mindestverhältnisse von Pfeilerbreiten zu Streckenbreiten im Zusammenhang mit der Teufe

Die verwendete Formel für die Pfeilerfestigkeit nach Wagner (2019) ist:

$$\sigma_{cp} = k_{cp} \times \sigma_c \times \frac{{w_{eff}}^{\alpha}}{h^{\beta}} \quad (1)$$

wobei

σ_{cp}: Pfeilerfestigkeit in MPa

k_{cp}: Reduktionsfaktor, Annahme: 0,43

σ_c: einaxiale Druckfestigkeit in MPa, Annahme: 20 MPa

w_{eff}: effektive Pfeilerbreite für Pfeiler mit Länge >> Breite in m

Wirtsgesteinsspezifische Ermittlung der Pfeilerbreiten im Tongestein Opalinuston

h: Pfeilerhöhe (entspricht Streckenhöhe einer Einlagerungsstrecke von ca. 5,1 m)

α: Faktor zur Anpassung des Einflusses der Pfeilerbreite auf die Pfeilerfestigkeit, Annahme: 0,46

β: Faktor zur Anpassung des Einflusses der Pfeilerhöhe auf die Pfeilerfestigkeit, Annahme: 0,66

Die effektive Pfeilerbreite errechnet sich nach (Wagner 2019) wie folgt:

$$w_{eff} = \frac{4 \times A_P}{C_P} \quad (2)$$

wobei

A_P: Grundfläche des Pfeilers in m²

C_P: Umfang des Pfeilers in m

Damit wurde der erste Schritt der Pfeilerbemessung, nämlich die Pfeilerfestigkeit, errechnet. Es folgt die Berechnung der Beanspruchung des Pfeilers nach (Herold et al. 2018a):

$$\sigma_{Pfeiler} = (1 + \frac{b}{w}) \times P_0 \quad (3)$$

wobei

b: Streckenbreite von ca. 5,1 m

w: Pfeilerbreite in m

P_0: lithostatischer Druck in MPa

Durch Gleichsetzung der Formeln 1 und 3 kann das Verhältnis aus Streckenbreite zu Pfeilerbreite errechnet werden, ab der gilt, dass die Pfeilertragfähigkeit der mechanischen Beanspruchung widerstehen kann. Aufgrund des rein orientierenden Charakters der Berechnung und den großen Parameterunsicherheiten werden keine Teilsicherheitsbeiwerte bei der Pfeilerbemessung berücksichtigt.

Für die Ermittlung geeigneter Teufenbereiche für die Endlagerung im Opalinuston sind die gebirgsmechanischen Verhältnisse eine wesentliche Randbedingung. Im Anhang 1 wird eine Abschätzung der günstigen Teufenbereiche für ein Endlager im Opalinuston vorgenommen.

Beispiel 19: Wirtsgesteinsspezifische Ermittlung der Pfeilerbreiten im Steinsalz (steile Lagerung)

Wirtsgesteinsspezifische Ermittlung der Pfeilerbreiten im Steinsalz (steile Lagerung)

Für Steinsalz wird angesetzt, dass die minimale Pfeilerbreite das doppelte der Streckenbreite der benachbarten Strecke betragen muss. Diese Festlegung wurde bereits für eine steil lagernde Salzformation in (Bollingerfehr et al. 2012) im Rahmen der Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG) angewendet. Mit dieser Pfeilerbreite wird nach (Mehlhorn 1997) ausgeschlossen, dass sich zwei benachbarte Strecken im Steinsalz gegenseitig mechanisch beeinflussen. Der Kern der Pfeiler bleibt damit unbelastet von benachbarten Hohlräumen und standfest.

Nach Hou & Lux (2000) ist die zeitabhängige Standzeit eines Pfeilers im Salz abhängig von seinem Schlankheitsmaß und einem Formfaktor. Das Schlankheitsmaß entspricht dem Quotienten der Pfeilerbreite zur Pfeilerhöhe, während der Formfaktor aus der Pfeilerhöhe, seinem Umfang und seiner Grundfläche berechnet wird. Mit der nach Beispiel 8 angenommenen Streckenhöhe einer Einlagerungsstrecke und damit einer Pfeilerhöhe zwischen Einlagerungsstrecken von 3,7 m sowie den in Beispiel 18 festgelegten Maßen ergibt sich für die Pfeiler zwischen Einlagerungsstrecken ein Schlankheitsmaß von ca. 2,8 und ein Formfaktor von ca. 0,2. Für solche Werte liegt nach Hou & Lux (2000) die langfristige Tragfähigkeit eines Salzpfeilers bei etwa 62 MPa. Nach Formel 3 in Beispiel 18 lässt sich auch die Beanspruchung der Salzpfeiler überschlägig ermitteln. Unter Einsetzung der entsprechenden geometrischen Werte ergibt sich hier ein Wert von 55,2 MPa als Pfeilerbelastung in einer großen Teufe von 1 500 m. Da dieser Wert unterhalb der Pfeilertragfähigkeit liegt, wird die oben genannte Formel der doppelten Streckenbreite als Pfeilerbreite in den rvSU für alle Teufen verwendet. Kleinere Pfeilerbreiten sind aufgrund der notwendigen Kurvenradien am Eingang der Einlagerungsstrecken nicht zulässig. Für die den Richtstrecken benachbarten Pfeiler ist die gebirgsmechanische Situation günstiger als für die Pfeiler der Einlagerungsstrecken, da das Schlankheitsmaß noch deutlich größer ausfällt und die Richtstrecken nur einseitig von weiteren Hohlräumen umgeben sind.

4.2.8 Vorläufige Prognose der Endlagerflächenbedarfe

4.2.8.1 Einführung

Im Rahmen der rvSU des Standortauswahlverfahrens ist eine vorläufige Prognose der benötigten Flächenbedarfe für Endlager in den verschiedenen Wirtsgesteinen notwendig. In den folgenden Abschnitten wird die Vorgehensweise zur rechnerischen Abschätzung der Endlagerflächenbedarfe in Abhängigkeit der Entwurfsgrößen Temperatur im Einlagerungsbereich vor Einlagerungsbeginn T_{EB} sowie der Zielteufe des Endlagers vorgestellt. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf der numerischen Analyse des Temperaturfelds im Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle. Hierzu erfolgt die Simulation der thermischen Verhältnisse im Nahfeld der Endlagergebinde mit dem Ziel der Ermittlung der möglichen Behälterbeladung unter Einhaltung der gemäß § 27 Abs. 4 StandAG aus Vorsorgegründen angenommenen maximalen Temperatur von 100 °C an der Behälteraußenwand. Basierend auf der Prognose möglicher Behälterbeladungen erfolgt unter Berücksichtigung der Abfallmengen die Ermittlung der Anzahl der benötigten Endlagergebinde. Anschließend erfolgt die vorläufige Prognose des kumulierten Endlagerflächenbedarfs.

Das Schema zur Prognose der Endlagerflächen ist in Abbildung 37 dargestellt. Die thermischen Simulationsberechnungen werden ausschließlich für Abfallarten mit signifikanter Wärmeleistung (bestrahlte Brennelemente aus Leistungsreaktoren sowie verglaste Abfälle aus der Wiederaufarbeitung) durchgeführt und erfolgen mittels Finite Elemente Methode (FEM). Das verwendete Simulationsmodell inkl. der zugehörigen Eingangsgrößen wird in den folgenden Abschnitten beschrieben. Die darauf aufbauende Methodik zur Ermittlung der kumulierten Endlagerflächen und die resultierenden Ergebnisse werden in Kapitel 4.2.8.7 beschrieben. In die Berechnung der kumulierten Endlagerflächen gehen die Flächenbedarfe für Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmefreisetzung (bestrahlte Kernbrennstoffe aus Forschungsreaktoren) und weitere Flächenbedarfe (im Wesentlichen für Infrastrukturflächen und Flächen aufgrund von Sicherheitsabständen) mit ein.

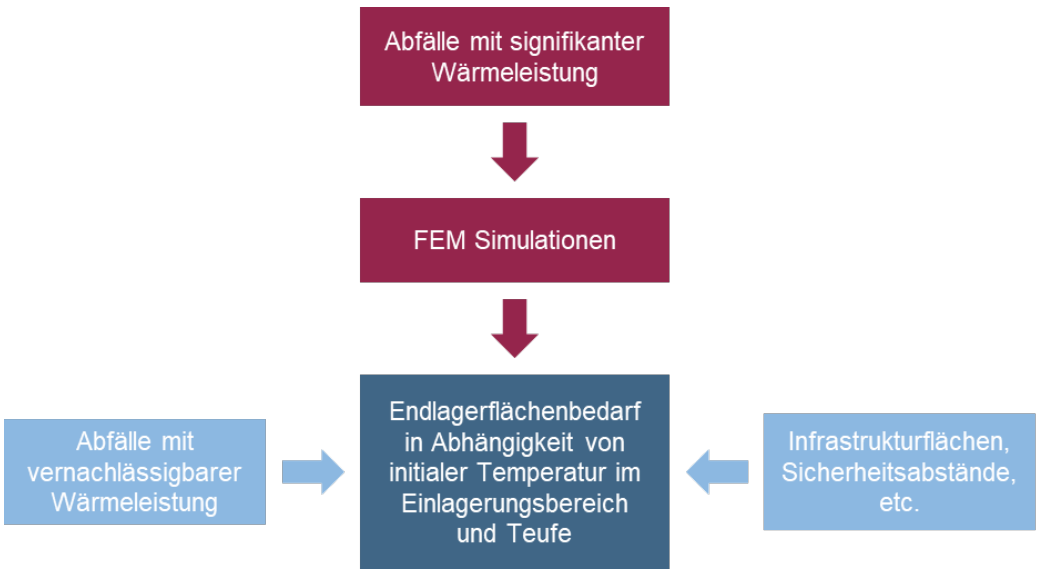


Abbildung 37: Eingangsgrößen des kumulierten Endlagerflächenbedarfs

Der sichere Einschluss der hochradioaktiven Abfälle im Endlager wird wie in Kapitel 4.1 dargestellt, durch ein sogenanntes Multibarrierensystem gewährleistet. Hierbei handelt es sich um ein gestaffeltes System von Einzelkomponenten, dessen Systemverhalten in numerischen Berechnungsmodellen häufig nur unter der Berücksichtigung einer Vielzahl gekoppelter physikalischer Prozesse möglichst vollständig abgebildet werden kann. In diesem Zusammenhang können daher in Abhängigkeit des betrachteten Wirtsgesteins neben thermischen, auch hydraulische, mechanische und chemische Prozesse relevant sein. Auf Grund des hohen Abstraktionsgrad der zugrundeliegenden, vorläufigen Auslegung des Endlagers und mangelnder Detailkenntnisse der Geologie in der aktuellen Phase der rvSU, werden in den numerischen Berechnungen zunächst vereinfachend nur thermische Prozesse berücksichtigt.

4.2.8.2 Abfallinventar und Wärmeleistung

In diesem Abschnitt wird auf die für die Flächenbedarfsberechnungen relevanten Kenngrößen des Abfallinventars näher eingegangen. Übergeordnete Angaben zum Abfallinventar finden sich in Kapitel 2.

Eine besonders wichtige Größe für die Endlagerflächenberechnung stellt hierbei das Abfallmengengerüst dar. In Tabelle 18 sind die Mengen von Brennelementen bzw. Kokillen für Abfallarten mit signifikanter Wärmefreisetzungsrate aufgeführt. Wie in Kapitel 2 dargestellt, müssen in Deutschland keine CSD-B & CSD-C Kokillen endgelagert werden.

Tabelle 18: Mengengerüst für Abfälle mit signifikanter Wärmeleistung

Abfallart	Anzahl Brennelemente / Kokillen
DWR-UOX	12 450
DWR-MOX	1 530
SWR-UOX	14 350
SWR-MOX	1 250
WWER	5 050
CSD-V (inkl. UK-HAW + WAK)	3 864

Neben den signifikant wärmeentwickelnden Abfallarten müssen außerdem noch Abfälle aus dem Betrieb deutscher Forschungsreaktoren endgelagert werden. Für diese Abfallarten werden in der aktuellen Phase die entsprechenden TLB als Endlagerbehälter angenommen (siehe Kapitel 4.2.6.2). Die zugehörige Anzahl an TLB ist in Tabelle 19 dargestellt. Da diese Inventararten eine vernachlässigbare Wärmeleistung aufweisen, werden sie in den numerischen Simulationsberechnungen nicht berücksichtigt. Die Mengen der jeweiligen TLB fließen stattdessen direkt in die kumulierten Endlagerflächenberechnungen mit ein.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

Tabelle 19: Mengengerüst für Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeleistung

Abfallart	Anzahl TLB
CASTOR® THTR/AVR	457
CASTOR® KNK	4
CASTOR® MTR2	18
CASTOR® MTR3	48

Anhand des Abfallmengengerüstes ist ersichtlich, dass der prognostizierte Flächenbedarf des Endlagers entscheidend von den Abfällen mit signifikanter Wärmeleistung abhängt. Die dabei zu berücksichtigende Wärmeleistung hängt neben der Inventarart auch maßgeblich von der Abklingzeit der Abfälle zum Zeitpunkt der Einlagerung ab. In Übereinstimmung mit dem geplanten Prozess zum Standortauswahlverfahren wird für die numerischen Berechnungen in den rvSU das Jahr 2050 als Zeitpunkt der ersten Einlagerung ausgewählt. Auf Basis dieser Annahmen werden für die Simulationsberechnungen repräsentative Abklingdauern festgelegt, welche Tabelle 20 entnommen werden können. Die repräsentativen Abklingdauern werden dabei hinreichend konservativ abgeschätzt. Für die angesetzten Abklingdauern wird insbesondere ein für jede Abfallart abdeckender Gesamtwärmeeintrag gewährleistet.

Tabelle 20: Repräsentative Abklingdauer für die wärmeentwickelnden Abfallarten

Abfallart	Repräsentative Abklingdauer in a
DWR-UOX	32
DWR-MOX	32
SWR-UOX	32
SWR-MOX	37
WWER	57
CSD-V (inkl. UK-HAW + WAK)	52

Im Rahmen der VSG wurden Abbrandrechnungen durchgeführt, aus denen die zeitliche Wärmefreisetzung der einzelnen Abfallarten folgt. Die zeitlichen Verläufe der für die Simulationen zugrunde gelegten Wärmeleistung pro Brennelement bzw. Kokille sind in Abbildung 38 dargestellt.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

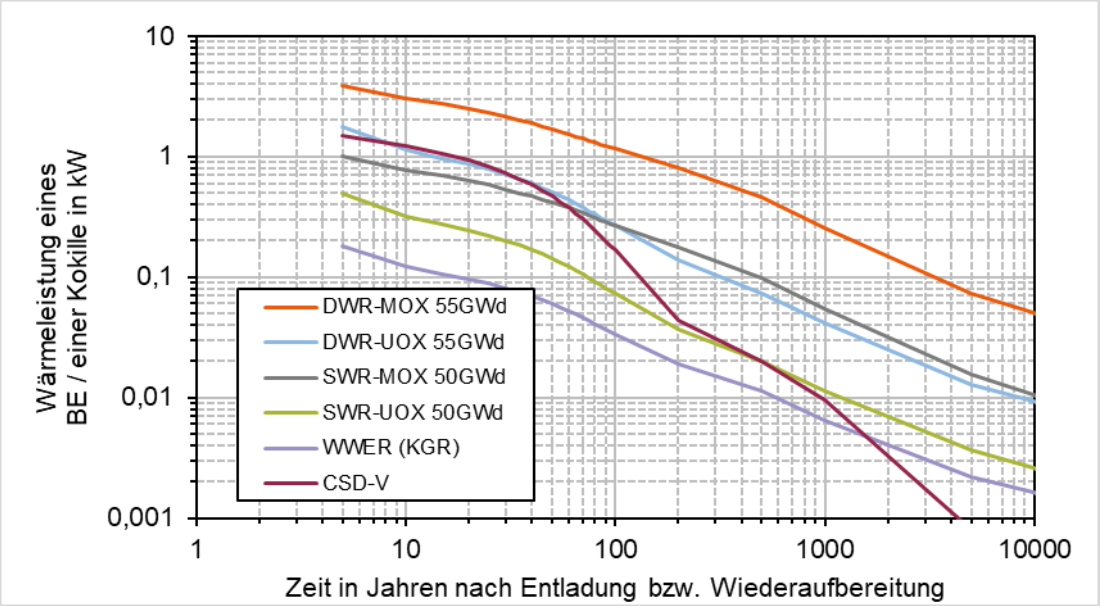


Abbildung 38: Zugrunde gelegte Wärmeleistung von bestrahlten Brennelementen und Kokillen in Abhängigkeit der Abklingzeit auf Basis der Daten der VSG (Peiffer et al. 2012)

4.2.8.3 Behälter- und Einlagerungskonzept

Im Kapitel 4.2.6.2 wird das zugrunde gelegte vorläufige Behälter- und Einlagerungskonzept für das Endlagersystem Typ 1 beschrieben. In diesem Abschnitt wird daher primär auf diejenigen Aspekte näher eingegangen, die für die numerischen Berechnungen relevant sind.

Da für die Endlagerung von HAA in Deutschland keine Behälterkonzepte existieren, die anhand aktueller Anforderungen entwickelt wurden, ist die dezidierte Modellierung einer potenziell komplexen Behälterstruktur in den Simulationsrechnungen nicht möglich. Aus diesem Grund werden in den Simulationsrechnungen vereinfachte repräsentative Ersatzmodelle der Behälter verwendet. Dazu werden die Behälter mittels zweier Teilvolumina abgebildet. Beispielhaft ist diese Vorgehensweise in Abbildung 39 skizziert.

Das innere Teilvolumen bildet den Behälterkorb ab und umfasst die radioaktiven Abfälle, die Strukturkomponenten, welche die Abfälle im Behälter aufnehmen und mögliche Verfüllmaterialien. Das äußere Teilvolumen repräsentiert die idealisierte Behälterhülle, mittels derer der Innen- sowie Außenbehälter, die zugehörigen Verschlussdeckel sowie ggf. Moderatorstäbe und Tragzapfen fiktiv zusammengefasst werden. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass das vereinfachte Behältermodell als symmetrisch angenommen wird, weshalb für den Behälterdeckel und die Wandstärke am Boden ein identischer, gemittelter Wert angesetzt wird. Die zugehörigen Geometriekennwerte für den Innen- und Außendurchmesser DI bzw. DA, die Innen- und Außenlänge LI und LA, sowie das Maß LD sind in Tabelle 21 dargestellt.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

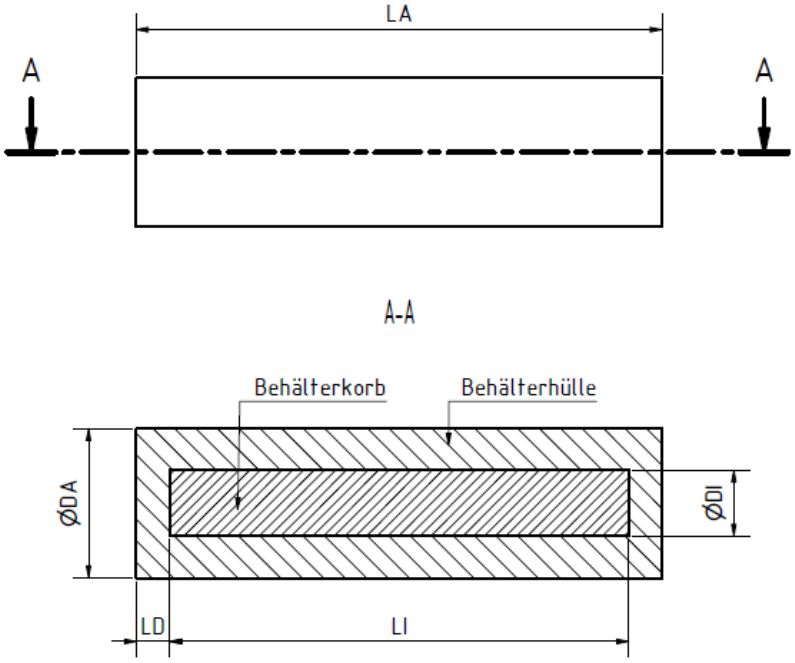


Abbildung 39: Skizze des vereinfachten Behältermodells für die Simulationen

Tabelle 21: Geometriedaten für vereinfachtes Behältermodell in den Simulationen

Behältertyp	DI in mm	DA in mm	LD in mm	LI in mm	LA in mm
Behälter für Brennstäbe aus Leistungsreaktoren im Tongestein	378	1 100	489,5	4 538	5 517
Behälter für Brennstäbe aus Leistungsreaktoren im Steinsalz	690	1 560	489,5	4 538	5 517
Behälter für CSD-V Kokillen im Tongestein und Steinsalz	473	1 560	532,5	1 335	2 400

Die angewandten thermophysikalischen Materialparameter für die beiden Teilvolumina des vereinfachten Behältermodells sind in Tabelle 22 aufgeführt. Hierbei ist zu beachten, dass diese Parameter Schätzwerte darstellen, da derzeit keine konkreten Behälterkonzepte vorliegen und sie somit zwangsläufig mit einer Ungewissheit verbunden sind. Insbesondere werden die Materialeigenschaften vieler potenziell vorhandener Behälter- und Ausbaustrukturteile im Rahmen der geometrischen Vereinfachung in lediglich zwei Teilvolumina homogenisiert.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

Tabelle 22: Thermophysikalische Materialparameter für das vereinfachte Behältermodell

Komponente	Material	Dichte ρ in kg/m³	Spez. Wärmekapazität c_p in J/kg/K	Wärmeleitfähigkeit λ in W/m/K
Behälterhülle	Feinkornbaustahl, Bohrungen mit Polythylenstäben	7 500	500	35
Behälterkorb	Sphäroguss, Materialien der Brennelemente / Kokillen	7 500	250	17,5

Darüber hinaus sind die in Kapitel 4.2.6.2 definierten, maximal realisierbaren Behälterbeladungen als Nebenbedingung für die Entwurfsgröße Behälterbeladung relevant, siehe Tabelle 23.

Tabelle 23: Technisch maximal mögliche Behälterbeladungen entsprechend der Behälterannahmen für Tongestein und Steinsalz

Abfallart	Maximale Beladung in Anzahl BE bzw. Kokillen für Behälter im Tongestein	Maximale Beladung in Anzahl BE bzw. Kokillen für Behälter im Steinsalz
DWR	3	10
SWR	9	30
WWER	7,5	25
CSD-V	3	3

Als Art der Einlagerung der Endlagerbehälter wird in den vorläufigen Auslegungen des Endlagers im Tongestein sowie im Steinsalz das Konzept der Streckenlagerung zugrunde gelegt, siehe Kapitel 4.2.5. Im Folgenden werden diesbezüglich die wesentlichen Komponenten identifiziert und deren zugehörige thermophysikalischen Materialparameter abgeschätzt. Für poröse Medien werden hierbei immer die effektiven Materialparameter angegeben.

In Beispiel 20 und *Beispiel 21* werden die Modellannahmen hinsichtlich der Einlagerungskonzepte entsprechend der vorläufigen Endlagerauslegung im Tongestein und Steinsalz dargestellt.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

Beispiel 20: Einlagerungskonzept entsprechend der vorläufigen Endlagerauslegung im Tongestein Opalinuston

Einlagerungskonzept entsprechend der vorläufigen Endlagerauslegung im Tongestein Opalinuston

Das zugehörige Streckenprofil inkl. eines Endlagerbehälters für eine vorläufige Auslegung des Endlagers im Tongestein ist schematisch in Abbildung 40 dargestellt. Zusätzliche Angaben wie z. B. die exakten Abmessungen finden sich in Kapitel 4.2.5. Der Endlagerbehälter liegt auf einem Auflagesockel. Der Rest der Strecke wird mit dem sog. Buffer aufgefüllt, der im Falle eines Behälterdefektes die Migration der Radionuklide verlangsamen soll. Darüber hinaus ist ein Streckenausbau aus einer 30 cm dicken Spritzbetonschicht vorgesehen. Das umgebende Gestein im einschlusswirksamen Gebirgsbereich ist der Opalinuston. Die in den Simulationen verwendeten Materialparameter sind in Tabelle 24 dargestellt.

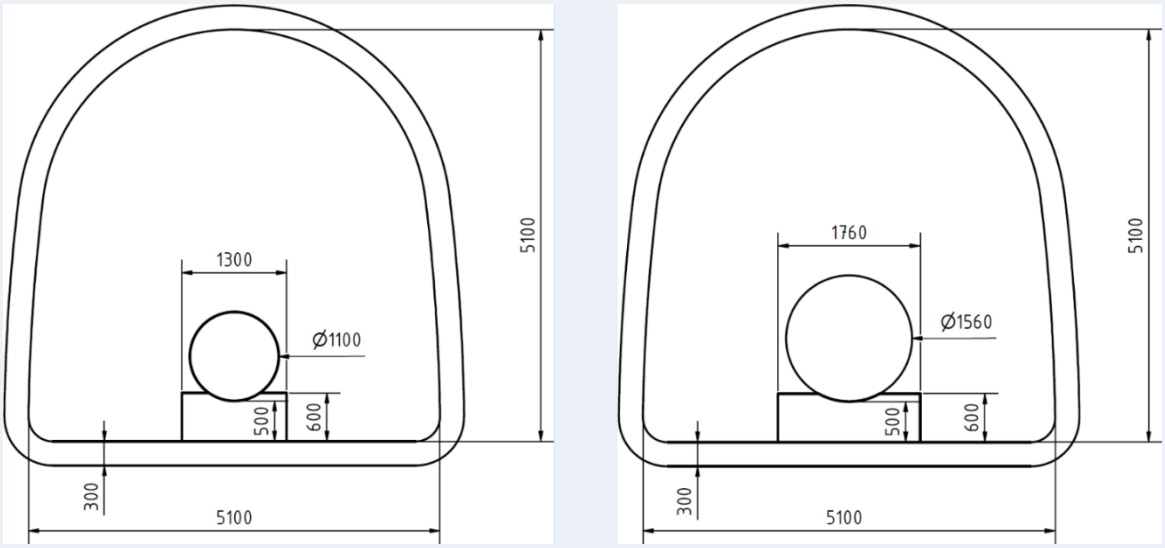


Abbildung 40: Beispielhafte Darstellung des Streckenquerschnitts (mit Ausbau) für ein Endlager im Tongestein und Gebinde mit bestrahlten Brennelementen (links) und Gebinde mit CSD-V Kokillen (rechts)

Da die zu verwendenden quellfähigen Tonmineralien für den Behältersockel und den Buffer zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch nicht genau festgelegt wurden, werden ersatzweise Materialkennwerte für Bentonit verwendet. Die thermophysikalischen Materialparameter für den Opalinuston und den Bentonit wurden aus Daten abgeschätzt, die im Rahmen von Projekten des Mont Terri Felslabors (Schweiz) gewonnen wurden und u. a. in (Bossart et al. 2017; Gaus et al. 2014) dokumentiert sind. Die Eigenschaften dieser beiden Materialien hängen in starkem Umfang vom jeweiligen Sättigungsgrad ab. Da zum gegenwärtigen Zeitpunkt keine hydraulischen Berechnungen durchgeführt werden, müssen Annahmen hinsichtlich des Sättigungsgrads getroffen werden.

Einlagerungskonzept entsprechend der vorläufigen Endlagerauslegung im Tongestein Opalinuston

Es ist davon auszugehen, dass der Opalinuston im einschlusswirksamen Gebirgsbereich vor der Auffahrung der Strecken vollständig gesättigt vorliegt. Auf Grund der beabsichtigten kurzen Offenhaltungszeit der Einlagerungsstrecken und der Distanz zum Behälter wird der Opalinuston auch in den Berechnungen als vollständig gesättigt angenommen. Für die Wärmeleitfähigkeit des Opalinuston wird ein transversal isotropes Materialverhalten zugrunde gelegt, daher ergeben sich unterschiedliche Werte parallel (||) und senkrecht (⊥) zur Schichtung. Für den Bentonit wird angenommen, dass dieser im Fall des Behältersockels in kompaktierter Form vorliegt. Für den Buffer werden in der vorläufigen Endlagerauslegung im Tongestein zwei verschiedene Optionen vorgeschlagen, die Einbringung in Form von Formsteinen sowie alternativ als Granulat. Im Folgenden wird ein Buffer aus Formsteinen betrachtet. Aus Konservativitätsgründen werden die Materialparameter für den Bentonit unter der Annahme eines trockenen Zustands abgeschätzt. In einem späteren Stadium der Endlagerauslegung ist eine Erweiterung auf thermo-hydraulische Berechnungen anzustreben, um die Prognosegenauigkeit zu erhöhen.

Tabelle 24: Thermophysikalische Materialparameter, abgeschätzt für eine vorläufige Endlagerauslegung im Tongestein am Beispiel des Opalinuston

Komponente	Material	Dichte ρ in kg/m³	Spez. Wärmekapazität c_p in J/kg/K	Wärmeleitfähigkeit λ in W/m/K
ewG	Opalinuston	2 450	1 000	|| : 2,1 ⊥ : 1,2
Buffer	Kompaktierter Bentonit	1 806	1 058	0,8
Behältersockel	Kompaktierter Bentonit	1 806	1 058	0,8
Streckenausbau	Spritzbeton	2 355	1 102	1,86

Beispiel 21: Einlagerungskonzept entsprechend der vorläufigen Endlagerauslegung im Steinsalz (steile Lagerung)

Einlagerungskonzept entsprechend der vorläufigen Endlagerauslegung im Steinsalz (steile Lagerung)

Das Streckenprofil einer Einlagerungsstrecke für eine vorläufige Endlagerauslegung im Steinsalz ist in Abbildung 41 zu sehen. Der Behälter liegt hierbei in einer Mulde, welche wenige Zentimeter tief in die Sohle gefräst wurde. Nach der Einlagerung der Gebinde wird die Strecke mit trockenem Salzgrus versetzt.

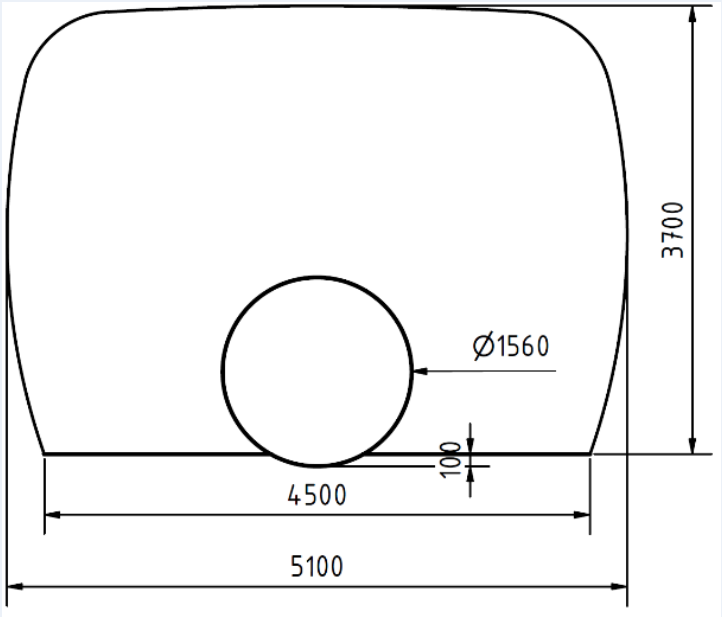


Abbildung 41: Beispielhafte Darstellung des Streckenquerschnitts für ein Endlager im Steinsalz und Gebinde mit bestrahlten Brennelementen oder CSD-V Kokillen

Die thermophysikalischen Parameter für das Steinsalz und den Salzgrus werden auf Basis von Daten aus den Veröffentlichungen (Heemann et al. 2014; Europäische Kommission et al. 2004) abgeschätzt, siehe Tabelle 25. Für den Salzgrusversatz wird eine zeitlich konstante Porosität von 0,3 angesetzt. Hierbei handelt es sich um eine konservative Abschätzung, da auf Grund der Gebirgskonvergenz eine zeitliche Kompaktion des Salzgrusversatzes stattfindet. Die Salzgruskompaktion wird in den Simulationen innerhalb der rvSU aufgrund des beträchtlichen rechentechnischen Mehraufwands nicht abgebildet. Längerfristig ist aber eine Erweiterung der Simulationen um thermo-mechanische Prozesse geplant.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

Einlagerungskonzept entsprechend der vorläufigen Endlagerauslegung im Steinsalz (steile Lagerung)

Tabelle 25: Thermophysikalische Materialparameter, abgeschätzt für eine vorläufige Endlagerauslegung im Steinsalz

Komponente	Material	Dichte ρ in kg/m³	Spez. Wärmekapazität c_p in J/kg/K	Wärmeleitfähigkeit λ in W/m/K
ewG	Steinsalz (z2-Folge)	2 177	875	5
Streckenversatz	Salzgrus	1 524	875	1

4.2.8.4 Auslegungsstrategie

In Bezug auf das Layout des Endlagerbergwerks existieren viele Freiheitsgrade, die einen direkten Einfluss auf die resultierenden, abfallspezifischen Flächenbedarfe haben. Aus diesem Grund ist es notwendig, eine geeignete Auslegungsstrategie festzulegen, in der das gewünschte Optimierungsziel, sowie die zu erfüllenden Nebenbedingungen definiert werden. In dieser Arbeit liegt der Fokus auf einer Minimierung der Flächenbedarfe unter der Berücksichtigung bergbaulicher Grenzen. In den Simulationsmodellen bestehen die primären Entwurfsvariablen im Allgemeinen aus der Behälterbeladung, dem Strecken- und dem Behälterabstand.

Zudem stellt die maximal zulässige Temperatur an der Behälteraußenwand eine der wesentlichen Nebenbedingungen der Auslegungsrechnungen dar. Gemäß § 27 Abs. 4 StandAG soll die Temperatur an der Außenfläche des Endlagerbehälters 100 °C vorsorglich nicht überschreiten, solange aufgrund von Forschungsarbeiten keine abweichenden Festlegungen für die einzelnen Wirtsgesteine getroffen wurden.

In Vorstudien hat sich gezeigt, dass üblicherweise ein minimaler, abfallspezifischer Flächenbedarf erzielt werden kann, indem die geometrischen Abmessungen (Strecken- und Behälterabstand) klein gewählt werden. Daher werden die Strecken- und Behälterabstände für die Berechnungen innerhalb der rvSU nicht als freie Entwurfsvariablen gehandhabt, sondern Festlegungen getroffen, die das Kriterium eines minimalen, abfallspezifischen Flächenbedarfs berücksichtigen. In Beispiel 22 werden die genannten Entwurfsgrößen für die vorläufige Endlagerauslegung im Tongestein und Steinsalz dargestellt.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

Beispiel 22: Strecken- und Behälterabstände entsprechend der vorläufigen Endlagerauslegung für das Tongestein Opalinuston und Steinsalz (steile Lagerung).

Strecken- und Behälterabstände entsprechend der vorläufigen Endlagerauslegung für das Tongestein Opalinuston und Steinsalz (steile Lagerung)

Der Mindeststreckenabstand zwischen Einlagerungsstrecken, der auf Grund bergbaulicher Überlegungen nicht unterschritten werden darf, wird im Kapitel 4.2.7 für eine vorläufige Endlagerauslegung im Tongestein und im Steinsalz definiert. In Tabelle 26 ist zu sehen, dass die resultierenden Mindeststreckenabstände im Tongestein stark abhängig von der betrachteten Teufe sind. Für das Steinsalz folgt entsprechend der vorläufigen Auslegung des Endlagers ein über den betrachteten Teufenbereich konstanter Wert von 15,3 m. Die bergbaulich getriebenen Mindeststreckenabstände werden gemäß der vorläufigen Endlagerplanung als Eingangsgrößen für die Streckenabstände in den Simulationsmodellen übernommen.

Tabelle 26: Mindeststreckenabstände zwischen Einlagerungstrecken für eine vorläufige Endlagerauslegung im Tongestein Opalinuston (Abstand Streckenmitte zu Streckenmitte)

Teufe in m	Streckenabstand in m
350	16,7
450	21,4
600	30,3
750	41,5
900	55,3

Eine weitere wichtige Eingangsgröße für die Berechnung der Endlagerflächenbedarfe ist der Behälterabstand. In Kapitel 4.2.6.4.2 wurde sowohl im Tongestein als auch im Steinsalz ein Mindestbehälterabstand von 1 m vorgeschlagen. Für die signifikant wärmeentwickelnden Abfallarten wird in den Simulationsrechnungen ein größerer Behälterabstand von 2,5 m verwendet, um ausreichend Sicherheitsreserven z. B. für die Platzierung der Behälter oder etwaige Veränderungen am Versatzmaterial vorzusehen.

Die Behälterbeladung wird als freier Parameter definiert und im Rahmen der thermischen Auslegungsrechnungen ermittelt. Die maximale Behälterbeladung wird dabei so berechnet, dass die Grenztemperatur an der Behälteraußenwand von 100 °C über den gesamten Bewertungszeitraum nicht überschritten wird. Die Behälterbeladung ist zudem begrenzt durch die behälterspezifische, baulich realisierbare Maximalbeladung, die Tabelle 23 zu entnehmen ist.

Bei der Ermittlung der möglichen Behälterbeladung werden nicht nur positive ganze Zahlen, sondern ein kontinuierliches Wertespektrum zugelassen, da die Behälterbeladungen im Sinne eines Indikators für die zulässige, äquivalente Wärmeleistung interpretiert werden können. Eine geeignete Behälterbeladung könnte in der Praxis z. B. durch Mischung von Inventaren unterschiedlicher Abklingzeit oder durch das Zerlegen von Brennelementen erreicht werden und könnte z. B. ein Aspekt späterer Optimierungsprozesse sein.

Die gewählte Auslegungsstrategie kann unter Umständen zu verhältnismäßig geringen Behälterbeladungen führen, sodass die Behälterkapazitäten nicht optimal ausgenutzt werden. Daher ist es denkbar, mit steigendem Detailierungsgrad der Endlagerplanung auch ein gemischtes Optimierungsziel vorzusehen, welches zusätzlich zur Minimierung des Flächenbedarfs z. B. auch eine Maximierung der Behälterbeladung unter Annahme eines relativen Gewichtungsfaktors enthält.

4.2.8.5 Simulationsmodell

Für die Simulationsberechnungen kommt zum aktuellen Zeitpunkt die Open Source FEM Software CalculiX (Dhondt 2004) zum Einsatz. Perspektivisch werden die numerischen Berechnungen voraussichtlich primär mit der Open Source FEM Software OpenGeoSys (Bilke et al. 2019; Kolditz et al. 2012) durchgeführt, mittels derer gekoppelte thermische, hydraulische, mechanische und chemische Prozesse abgebildet werden können.

In Bezug auf die thermischen Berechnungen ist anzunehmen, dass die Wärmeübertragung größtenteils mittels Wärmeleitung erfolgt und daher Anteile aus Konvektion sowie Wärmestrahlung vernachlässigt werden können. Aus diesem Grund dient die instationäre Wärmeleitungsgleichung als Basis der hier gezeigten Berechnungen, mittels derer die zeitliche Entwicklung des Temperaturfelds im Behälternahfeld und im umgebenden Wirtsgestein ermittelt werden.

Durch die gezielte Ausnutzung von Symmetrieeigenschaften ist es möglich, die Berechnungen mit einem Viertelmodell durchzuführen. Der Übergang des Modells eines Behälters in der Einlagerungsstrecke zu einem Viertelmodell wird in Abbildung 42 beispielhaft dargestellt. Durch die Anwendung des Viertelmodells wird die benötigte Rechenzeit wesentlich reduziert.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

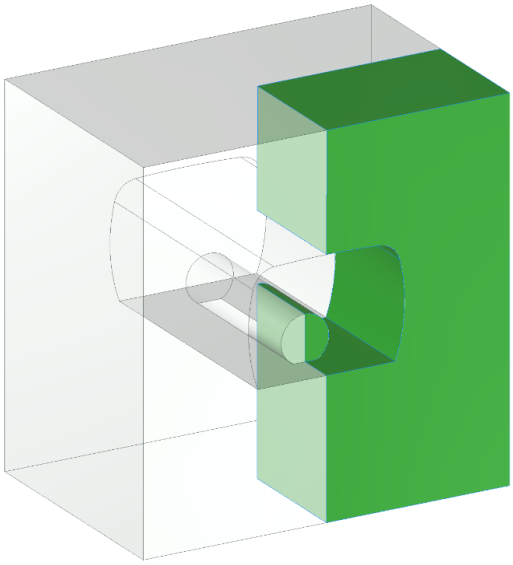


Abbildung 42: Veranschaulichung des im Rahmen der Simulation verwendeten Viertelmodells (grün) am Beispiel einer vorläufigen Endlagerauslegung im Steinsalz (steile Lagerung)

Die Wärmeleistung der im Behälter befindlichen Abfälle wird mittels einer über den Behälterkorb (siehe Abbildung 42) homogen verteilten Volumenwärmequelle angenähert. Zur Modellierung des zeitlichen Verlaufs der Wärmeleistung werden die in Kapitel 4.2.8.2 gezeigten Wärmeleistungskurven angewendet, skaliert mit der jeweiligen Behälterbeladung. Eine potenziell inhomogene Verteilung der Wärmeleistung über die Brennelement-/Kokillenlänge wird zum gegenwärtigen Zeitpunkt in den Berechnungen nicht berücksichtigt. Die maximale Temperatur an der Behälteraußenwand wird am obersten Punkt des Behälters (auf Höhe der Behältermitte) evaluiert, da dort die höchsten Temperaturen an der Behälteraußenwand zu erwarten sind. Dieser Auswertungspunkt ist in Abbildung 43 gelb eingezeichnet.

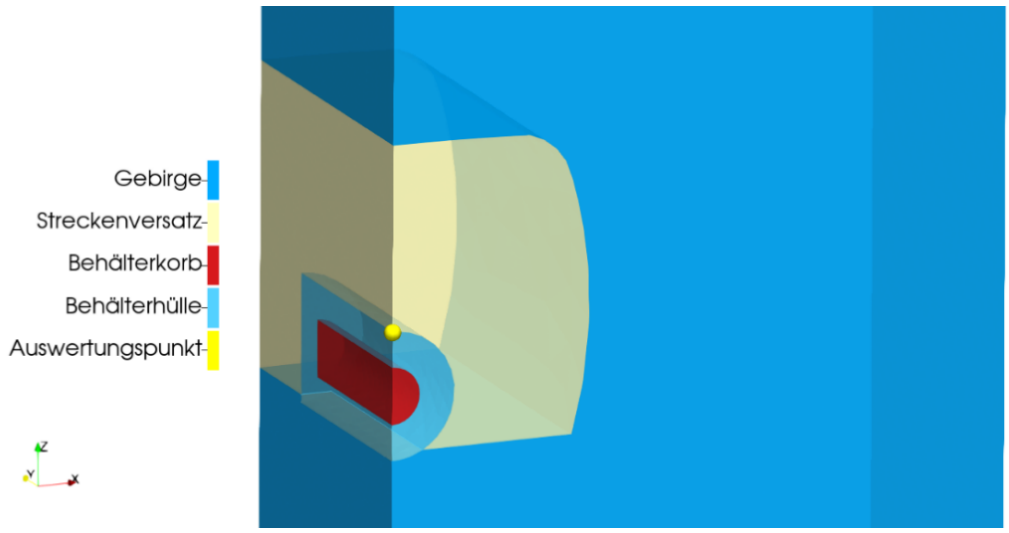


Abbildung 43: Schematische Darstellung der Position des Auswertungspunkts (für die maximale Temperatur an der Behälteraußenwand) am Beispiel des Viertelmodells für die vorläufige Endlagerauslegung im Steinsalz

Das vollständige Simulationsgebiet ist beispielhaft in Abbildung 44, inklusive der zugehörigen Randbedingungen, dargestellt. Es besteht aus einem Quader mit einer festen Höhe von 2 500 m, der an der Oberseite mit der Geländeoberkante abschließt. Die horizontalen Abmessungen ergeben sich aus der Behälterlänge, dem Behälter- sowie dem Streckenabstand. Die Sohle befindet sich auf Höhe der gewünschten Zielteufe für das Endlager. Da kein konkretes Schichtenverzeichnis berücksichtigt wird, werden die Materialeigenschaften, die für den einschlusswirksamen Gebirgsbereich abgeschätzt wurden, auch für das gesamte Gebirge angewendet. Gemäß Kapitel 4.2.1 werden für die vorläufige Endlagerauslegung im Tongestein Teufenbereiche von 350 m bis 900 m und im Steinsalz von 450 m bis 1 200 m betrachtet.

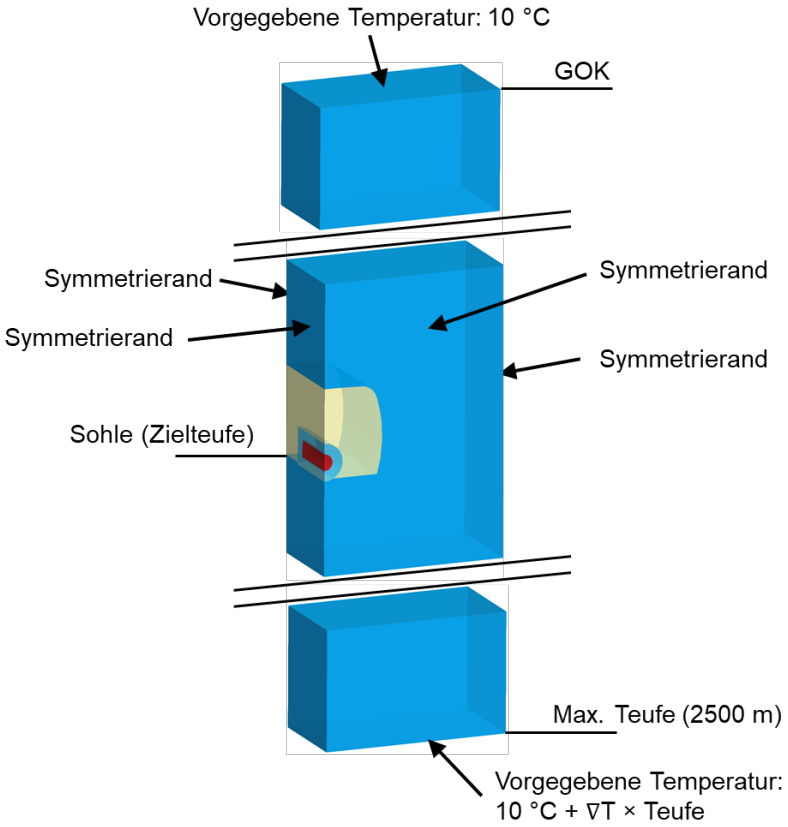


Abbildung 44: Schematische Darstellung der Randbedingungen für das Simulationsmodell

Im Simulationsmodell werden an den seitlichen Rändern Symmetrierandbedingungen (kein Wärmefluss) angesetzt. Dadurch werden einerseits die Symmetrieannahmen des Viertelmodells berücksichtigt, aber auch fiktiv eine unendlich häufig wiederholte Elementarzelle modelliert. Dies entspricht somit der Annahme einer unendlichen Ausdehnung des Einlagerungsfelds.

An der Geländeoberkante (GOK) des Simulationsgebietes wird eine zeitlich konstante Temperatur von 10 °C vorgegeben. Im Rahmen der generischen Endlagerauslegung werden für die Berechnungen verschiedene geothermischen Gradienten (0,02 K/m; 0,03 K/m; 0,04 K/m; 0,05 K/m) angesetzt, auf Basis derer die jeweilige Temperaturvorgabe am unteren Modellrand errechnet wird. Die gewählte Vorgehensweise ermöglicht auch die Berechnung der Flächenbedarfe in Abhängigkeit der

initialen Temperatur im Einlagerungsbereich T_{EB}. Längerfristig ist es auch denkbar, ortsspezifische Temperaturdaten zu verwenden, um die Prognosegenauigkeit für einen konkreten Ort zu erhöhen.

Die Anfangsbedingungen werden über eine vorgeschaltete Rechnung ermittelt, in welcher der stationäre Zustand (ohne Wärmefreisetzung im Behälterkorb) berechnet wird. Dies führt dazu, dass weitere Einflussfaktoren auf die Anfangstemperaturen, zum Beispiel durch die Bewetterung, entsprechend des Detaillierungsgrads der vorläufigen Endlagerauslegung nicht abgebildet werden.

Für die Simulation wird ein maximaler Zeitraum von 1.000 Jahren betrachtet, da die Wärmeleistung der betrachteten Abfälle bis zu diesem Zeitpunkt in jedem Fall so stark abnimmt, dass danach ein über die Zeit kontinuierlicher Abfall der Temperatur an der Behälteraußenwand resultiert. Die zeitliche Diskretisierung erfolgt mittels eines adaptiven Zeitschrittverfahrens. Beispiele für die räumliche Diskretisierung innerhalb des Finite Element Modells sind in Beispiel 23 dargestellt. In Vorstudien wurden die Raum- und Zeitdiskretisierung anhand von Konvergenzanalysen überprüft.

Beispiel 23: Beispiel einer räumliche Diskretisierung für das Finite Elemente Modell für die vorläufige Endlagerauslegung im Tongestein Opalinuston und Steinsalz (steile Lagerung

Beispiel einer räumliche Diskretisierung für das Finite Elemente Modell für die vorläufige Endlagerauslegung im Tongestein Opalinuston und Steinsalz (steile Lagerung)

Für die Simulation mit der Finite Elemente Methode (FEM) ist eine räumliche Diskretisierung des Simulationsgebietes notwendig, die mittels linearer Tetraederelemente (C3D4) erfolgt. In Abbildung 45 und Abbildung 46 werden beispielhaft die räumliche Diskretisierungen für einen Rechenfall für eine vorläufige Endlagerauslegung im Tongestein bzw. Steinsalz gezeigt. Im Behälternahfeld wird eine feinere Vernetzung gewählt, um die dortigen Prozesse möglichst genau abbilden zu können.

Beispiel einer räumliche Diskretisierung für das Finite Elemente Modell für die vorläufige Endlagerauslegung im Tongestein Opalinuston und Steinsalz (steile Lagerung)

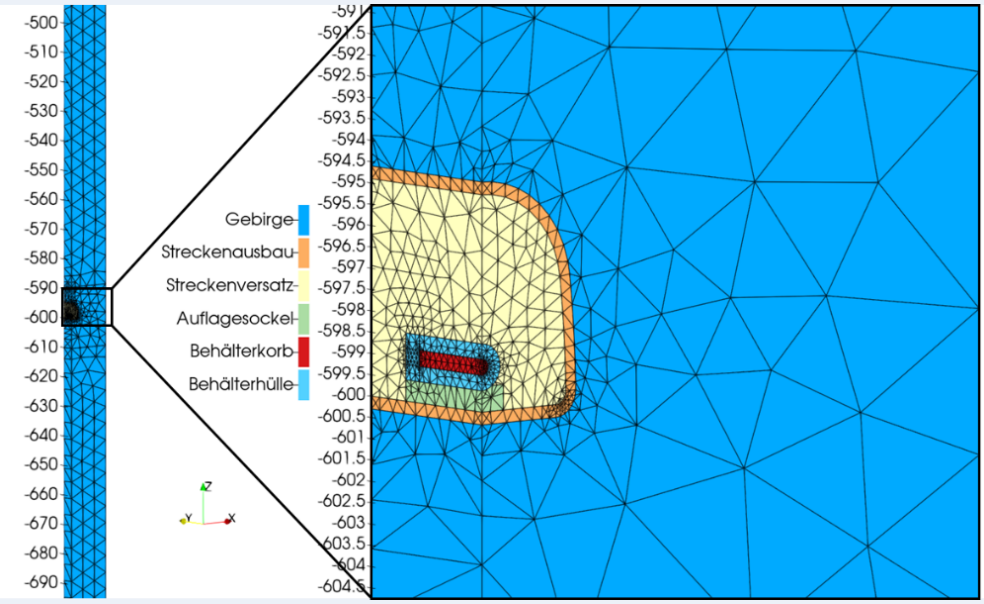


Abbildung 45: Beispiel für die räumliche Diskretisierung für die vorläufige Endlagerauslegung im Tongestein (52 013 Elemente, 11 407 Knoten)

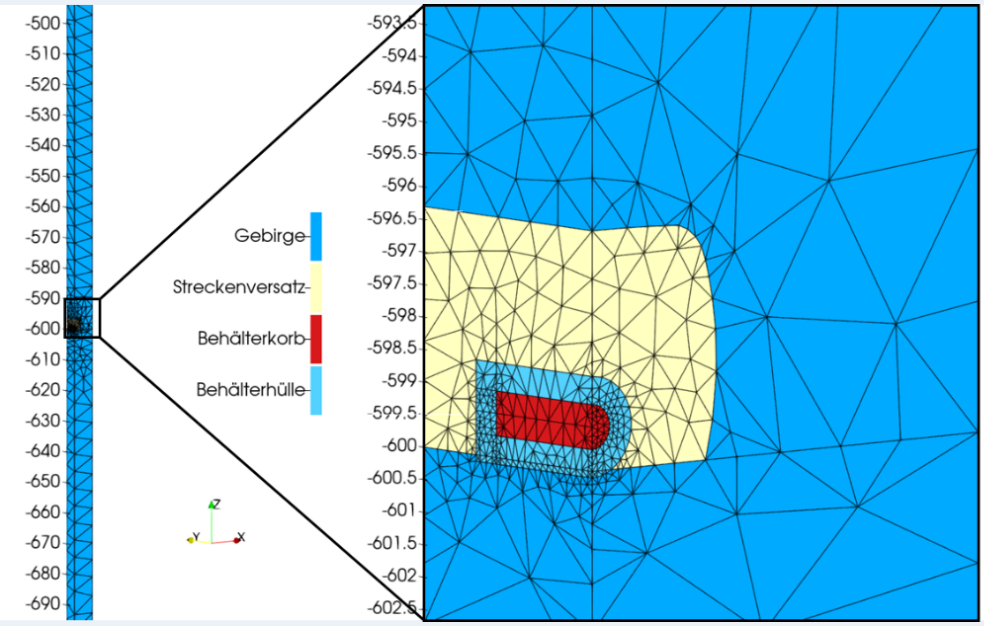


Abbildung 46: Beispiel für die räumliche Diskretisierung für die vorläufige Endlagerauslegung im Steinsalz (33 667 Elemente, 7 299 Knoten)

Insgesamt betrachtet sind zum aktuellen Zeitpunkt viele Eingangsgrößen des Simulationsmodells mit Ungewissheiten behaftet. Für diese Eingangsgrößen werden daher konservative Annahmen getroffen, um eine Unterschätzung der Flächenbedarfe zu vermeiden. Hinsichtlich der Bewertung der Simulationsergebnisse ist auch zu berücksichtigen, dass in den Simulationsmodellen aktuell keine Spalten modelliert werden, die sich potenziell zwischen den einzelnen Komponenten ergeben können und das Wärmeleitverhalten vermutlich negativ beeinflussen würden. Mit steigender Konkretisierung der Endlagerauslegung, der Berücksichtigung weiterer physikalischer Prozesse sowie der Ableitung von Parametern aus zusätzlichen experimentellen Untersuchungen kann die Prognosequalität in nachfolgenden Arbeiten erhöht werden.

4.2.8.6 Behälterbeladungen für wärmeentwickelnde Abfälle

Als Resultat der Simulationsmodelle ergibt sich die Behälterbeladung pro Abfallart für eine initiale Temperatur im Einlagerungsbereich und eine spezifische Teufe. Auf Basis des Abfallmengengerüstes (siehe Tabelle 18) kann anschließend die Anzahl an Behältern pro Inventarart abgeschätzt werden. Diese dient als Eingangsgröße für die Abschätzung der kumulierten Endlagerflächenbedarfe. In Beispiel 24 sind die Behälterbeladungen für einen Auslegungsfall der vorläufigen Endlagerauslegung im Tongestein und Steinsalz dargestellt.

Beispiel 24: Beispiel zu Behälterbeladungen für vorläufige Endlagerauslegungen im Tongestein Opalinuston und Steinsalz (steile Lagerung)

Beispiel zu Behälterbeladungen für vorläufige Endlagerauslegungen im Tongestein Opalinuston und Steinsalz (steile Lagerung)

Die mittels numerischen Berechnungen abgeschätzten Behälterbeladung für eine vorläufige Endlagerauslegung im Tongestein und Steinsalz sind in Tabelle 27 für einen Beispielfall dargestellt. Es wurde hierbei der Fall einer Teufe von 600 m und einer initialen Temperatur im Einlagerungsbereich von 28 °C (entspricht einem angenommen geothermischen Gradienten von 0,03 K/m) zugrunde gelegt. Aus Tabelle 27 ist ersichtlich, dass die Behälterbeladungen für die vorläufige Endlagerauslegung im Steinsalz auf Grund der für den Wärmetransport günstigeren thermophysikalischen Materialeigenschaften wesentlich höher sind als im Tongestein und somit insgesamt weniger Endlagerbehälter notwendig sind. Im Allgemeinen ist für die Berechnungen im Tongestein zu berücksichtigen, dass auf Grund der mit der Teufe ansteigenden Streckenabstände auch der pro Behälter benötigte Flächenbedarf ansteigt, wohingegen dieser Wert beim Steinsalz konstant bleibt.

Beispiel zu Behälterbeladungen für vorläufige Endlagerauslegungen im Tongestein Opalinuston und Steinsalz (steile Lagerung)

Tabelle 27: Beispiel der Behälterbeladungen für eine vorläufige Endlagerauslegungen im Tongestein und Steinsalz für eine initiale Temperatur im Einlagerungsbereich von 28 °C und bei einer Teufe von 600 m

Abfallart	Behälterbeladung (Tongestein) in BE/Kokillen pro Behälter	Behälterbeladung (Steinsalz) in BE/Kokillen pro Behälter
DWR-MOX	0,46	0,52
DWR-UOX	1,67	2,47
SWR-MOX	2,17	2,61
SWR-UOX	5,19	8,87
WWER	7,50	24,26
CSD-V	1,82	2,54

Im Beispiel 25 werden die Simulationsergebnisse für eine vorläufige Endlagerauslegung im Tongestein bei einer Teufe von 600 m und für eine initiale Temperatur im Einlagerungsbereich von 28 °C für zwei unterschiedliche Inventararten (DWR-MOX und CSD-V) dargestellt. Die entsprechenden Ergebnisse für eine vorläufige Endlagerauslegung im Steinsalz finden sich analog dazu in Beispiel 26.

Beispiel 25: Beispiel zu Simulationsergebnissen für eine vorläufige Endlagerauslegung im Tongestein Opalinuston

Beispiel zu Simulationsergebnissen für eine vorläufige Endlagerauslegung im Tongestein Opalinuston

In Abbildung 47 ist beispielhaft ein Auszug der Berechnungsergebnisse für eine vorläufige Endlagerauslegung im Tongestein dargestellt. Anhand dieser Abbildung ist ersichtlich, dass das Maximum der Temperatur an der Behälteraußenwand nach ungefähr 10 Jahren (CSD-V) bzw. 38 Jahren (DWR-MOX) auftritt. Die Charakteristik des Temperaturabfalls nach Erreichen des Temperaturmaximums ist jedoch stark von der Abfallart und deren zeitlich veränderlicher Wärmefreisetzungsrate abhängig. So ergibt sich für eine Beladung mit CSD-V Kokillen ein zügiger Abfall der Temperatur an der Behälteraußenwand. Dahingegen führt eine Behälterbeladung mit DWR-MOX Brennelementen zu einer über einen langen Zeitraum vergleichsweisen hohen, maximalen Temperatur an der Behälteraußenwand.

Beispiel zu Simulationsergebnissen für eine vorläufige Endlagerauslegung im Tongestein Opalinuston

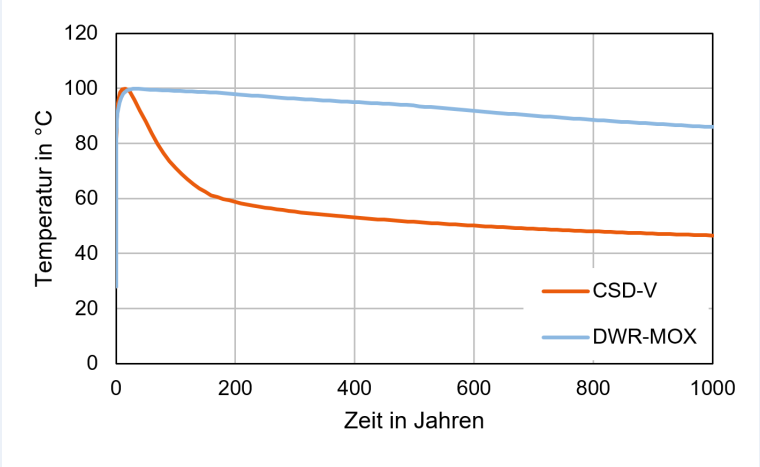


Abbildung 47: Beispiel der zeitlichen Temperaturentwicklung an der Behälteraußenwand für eine Endlagerauslegung im Tongestein für die Inventararten CSD-V und DWR-MOX (Teufe 600 m, initiale Temperatur im Einlagerungsbereich von 28 °C)

In Abbildung 48 und Abbildung 49 ist die zugehörige räumliche Temperaturverteilung im Einlagerungsbereich für die Abfallarten CSD-V respektive DWR-MOX beispielhaft dargestellt. In beiden Fällen resultiert eine im Vergleich zum Steinsalz (siehe Beispiel 26) räumlich stärker konzentrierte Erwärmung im Bereich um den Behälter. Dies ist eine direkte Folge der geringen Wärmeleitfähigkeiten der Materialien im Behälternahfeld.

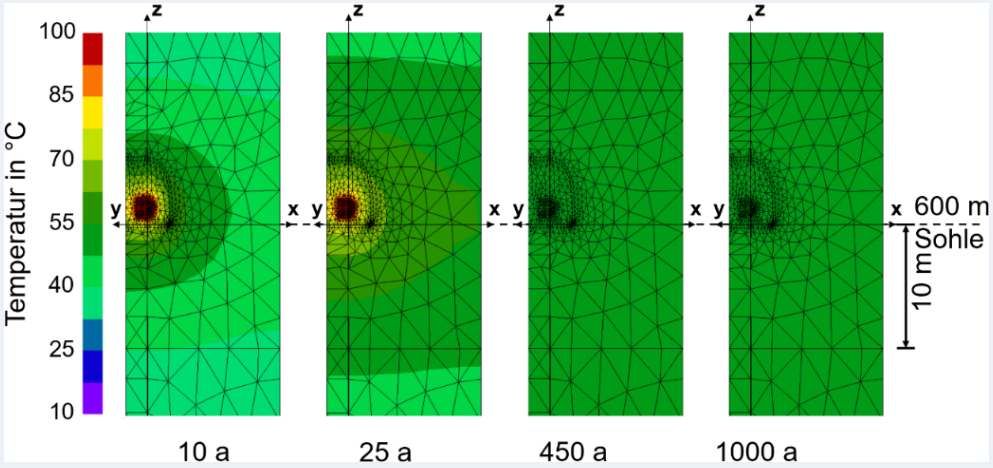


Abbildung 48: Beispiel der zeitlichen Entwicklung des Temperaturfeldes im Einlagerungsbereich für eine Endlagerauslegung im Tongestein für die Inventarart CSD-V (Teufe 600 m, initiale Temperatur im Einlagerungsbereich von 28 °C)

Beispiel zu Simulationsergebnissen für eine vorläufige Endlagerauslegung im Tongestein Opalinuston

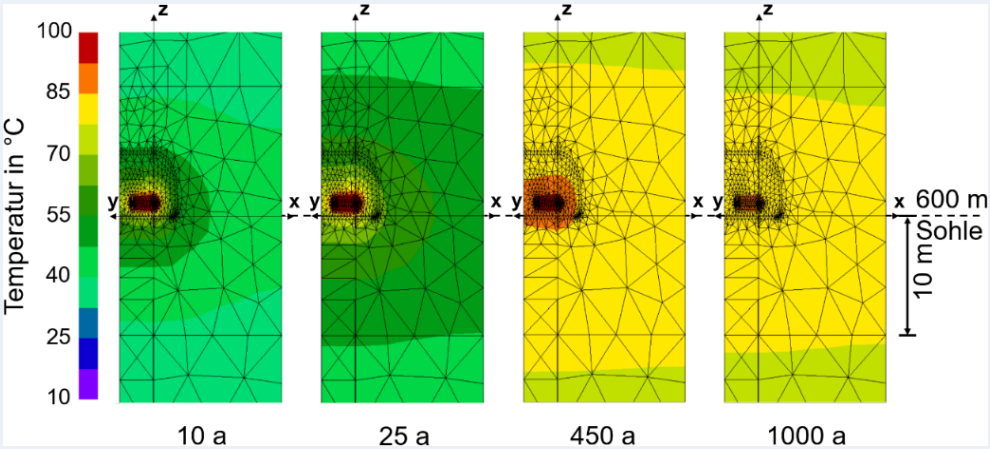


Abbildung 49: Beispiel der zeitlichen Entwicklung des Temperaturfeldes im Einlagerungsbereich für eine Endlagerauslegung im Tongestein für die Inventarart DWR-MOX (Teufe 600 m, initiale Temperatur im Einlagerungsbereich von 28 °C)

Beispiel 26: Beispiel zu Simulationsergebnissen für eine vorläufige Endlagerauslegung im Steinsalz (steile Lagerung)

Beispiel zu Simulationsergebnissen für eine vorläufige Endlagerauslegung im Steinsalz (steile Lagerung)

In Abbildung 50 bis Abbildung 52 ist ein Auszug der Ergebnisse der Temperaturfeldsimulationen für eine vorläufige Endlagerauslegung im Steinsalz dargestellt. Die Abbildung 50 zeigt den zeitlichen Verlauf der maximalen Temperatur auf der Behälteraußenwand für die Abfallarten CSD-V und DWR-MOX. Für die Abfallart CSD-V ist die maximale Temperatur von 100 °C an der Behälteraußenwand bereits nach ungefähr 24 Jahren erreicht. Dahingegen tritt das Temperaturmaximum für die Abfallart DWR-MOX vergleichsweise spät erst nach ungefähr 449 Jahren auf. Die unterschiedliche Ausprägung der zeitlichen Lage des Temperaturmaximums wird durch das Abklingverhalten der Abfälle und der damit verbundenen zeitlichen Wärmefreisetzung getrieben. Der rapide Abfall der Wärmefreisetzung der CSD-V Abfälle führt zu einem zeitlich frühen, der langsame Abfall der Wärmefreisetzung der DWR-MOX Abfälle führt zu einem zeitlich späten Temperaturmaximum auf der Behälteroberfläche.

Beispiel zu Simulationsergebnissen für eine vorläufige Endlagerauslegung im Steinsalz (steile Lagerung)

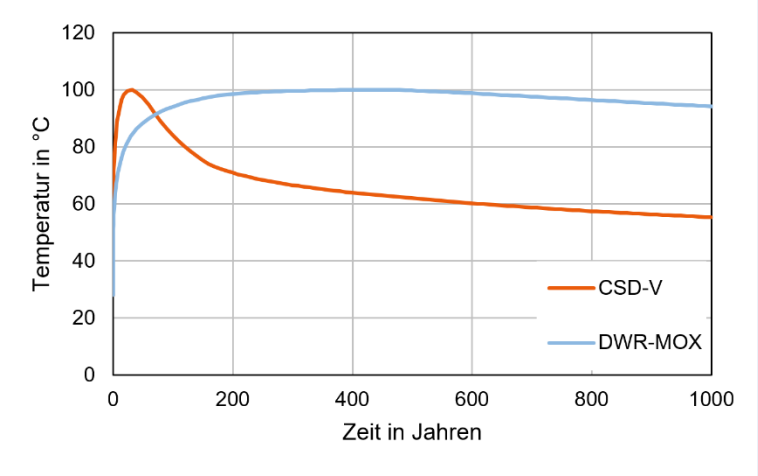


Abbildung 50: Beispiel der zeitlichen Temperaturentwicklung an der Behälteraußenwand für eine Endlagerauslegung im Steinsalz für die Inventararten CSD-V und DWR-MOX (Teufe 600 m, initiale Temperatur im Einlagerungsbereich von 28 °C)

Der rasche Abfall der Wärmeleistung der CSD-V Kokillen führt ferner zu einer lokal begrenzten Erwärmung des Gebirges nach der Einlagerung, siehe Abbildung 51. Es findet keine gleichmäßige Erwärmung des Gebirges im Einlagerungsbereich statt. Dahingegen führt die über einen langen Zeitraum beständige Wärmeabgabe des Abfalltyps DWR-MOX nach mehreren hundert Jahren zu einer eher gleichmäßigen Erwärmung des Gebirges im Einlagerungsbereichs – siehe Abbildung 52.

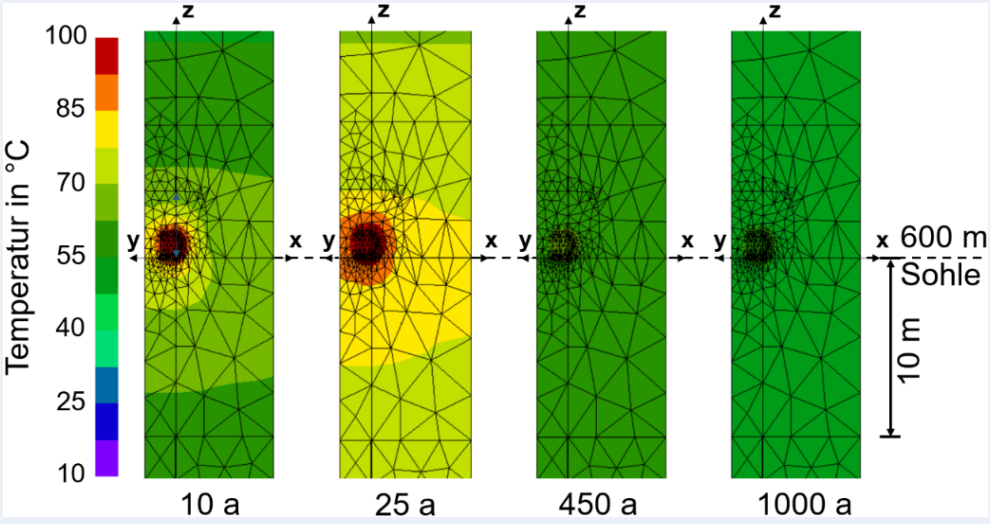


Abbildung 51: Beispiel der zeitlichen Entwicklung des Temperaturfeldes im Einlagerungsbereich für eine Endlagerauslegung im Steinsalz für die Inventarart CSD-V (Teufe 600 m, initiale Temperatur im Einlagerungsbereich von 28 °C)

Beispiel zu Simulationsergebnissen für eine vorläufige Endlagerauslegung im Steinsalz (steile Lagerung)

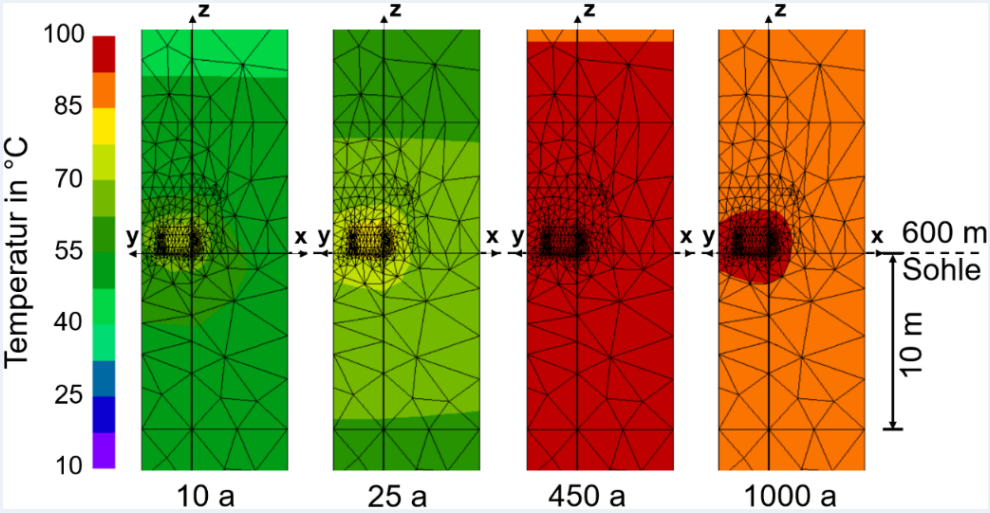


Abbildung 52: Beispiel der zeitlichen Entwicklung des Temperaturfeldes im Einlagerungsbereich für eine Endlagerauslegung im Tongestein für die Inventarart DWR-MOX (Teufe 600 m, initiale Temperatur im Einlagerungsbereich von 28 °C)

4.2.8.7 Kumulierte Endlagerflächenbedarfe

In diesem Abschnitt wird die grundlegende Vorgehensweise erläutert, um auf Basis der zuvor beschriebenen Behälterbeladungen einen kumulierten Endlagerflächenbedarf abzuschätzen und anschließend erfolgt eine Diskussion der erzielten Ergebnisse. Das zugrunde gelegte Layout des Endlagerbergwerks wird in Kapitel 4.2.6.9 ausführlich beschrieben. In die finalen Endlagerflächenbedarfe fließen dabei neben den Einlagerungsfeldern auch z. B. Infrastrukturflächen mit ein.

Um die kumulierten Endlagerflächenbedarfe zu berechnen, wird zunächst die notwendige Anzahl an Einlagerungsstrecken aus der prognostizierten Anzahl an notwendigen Endlagerbehältern berechnet. Anschließend lässt sich die Anzahl an Einlagerungszellen und somit der benötigte Flächenbedarf für das gesamte Einlagerungsfeld abschätzen. Durch die Addition der Flächenbedarfe für den Infrastrukturbereich sowie der weiteren Flächen (z. B. aus dem Abstand zwischen Infrastrukturbereich und erstem Querschlag des Einlagerungsbereichs), erhält man den kumulierten Endlagerflächenbedarf in Abhängigkeit der initialen Temperatur im Einlagerungsbereich (bzw. des geothermischen Gradienten) sowie der jeweiligen Teufe. In Beispiel 27 werden die resultierenden Ergebnisse für eine vorläufige Endlagerauslegung im Tongestein gezeigt. Analog dazu sind die Resultate für eine vorläufige Endlagerauslegung im Steinsalz im Beispiel 28 dargestellt.

Beispiel 27: Beispiel von Simulationsergebnissen für eine vorläufige Endlagerauslegung im Tongestein Opalinuston

Beispiel von Simulationsergebnissen für eine vorläufige Endlagerauslegung im Tongestein Opalinuston

Die Ergebnisse für die prognostizierten Endlagerflächenbedarfe für eine vorläufige Endlagerauslegung im Tongestein sind in Abbildung 53 und Abbildung 54 gezeigt. Der Flächenbedarf für eine vorläufige Endlagerauslegung im Tongestein steigt mit zunehmender Teufe stark an, siehe Abbildung 53. Des Weiteren ist ersichtlich, dass ein größerer geothermischer Gradient, und dementsprechend höhere initiale Temperatur im Einlagerungsbereich, zu höheren Flächenbedarfen führt. Der geothermische Gradient stellt einen Bezug zwischen Teufe und Temperatur dar, welcher eine schematische Bearbeitung erleichtert. In der Praxis ist der geothermische Gradient jedoch eine Größe welche über die Teufe zumeist nicht linear ist, bzw. vom Teufenbereich abhängt über den er gemittelt wird. Für die konkrete Endlagerplanung ist die eigentliche Gebirgstemperatur entscheidend, daher erfolgt ergänzend eine weitere Darstellung der errechneten Flächenbedarfe im Tongestein in Abbildung 54. In dieser Abbildung wird die Endlagerfläche für die untersuchten Teufenlagen des Endlagers über die initiale Temperatur im Einlagerungsbereich aufgetragen. Die Abbildung erlaubt die zielgerichtete Ermittlung der prognostizierten Endlagerfläche für eine spezifische Zielteufe des Endlagers bei einer bekannten initialen Temperatur im Einlagerungsbereich.

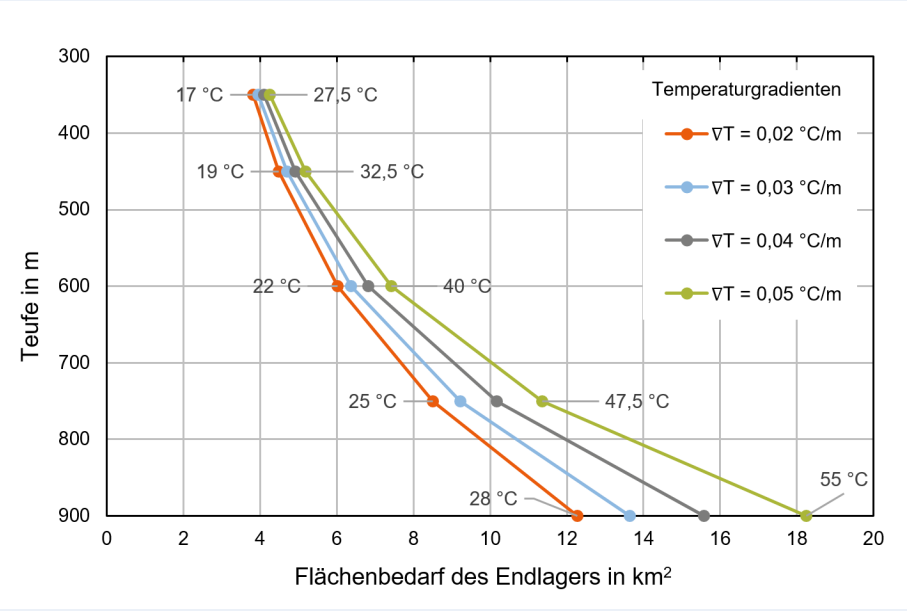


Abbildung 53: Prognostizierter Endlagerflächenbedarf für eine vorläufige Endlagerauslegung im Tongestein Opalinuston in Abhängigkeit des geothermischen Gradienten

Beispiel von Simulationsergebnissen für eine vorläufige Endlagerauslegung im Tongestein Opalinuston

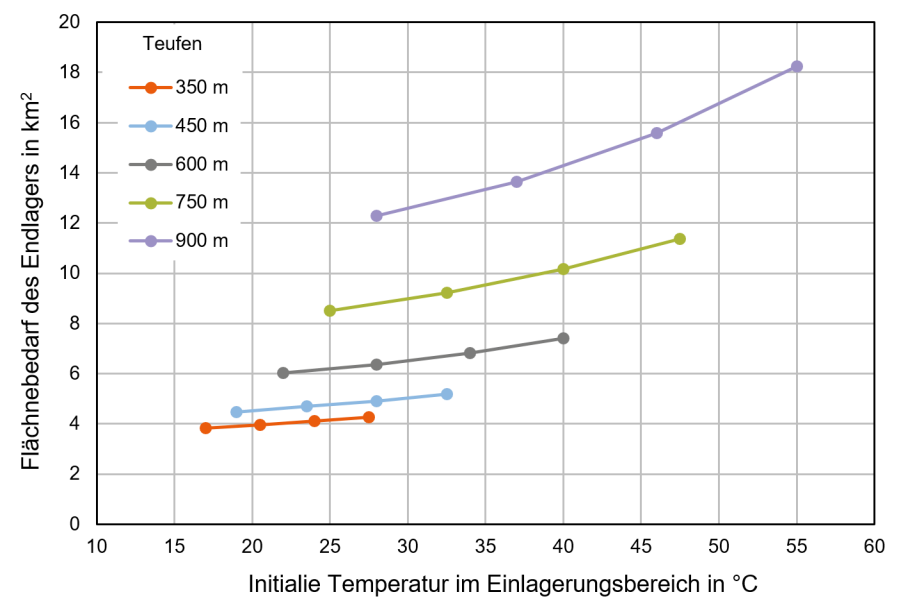


Abbildung 54: Prognostizierter Endlagerflächenbedarf für eine vorläufige Endlagerauslegung im Tongestein Opalinuston in Abhängigkeit der initialen Temperatur im Einlagerungsbereich

Beispiel 28: Beispiel von Simulationsergebnissen für eine vorläufige Endlagerauslegung im Steinsalz (steile Lagerung)

Beispiel von Simulationsergebnissen für eine vorläufige Endlagerauslegung im Steinsalz (steile Lagerung)

Die prognostizierten Endlagerflächenbedarfe für eine vorläufige Endlagerauslegung im Steinsalz sind analog in Abbildung 55 und Abbildung 56 dargestellt. Die prognostizierten Flächenbedarfe sind bei gleicher Teufe und geothermischen Gradienten deutlich geringer als im Tongestein. Dies resultiert zum einen aus den für den Wärmetransport günstigeren thermophysikalischen Materialeigenschaften des Steinsalzes. Zum anderen besteht ein wichtiger Unterschied darin, dass der pro Endlagerbehälter benötigte Flächenbedarf für eine vorläufige Endlagerauslegung im Steinsalz über die Teufe als konstant angenommen wird (keine Teufenabhängigkeit der Streckenabstände), wohingegen dieser Wert im Tongestein auf Grund der gebirgsmechanischen Auslegung mit steigender Teufe zunimmt.

Beispiel von Simulationsergebnissen für eine vorläufige Endlagerauslegung im Steinsalz (steile Lagerung)

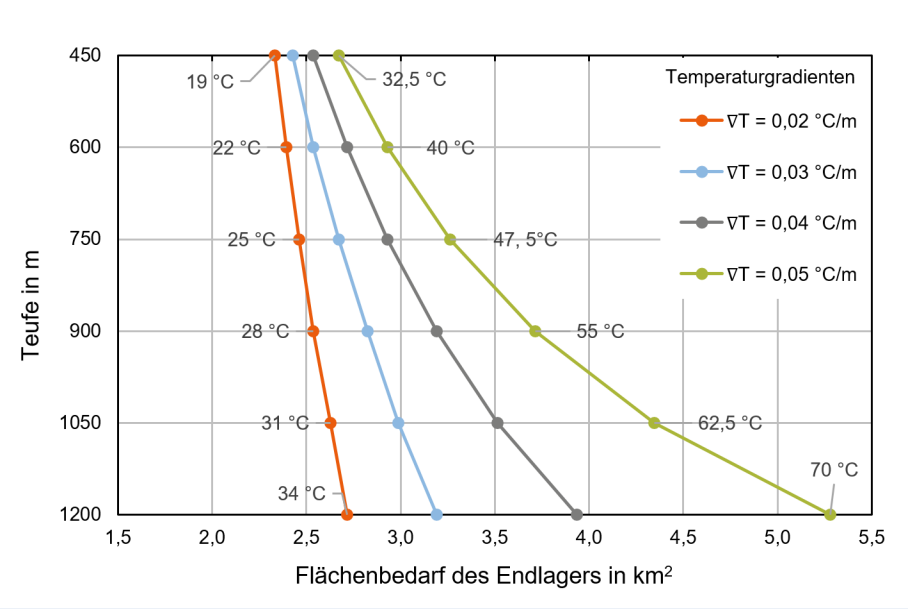


Abbildung 55: Prognostizierter Endlagerflächenbedarf für eine vorläufige Endlagerauslegung im Steinsalz (steile Lagerung) in Abhängigkeit des geothermischen Gradienten

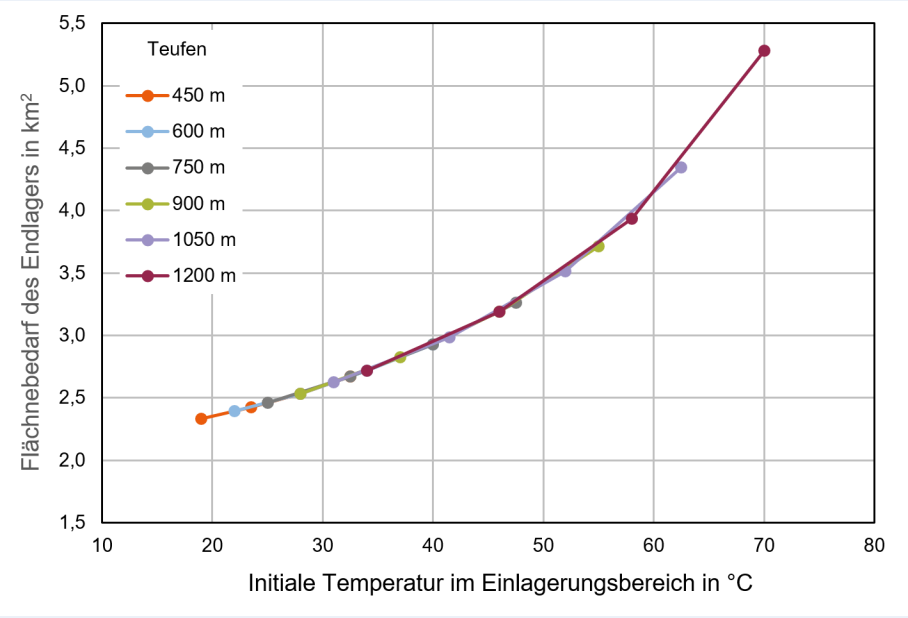


Abbildung 56: Prognostizierter Endlagerflächenbedarf für eine vorläufige Endlagerauslegung im Steinsalz (steile Lagerung) in Abhängigkeit der initialen Temperatur im Einlagerungsbereich

Insgesamt betrachtet resultiert aus der Anwendung der vorgestellten Methodik eine vorläufige Prognose der benötigten Endlagerflächen. Diese Prognose soll jedoch als Orientierungswert und weniger als ein exakter Flächenbedarf für das finale Endlager verstanden werden. Dies wird zum Beispiel durch die eingeschränkte Detailtiefe der vorläufigen Endlagerauslegung, dem aktuell noch eingeschränkten Kenntnisstand bezüglich der geologischen Verhältnisse, sowie den Vereinfachungen in den Simulationsmodellen bedingt.

4.2.9 Optimierung des Endlagersystems gemäß § 12 EndlSiAnfV

In § 6 Abs. 3 EndlSiUntV wird gefordert, in *„jeder vorläufigen Sicherheitsuntersuchung […] das Endlagersystem entsprechend § 12 der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung zu optimieren. Es ist darzustellen, welche Optimierungsmaßnahmen in die vorläufige Auslegung des Endlagers im jeweils aktuellen Stand eingegangen sind.“* Über die damit ableitbare Weiterentwicklung der Endlagerauslegung in den aufeinander aufbauenden Sicherheitsuntersuchungen hinaus, führt die Begründung (BT-Drs. 19/19291) zu § 6 Abs. 3 EndlSiUntV aus: „*Die konkrete Darstellung der jeweils vorgenommenen Optimierungsmaßnahmen dient auch der Vergleichbarkeit der einzelnen repräsentativen […] vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen untereinander: nur so kann transparent nachvollzogen werden, inwieweit beim Vergleich von Teilgebieten [...] erkannte Sicherheitsvor- oder -nachteile tatsächlich intrinsisch vorhanden sind und welche lediglich aus unterschiedlich ausgeschöpftem Optimierungspotenzial resultieren.“*

Gemäß § 12 Abs. 1 EndlSiAnfV sind das „*Sicherheitskonzept und die technische Auslegung des Endlagers […] unter Berücksichtigung aller Umstände des Einzelfalls und unter Beachtung der Ausgewogenheit der Maßnahmen zur Erreichung*“ der Ziele Langzeitsicherheit und Betriebssicherheit zu optimieren. Die Optimierung endet gemäß § 12 Abs. 2 EndlSiAnfV „*wenn eine weitere Verbesserung der Sicherheit nur mit unverhältnismäßig hohem Aufwand erreicht werden kann.“* Auch um dies transparent darzustellen, sind die durchgeführten Optimierungen bzw. Aufwände für eine weitere Verbesserung nachvollziehbar zu dokumentieren. Bei der Optimierung sind vorranging die zu erwartenden Entwicklungen zu berücksichtigen, die abweichenden und hypothetischen Entwicklungen sind nachrangig in dieser genannten Reihenfolge hinzuzuziehen (§ 12 Abs. 3 EndlSiAnfV). Die Optimierungen der nachrangig genannten Entwicklungen dürfen die Sicherheit der Maßnahmen der jeweils vorrangigen Entwicklung nicht erheblich beeinträchtigen.

Die Verordnung priorisiert weder die Optimierung hinsichtlich der Betriebssicherheit noch der Langzeitsicherheit, beides ist gleichrangig zu berücksichtigen. Dies könnte allerdings zu Konflikten führen, da die Optimierung der Betriebs- bzw. der Langzeitsicherheit die jeweils andere Sicherheit (nachteilig) beeinflussen könnte. Dies ist bei den zukünftigen Arbeiten zu berücksichtigen und im Einzelfall begründet zu priorisieren.

Auch im Diskussionspapier „Standortauswahl“ der ESK mit Stand vom 18.02.2021 (ESK 2021) wird u. a. diskutiert, dass die Optimierung in „*Analogie zum Strahlenschutz*“ möglichst umfassend und unter Berücksichtigung des Einzelfalls abzuwägen sei. Dabei sei zu klären:

- „welcher Grad an Optimierung (Sicherheitsgewinn) im Verfahren effektiv erreicht wird,

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

- ob neben der Optimierung in einem Bereich auch Nachteile in anderen Bereichen verursacht werden,
- in welchem Maße die Optimierung einen Bereich weit unterhalb gesetzlicher Anforderungen betrifft,
- ob mit der Optimierung ggf. Personendosen des Betriebspersonals (z. B. aufgrund der Konditionierung und/oder Einlagerung) hypothetischen Dosen der Bevölkerung in ferner Zukunft (aufgrund möglicher Freisetzung aus dem Endlager) gegenübergestellt werden und
- welche zusätzlichen Risiken und Kosten damit verbunden sind."

Dem Aufwand der einzelnen Optimierungsmaßnahmen sei demnach der Sicherheitsgewinn gegenüberzustellen, um *„sicherzustellen, dass die Optimierung der Sicherheit an richtiger Stelle und zum richtigen Zeitpunkt erfolgt".* Weiterhin sieht die ESK ebenfalls die oben angesprochenen möglichen Zielkonflikte bei der Optimierung hinsichtlich Betriebs- und Langzeitsicherheit und spricht sich für eine Klärung der Prioritäten aus.

Anders als in der wvSU und der uvSU kann die Optimierung der Endlagerauslegung im Rahmen der rvSU nicht auf vorhergehenden Sicherheitsuntersuchungen des Untersuchungsraums/Teiluntersuchungsraums aufbauen. Daher wird innerhalb der rvSU nicht die Verbesserung der Endlagerauslegung gegenüber einem vorhergehenden Verfahrensstand als Optimierung verstanden, sondern die initiale, möglichst vorteilhafte Konfiguration des Endlagersystems gemäß Zielsetzungen Betriebssicherheit und Langzeitsicherheit aus § 12 EndlSiAnfV. In vielen Fällen werden dabei Entscheidungsprozesse mit zahlreichen Alternativen und der anschließenden Wahl einer Vorzugsvariante vorangehen.

Aufgrund der möglicherweise begrenzten Kenntnisse zu Beginn der rvSU sind hier für die vorläufige Endlagerauslegung zunächst Annahmen zu treffen und darauf aufbauend die Sicherheitsuntersuchungen durchzuführen. Gemäß § 6 Abs. 4 EndlSiUntV *„ist ein Zweck […], das jeweils zu Grunde gelegte vorläufige Sicherheitskonzept und die vorläufige Auslegung des Endlagers zu überprüfen und Optimierungspotenzial zu identifizieren. Dieses kann dann in späteren Verfahrensschritten entsprechend Absatz 1 in Verbindung mit § 4 Absatz 3 [EndlSiUntV] umgesetzt werden"* (Begründung (BT-Drs. 19/19291) zu § 6 Abs. 4 EndlSiUntV, Unterstreichung hinzugefügt). Demnach müssen die Annahmen zu einem späteren Zeitpunkt und aufbauend auf weiteren Erkenntnissen in einer weiterentwickelten Sicherheitsuntersuchung neu bewertet und gegebenenfalls angepasst werden, um eine weitere Optimierung zu erreichen. Die dazu notwendigen Informationen können z. B. aus zusätzlich gewonnenen Daten durch die übertägige / untertägige Erkundung, des fortschreitenden Standes von Wissenschaft und Technik oder auch des regulatorischen Rahmens stammen. Aus dem Informationsgewinn und der Anpassung entsteht so bereits vor dem Standortentscheid eine schrittweise Optimierung, die ausgehend von der rvSU in der wvSU und schließlich in der uvSU durchgeführt wird.

Im Rahmen der rvSU sind somit folgende grundsätzliche Arbeiten zur Optimierung notwendig: Die Endlagerauslegung wird möglichst vorteilhaft bezüglich der Optimierungsziele Betriebssicherheit und Langzeitsicherheit gewählt und dargestellt.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

4.2.10 Endlagerauslegung im Untersuchungsraum bzw. Teiluntersuchungsraum

Für Teil 2 der Methodik, also die (teil-)untersuchungsraumspezifische vorläufige Auslegung des Endlagers, wird die wirtsgesteinsspezifische Endlagerauslegung auf die jeweiligen Untersuchungsräume bzw. Teiluntersuchungsräume übertragen. Dadurch erfolgt in der Regel keine umfangreiche Anpassung der vorläufigen Endlagerauslegung. Lediglich die Beschreibung der wesentlichen und weiteren Barrieren auf Grundlage von ortsspezifische Informationen zu den geologischen Barrieren des Endlagersystems wird konkretisiert, vgl. Abbildung 16. Die Informationen werden in den jeweiligen Geosynthesen der Untersuchungsräume bzw. Teiluntersuchungsräume zusammengestellt (siehe Kapitel 5.7) Dazu zählen insbesondere die räumliche Erstreckung der wesentlichen Barriere sowie Informationen zu dessen Eigenschaften, mit denen die wirtsgesteinsspezifische Beschreibung der wesentlichen Barriere detailliert wird. Zudem wird die Beschreibung der weiteren Barrieren aufgrund von ortsspezifischen Kenntnissen zum Wirtsgestein außerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs sowie zum Deck- und Nebengebirge konkretisiert.

Falls es erforderlich sein sollte, wird für die rvSU auf Basis ortsspezifischer Informationen zur horizontalen und vertikalen Ausdehnung des Wirtsgesteinsbereichs mit Barrierefunktion zudem im Rahmen einer Optimierung festgelegt, ob die Streckenlagerung auf ein oder zwei Einlagerungssohlen realisiert wird, vgl. Kapitel 4.2.5.

Für die anschließende Ermittlung des (teil-)untersuchungsraumspezifischen Flächenbedarfs eines möglichen Endlagerbergwerks wird auf Basis der im Rahmen der Geosynthese der Untersuchungsräume bzw. Teiluntersuchungsräume gewonnenen Informationen zum Teufenbereich des jeweiligen Wirtsgesteins und zur zugehörigen initialen Temperatur im Einlagerungsbereich der (teil-)untersuchungsraumspezifische Flächenbedarf ermittelt (vgl. Abbildung 16). Dieser ermittelte Flächenbedarf bildet eine Grundlage für die gemäß § 7 EndlSiUntV durchzuführenden Bewertungen im Rahmen der Analyse des geplanten Endlagersystems (vgl. Kapitel 8.6.3).

In Beispiel 29 und Beispiel 30 werden dreidimensionale Visualisierungen der untersuchungsraumspezifischen Endlagerplanung in den Teilgebieten 001_00TG_032_01IG_T_f_jmOPT (Opalinuston) und 035_00TG_057_00IG_S_s_z (Bahlburg) vorgestellt.

Beispiel 29: Beispielhafte Visualisierung der Endlagerauslegung im Teilgebiet 001_00TG_032_01IG_T_f_jmOPT (Opalinuston)

Beispielhafte Visualisierung der Endlagerauslegung im Teilgebiet 001_00TG_032_01IG_T_f_jmOPT (Opalinuston)

Anhand der bekannten geologischen Daten des Untersuchungsraums ließ sich in einem CAD Programm eine beispielhafte vorläufige Endlagerauslegung im Opalinuston visualisieren (Abbildung 57). Die farblich markierten Schichten des Gebirges stellen die Teufelsloch-Subformation, in der das Endlager in einer Teufe von 683 m liegt, sowie die Schichten des Deck- und Nebengebirges dar. Die blauen Markierungen im Endlagerbergwerk stellen die voraussichtlichen Positionen der Verschlussbauwerke in den Richtstrecken und Schächten dar.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

Beispielhafte Visualisierung der Endlagerauslegung im Teilgebiet 001_00TG_032_01IG_T_f_jmOPT (Opalinuston)

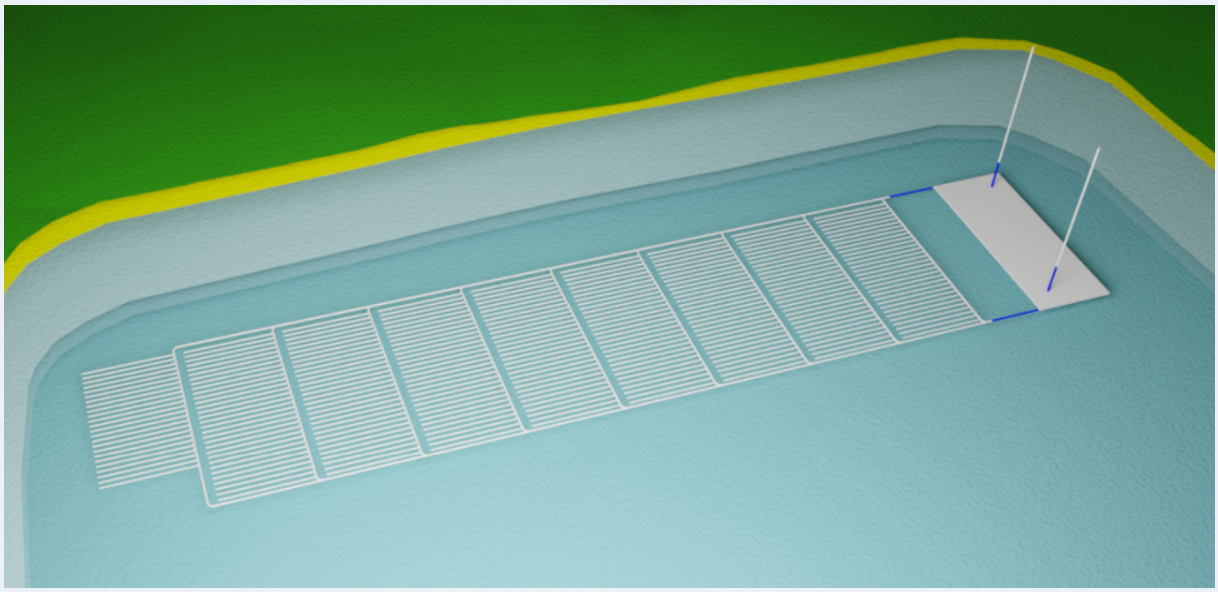


Abbildung 57: Beispielhafte Visualisierung der Endlagerauslegung im Teilgebiet 001_00TG_032_01IG_T_f_jmOPT (Opalinuston) in Nahaufnahme

Beispiel 30: Beispielhafte Visualisierung der Endlagerauslegung im Teilgebiet 035_00TG_057_00IG_S_s_z (Bahlburg)

Beispielhafte Visualisierung der Endlagerauslegung im Teilgebiet 035_00TG_057_00IG_S_s_z (Bahlburg)

Anhand der bekannten geologischen Daten des Untersuchungsraums ließ sich in einem CAD Programm eine beispielhafte vorläufige Endlagerauslegung im Opalinuston visualisieren (Abbildung 58). Der in Lila eingefärbte Körper stellt den Salzstock dar, in der das Endlager in einer Teufe von ca. 850 m liegt. Die darüber liegenden eingefärbten Schichten stellen das Deck- und Nebengebirge dar. Abbildung 59 zeigt das gleiche Endlager aus der Nähe. Die grünen Markierungen im Endlagerbergwerk stellen die voraussichtlichen Positionen der Verschlussbauwerke in den Richtstrecken und Schächten dar.

Beispielhafte Visualisierung der Endlagerauslegung im Teilgebiet 035_00TG_057_00IG_S_s_z (Bahlburg)

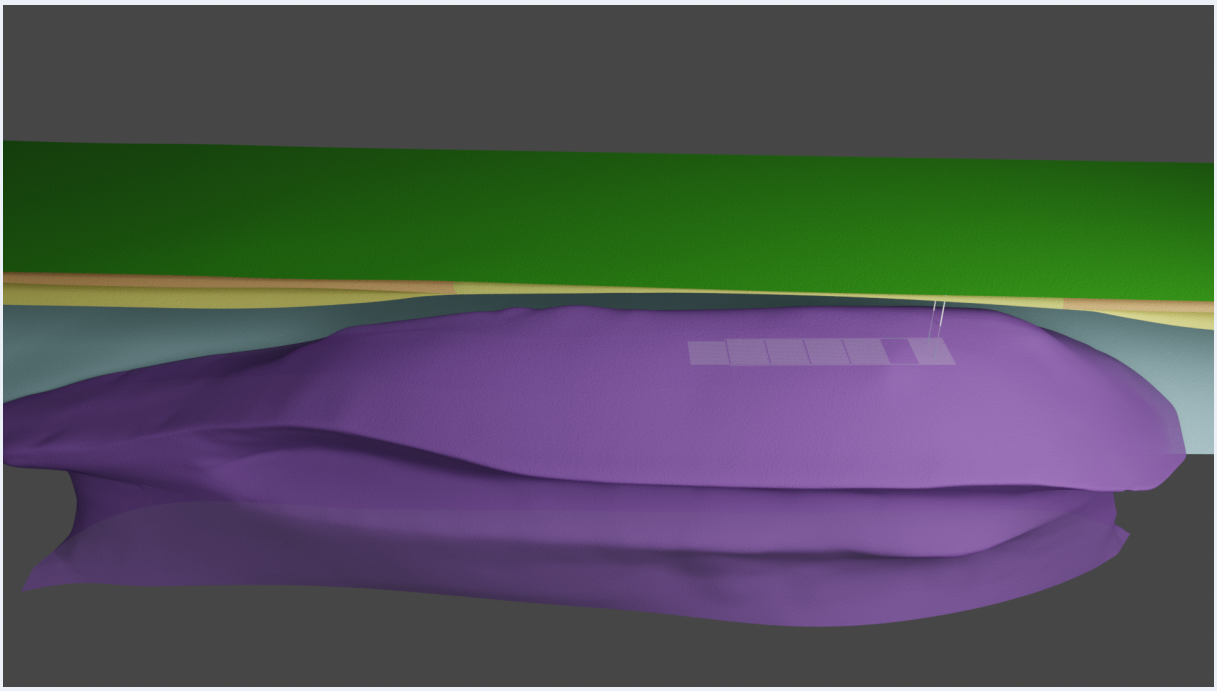


Abbildung 58: Beispielhafte Visualisierung der Endlagerauslegung im Teilgebiet 035_00TG_057_00IG_S_s_z (Bahlburg) mit Ansicht des Salzstocks

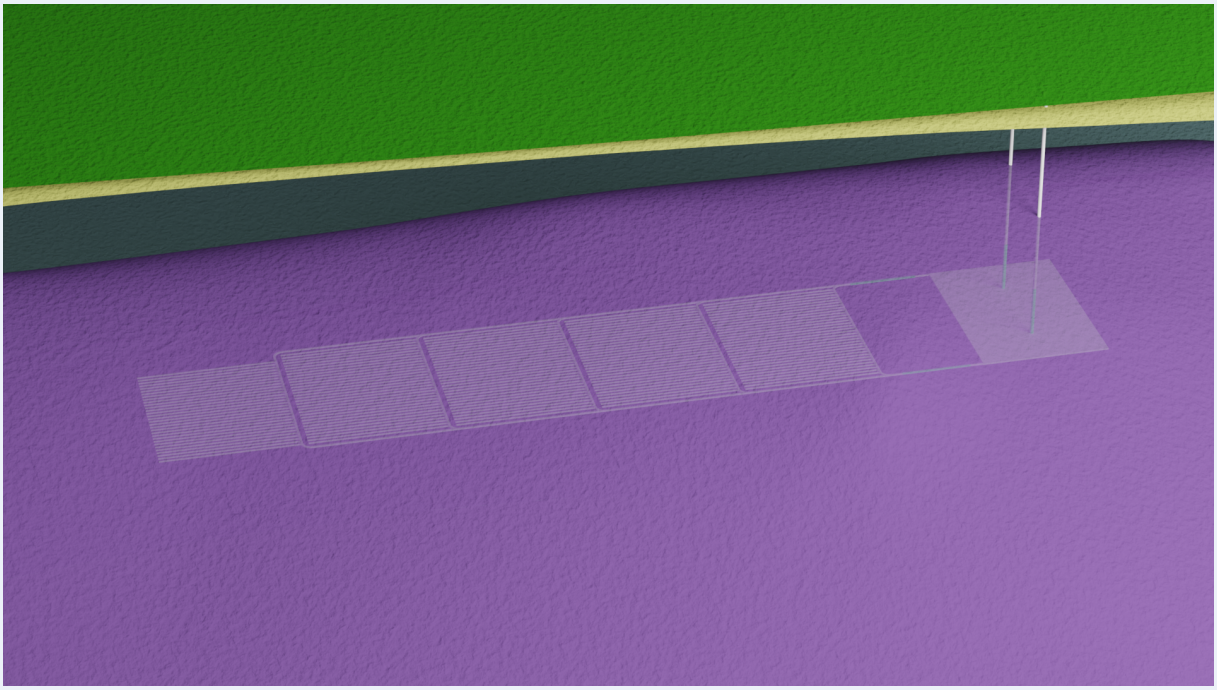


Abbildung 59: Beispielhafte Visualisierung der Endlagerauslegung im Teilgebiet 035_00TG_057_00IG_S_s_z (Bahlburg) in Nahaufnahme

5 Geosynthese (§ 5 EndlSiUntV)

Im Zuge der Durchführung der rvSU gemäß § 5 Abs. 2 EndlSiUntV muss für jeden Untersuchungsraum eine Geosynthese erstellt werden (vgl. Abbildung 60), in der die geowissenschaftlichen Informationen, die zur Bewertung der Sicherheit notwendig sind, interpretiert und dokumentiert werden. Eine Geosynthese wird jeweils für einen Untersuchungsraum erstellt.

„*Die Geosynthese enthält die Dokumentation und Interpretation aller geowissenschaftlichen Informationen zu einem Untersuchungsraum. Ziel der Geosynthese ist eine konsistente Darstellung insbesondere der für die Sicherheit des Endlagers relevanten geowissenschaftlichen Gegebenheiten. Der Umfang der dokumentierten geowissenschaftlichen Informationen muss das für die jeweilige vorläufige Sicherheitsuntersuchung erforderliche Maß abdecken.*“ (§ 5 Abs. 2 EndlSiUntV)

In der Geosynthese werden alle geowissenschaftlichen Grundlagen und Interpretationen der geologischen Verhältnisse erfasst, die für die Beurteilung der Langzeitsicherheit des Endlagers für hochradioaktive Abfälle notwendig sind. Dazu werden in diesem Verfahrensschritt (§ 14 StandAG, Schritt 2 der Phase I), so wie bei den Arbeiten für den Zwischenbericht Teilgebiete, bestehende Datensätze genutzt. Die Geosynthese kann auch die geologische Entwicklungsgeschichte eines Untersuchungsraums beinhalten sowie sämtliche relevanten (geogenen) Prozesse beschreiben, welche den einschlusswirksamen Gebirgsbereich sowie die Langzeitsicherheit des Endlagers beeinflussen können. Eine Neuerfassung von Geodaten ist erst in Phase II des Standortauswahlverfahrens in den Standortregionen für die übertägige Erkundung vorgesehen (siehe § 16 StandAG).

Die für die Erstellung einer Geosynthese benötigten geowissenschaftliche Daten werden der BGE im Rahmen von Datenabfragen in erster Linie von den Staatlichen Geologischen Diensten (SGD) bereitgestellt. Dies sind z. B. Bohrungsinformationen, geologische Karten, bohrlochgeophysikalische sowie reflexionsseismische Messungen und geologische 3D-Modelle. Weiterhin fließen Informationen aus der Fachliteratur in die Auswertung ein.

Für die Beschreibung des Wirtsgesteinsbereiches mit Barrierefunktion in der Geosynthese sollen nach Möglichkeit gebietsspezifische Informationen verwendet werden, also Daten die einen unmittelbaren Bezug zum Untersuchungsraum aufweisen. Für die geowissenschaftliche Bewertung in Schritt 2 der Phase I ist es dennoch stellenweise weiterhin notwendig, Daten einzubeziehen, die sich außerhalb der jeweiligen Untersuchungsräume befinden aber dennoch eine geowissenschaftliche Relevanz für den Untersuchungsraum haben.

Die Bearbeitungstiefe eines Gebietes in der Geosynthese ist mit den Arbeitsschritten der rvSU gekoppelt. Im Verlauf der rvSU kann der Detailgrad der einzelnen Geosynthesen je nach Kenntnisstand und je nach Eignung als mögliche Standortregion zwischen den jeweiligen Untersuchungsräumen variieren. Für die technischen Arbeiten wird ein Untersuchungsraum in Teiluntersuchungsräume untergliedert, deren geologische Gegebenheiten Teiluntersuchungsraum-spezifisch betrachtet und dargelegt werden.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

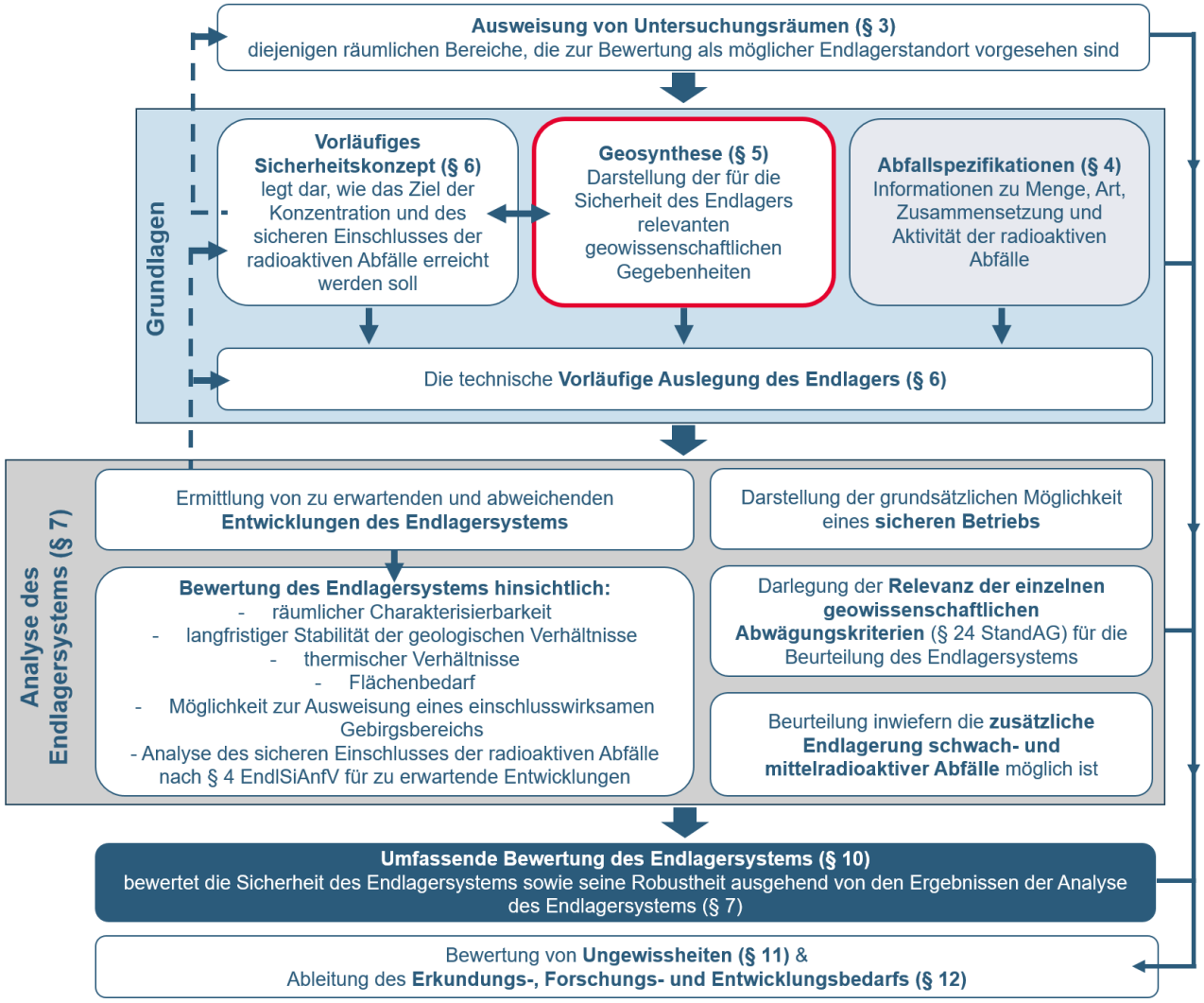


Abbildung 60: Schematische Darstellung des Ablaufs der rvSU gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung.
Der in diesem Kapitel erläuterte Schritt der Geosynthese ist rot umrandet dargestellt.

Die Arbeitsschritte, die im Rahmen der Geosynthese stattfinden, sind in den prozessualen Ablauf der rvSU eingebettet (siehe Kapitel 1.2.1). Der Ablauf der rvSU, also die Reihenfolge der vorgegebenen Arbeitsschritte, folgt nicht einer Abfolge von Geosynthese nach § 5 EndlSiUntV, Analyse des Endlagersystems gemäß § 7 EndlSiUntV und umfassender Bewertung gemäß § 10 EndlSiUntV, sondern einem Ansatz, bei dem der Detailgrad in der Erarbeitung der geowissenschaftlichen Grundlagen, der darauf aufbauenden Analyse und Bewertung des Endlagersystems erhöht wird. Dadurch ergeben sich im Rahmen der Geosynthese Arbeitsschritte, die sowohl räumlich als auch von der Arbeitstiefe immer detaillierter werden. Zum Beispiel sind Bereiche eines Untersuchungsraums, bei denen im Rahmen der Arbeiten der Geosynthese früh festgestellt wird, dass eine Mindestanforderung nicht erfüllt ist, von der weiteren Bearbeitung ausgeschlossen.

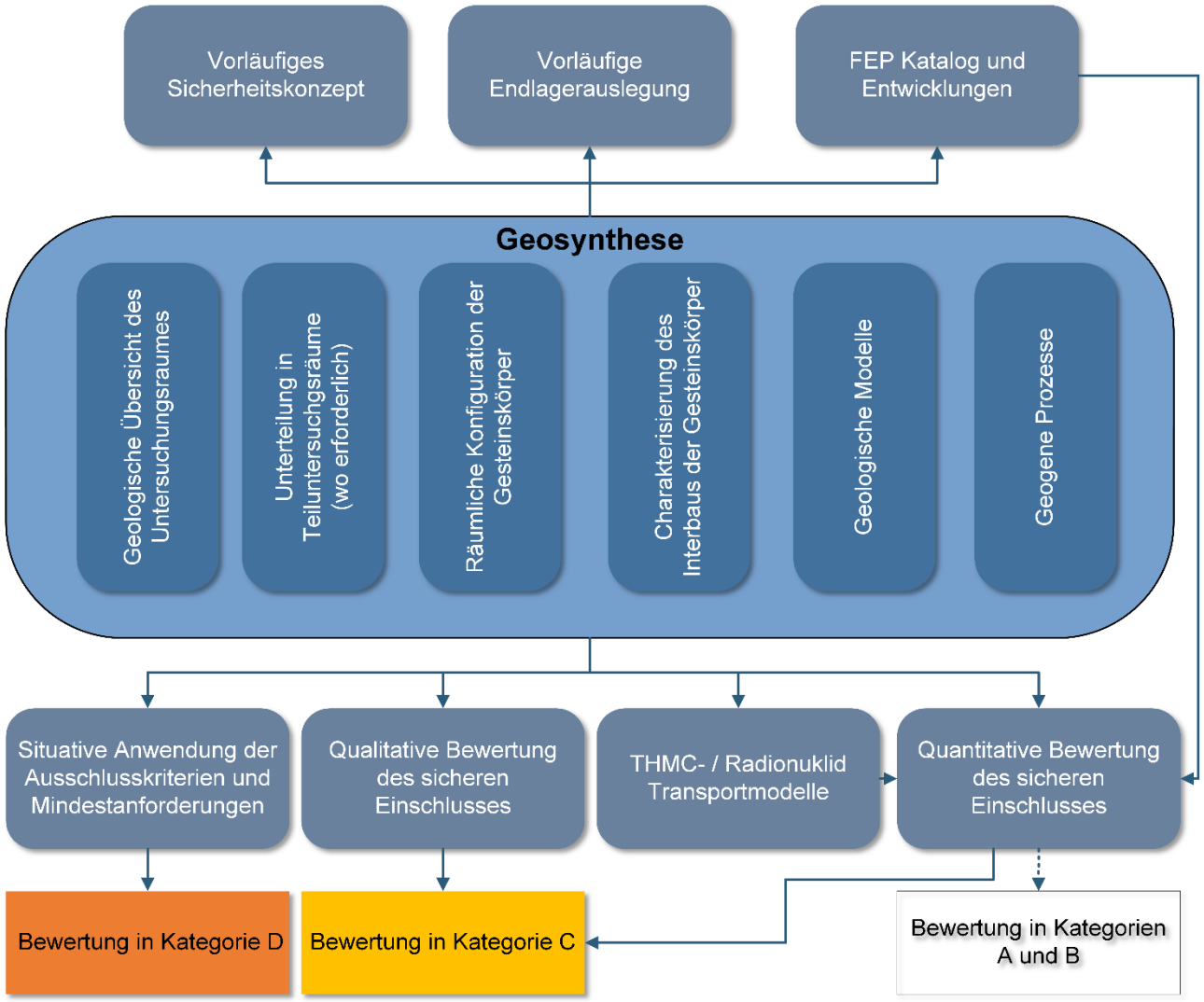


Abbildung 61: Übersicht über die übergeordneten Arbeitsschritte und vorläufigen Ergebnisse der Geosynthese (innerhalb des mit „Geosynthese“ markierten Kastens) sowie deren weiterer Verwendung innerhalb der rvSU.
Die Pfeile markieren in diesem Fall keine zeitliche Abfolge.Die Erhöhung des Detailgrades erfolgt parallel zu den Arbeiten in der Analyse des Endlagersystems und den Prüfschritten D bis A. Die Einordnung in die Kategorien A und B verläuft über den sicherheitsgerichteten Diskurs (gestrichelter Pfeil).

Die Geosynthese beinhaltet die Charakterisierung und Interpretation sowohl des Wirtsgesteinsbereichs mit Barrierefunktion als auch der Gesteinsformationen im Deck- und Nebengebirge. Die Hauptinterpretationsschritte der Geosynthese können wie folgt zusammengefasst werden (die hier genannte Schritte finden sich größtenteils in den Unterkapiteln wieder, siehe auch Abbildung 61):

- Geologische Übersicht des Untersuchungsraums.
- Wo erforderlich, Unterteilung des Untersuchungsraums in Teiluntersuchungsräume (siehe Kapitel 5.7).
- Interpretation der räumlichen Konfiguration und Geometrie der Gesteinskörper (z. B. Teufe, Mächtigkeit, Ausdehnung, Form)(siehe Kapitel 5.7.1).
- Interpretation und Charakterisierung des Internbaus der Gesteinskörper (z. B. Fazies, Lithologie) (siehe Kapitel 5.7.3).
- Zusammenfassung aller für die Sicherheit des Endlagers relevanten geogenen Prozesse, die in der geowissenschaftlichen Langzeitprognose ausgearbeitet werden (siehe Kapitel 5.7.5).
- Das Erstellen geologischer Modelle (z. B. repräsentative Profile, konzeptionelle, oder parametrisierte 1D-, 2D-, oder 3D-Modelle). Die Modelle sind, nach Bedarf, unterschiedlich detailliert. Die parametrisierten geologischen Modelle dienen, unter anderem, als Input für die numerischen Transportmodelle. Entsprechend wird in der Geosynthese dieser Input für die Transportparameter (z. B. Gebirgsdurchlässigkeit, Diffusionskoeffizienten etc.) dokumentiert (siehe Kapitel 5.7.6)

Die im Rahmen der Geosynthese erarbeiteten Interpretationen und Modelle dienen als Eingangsgröße für die sicherheitsgerichtete Analyse des Endlagersystems und weitere Ausarbeitungen innerhalb der rvSU (siehe Abbildung 60). Diese beinhalten das vorläufige Sicherheitskonzept, die vorläufige Endlagerauslegung, den FEP-Katalog und die numerischen Transportmodelle. Gleichzeitig liefert die Geosynthese die geowissenschaftlichen Informationen für die gestaffelten Prüfschritte, wodurch Gebiete (Untersuchungsraum, Teiluntersuchungsraum oder Bereiche innerhalb eines Teiluntersuchungsraums) bewertet werden sollen: Prüfschritt der zielgerichteten Anwendung der Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen (mögliche Bewertung in Kategorie D), Prüfschritt zur qualitativen Bewertung des sicheren Einschlusses (mögliche Bewertung in Kategorie C) und Prüfschritt zur quantitativen Bewertung des sicheren Einschlusses (mögliche Bewertung in Kategorie C oder Einordnung in Kategorien A/B mit Hilfe des Prüfschrittes „sicherheitsgerichteter Diskurs“), vgl. Abbildung 61.

Initial liegt der Fokus der Geosynthese auf den Informationen, die zur Charakterisierung und Bewertung des Wirtsgesteinsbereiches mit Barrierefunktion notwendig sind. Wenn die Bewertung (z. B. in den Prüfschritten zu den Kategorien D und C – siehe Abbildung 60, Kapitel 1 und Kapitel 1.2.1) negativ ausfällt, wird das entsprechende Gebiet (Untersuchungsraum, Teiluntersuchungsraum oder Bereich innerhalb eines Teiluntersuchungsraums) nicht weiterbearbeitet. Arbeitsschritte, die für die quantitative Analyse des Endlagersystems notwendig sind, werden nur für Gebiete mit positiver Bewertung durchgeführt (z. B. Interpretation des Deck- und Nebengebirges, numerische Modellierung).

Die Methodenbeschreibungen der rvSU werden, wie im rvSU-Konzept (BGE 2022a) beschrieben, für ein Endlagersystem Typ 1 (der sichere Einschluss wird durch den einschlusswirksamen Gebirgsbereich gewährleistet) dargestellt. Dementsprechend beziehen sich die Arbeitsschritte der Geosyn-

these auf ein Endlagersystem Typ 1. Dabei wird bis zur genauen räumlichen Festlegung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs in den rvSU der Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion bewertet, der einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich aufnehmen könnte.

Im kristallinen Wirtsgestein wird, sofern kein Endlagersystem Typ 1 zu Grunde gelegt werden kann, im Rahmen der rvSU auch ein vorläufiges Sicherheitskonzept mit dem Endlagersystem Typ 2, bei dem der sichere Einschluss durch technische und geotechnische Barrieren erreicht wird, untersucht werden. Der Umgang mit den vorläufigen Sicherheitskonzepten im kristallinen Wirtsgestein wird im rvSU-Konzept (BGE 2022a, Kapitel 8.3.1) näher erläutert.

5.1 Umgang mit heterogener Datenlage

Die GzME wurden unter anderem danach ausgewählt, dass innerhalb der Gebiete die Datendichte ungleich verteilt ist. Bei der geowissenschaftlichen Charakterisierung des Untergrundes ist der Umgang mit heterogenen Datenlagen und den daraus folgenden Ungewissheiten nichts Ungewöhnliches und eher die Regel. Generell unterscheidet man zwischen epistemischen und aleatorische Ungewissheiten (z. B. Der Kiureghian & Ditlevsen 2009) (siehe Kapitel 10). Im Rahmen von geologischen Modellen und Modellvorstellungen decken epistemische Ungewissheiten solche Punkte ab, die bei ausreichenden Informationen und sehr hoher Datendichte prinzipiell erfasst werden könnten (z. B. Ungewissheiten in Bezug auf Mächtigkeitsvariationen oder Tiefenlage von geologischen Einheiten). Um aleatorische Ungewissheiten im Modell darzustellen, sind statistische Methoden notwendig (z. B. Wellmann & Caumon 2018). Solche Ungewissheiten betreffen beispielsweise kleinräumige Änderungen der Gesteinseigenschaften aufgrund der natürlichen Entstehungs- und Entwicklungsgeschichte des Gesteins.

Im Rahmen der Methodenentwicklung wird getestet, inwiefern mit einer heterogenen Datenlage und den daraus resultierenden epistemischen Ungewissheiten methodisch umgegangen werden kann.

In den folgenden Kapiteln wird ein Workflow samt Beispielen vorgestellt, der zeigt, wie in Zukunft mit einer heterogenen Datenlage umgegangen werden könnte. Dieser Workflow wurde parallel zum rvSU-Konzept (BGE 2022a) und den Methoden der Geosynthese entwickelt und wurde noch nicht systematisch angewendet. Es handelt sich demnach um einen aktuellen Arbeitsstand, auf den in den folgenden Kapiteln (Kapitel 5.5 ff.) noch nicht weiter eingegangen wird.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

Im Wesentlichen folgt dieser Workflow zum Umgang mit einer heterogenen Datenlage folgenden Schritten (Abbildung 62):

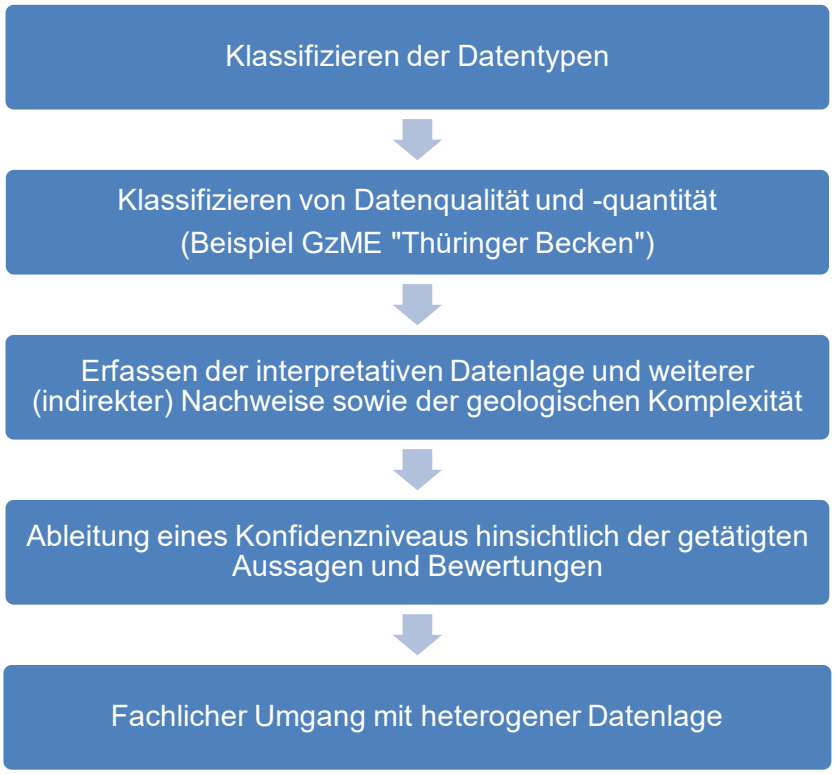


Abbildung 62: Schematische Darstellung des Workflows zum Umgang mit einer heterogenen Datenlage

5.1.1 Datentypen und ihre geologische Aussagefähigkeit

Wie oben aufgeführt, ist bei geowissenschaftlichen Auswertungen und Interpretationen des Untergrundes der Umgang mit epistemischen Ungewissheiten gängige Praxis. Für eine systematische Betrachtung und Bewertung der Datenlage muss man sich zunächst die mit verschiedenen Datentypen verbundene geologische Aussagekraft vergegenwärtigen:

1. Direkte Nachweise
2. Indirekte Nachweise
3. Zusätzliche, interpretative Nachweise

Direkte Nachweise und Informationen zur geologischen Situation liegen zumeist in Form von Bohrungsdaten sowie (wo vorhanden) über Bergwerke vor. Bei Bohrungsdaten in Form von Schichtbeschreibungen und Bohrkernen handelt es sich um punktuelle, hochauflösende Nachweise. Sie liefern sehr lokal genaue Informationen zur Gesteinsabfolge im Untergrund, wobei, je nach Verwendungszweck der Bohrung, auch diese Informationen unterschiedliche Qualität aufweisen können.

Indirekte Nachweise zur geologischen Situation stammen aus der geophysikalischen Erkundung. Diese sind oft flächendeckend (oder in 2D-Profilen) und besitzen im Vergleich zu Bohrungen eine geringere Auflösung. Erkundungsergebnisse aus z. B. Reflexionsseismik (2D und 3D), Gravimetrie,

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

Magnetik oder Geoelektrik liefern je nach Methode indirekte Informationen über den Untergrundaufbau, indem sie Gesteinskörpergeometrien und damit die Lagerungsverhältnisse abbilden und Störungszonen darstellen können. Bohrlochgeophysikalische Messungen können sehr lokal um die Bohrung herum hochauflösende Hinweise zur Art und Beschaffenheit des Untergrundes liefern. Alle diese indirekten Daten weisen stets einen gewissen Interpretationsanteil auf.

Zu den zusätzlichen, interpretativen Nachweisen zählen alle anderen Informationen und Datentypen, die zu einem besseren Verständnis des Untergrundaufbaus in einem Gebiet beitragen können. Dazu gehören alle interpretierten Daten, wie 3DModelle, Profilschnitte, Fazieskarten, etc., aber auch Studien, Ausarbeitungen, regionalgeologische Expertise zu einem bestimmten Gebiet sowie geologische Karten. Oberflächenkartierungen orientieren sich an Aufschlüssen (Straßenanschnitte, Steinbrüche etc.), Lesesteinen, Bodenfarben und morphologischen Merkmalen, welche aber durch die Vegetation und die anthropogene Nutzung über weite Flächen nur eingeschränkt verfügbar sind. Somit sind auch geologische Kartierungen, obwohl sie auf direkten Informationen beruhen, im Wesentlichen eine Interpretation von lokalen Daten und deren Extrapolation. Diese zusätzlichen und interpretativen Daten sind von großem Wert speziell auch für die Endlagersuche, da sie bereits eine Interpretation der vorhandenen direkten und indirekten Daten beinhalten. Solche Daten liegen für weite Bereiche von Deutschland vor.

Die Erstellung von geologischen 3D-Modellen, Profilschnitten und Karten basiert zum Großteil auf geowissenschaftlichen Interpretationen der vorliegenden direkten und indirekten Nachweise, deren Inter- und Extrapolation sowie auf Analogieschlüssen. Ein 3D-Modell, ein Profilschnitt oder auch eine Karte kann daher immer nur so gut sein wie die jeweilige Datengrundlage. Generell gilt, dass mit dem Umfang der Datenlage der Detailgrad zunimmt, mit dem der Untergrund charakterisiert werden kann. Die methodische Entwicklung eines Umgangs mit einer heterogenen Datenlage im Rahmen der Standortauswahl impliziert folglich auch gleichzeitig den Umgang mit epistemischen Ungewissheiten im geologischen Kontext.

Für die Bewertung einer generellen Plausibilität von geologischen Modellen und darüber hinaus hat die BGE das Verbundvorhaben *GeoBlocks* (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), RWTH Aachen, University of Aberdeen) initialisiert, welches Teil des Forschungsclusters „Ungewissheiten und Robustheit mit Blick auf die Sicherheit eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle“ ist und eines der insgesamt fünf Themenfelder des Clusters abdeckt. In *GeoBlocks* geht es darum, Ungewissheiten in geologischen Modellen von verschiedenen Seiten wissenschaftlich zu beleuchten und daraus konkrete Methoden abzuleiten, die eine Quantifizierung und Kommunikation von Ungewissheiten im Kontext der Standortsuche i. S. d. §§ 14 und 18 StandAG zulassen. Die Ergebnisse aus diesem Verbundprojekt werden in den methodischen Umgang mit Ungewissheiten im Rahmen der Standortsuche einfließen.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

5.1.2 Bewertung der Datenlage und der geologischen Rahmenbedingungen

Im Folgenden wird ein Arbeitsstand zu einer Methode vorgestellt, die auf eine Bewertung der Ableitbarkeit der Untergrundbeschaffenheit abzielt, um daraus eine individuelle Ungewissheit abschätzen zu können. Dafür soll festgestellt werden, wie die individuelle Datenlage und geologische Situation in den verschiedenen Teiluntersuchungsräumen ist, damit diese Informationen als Kenngrößen in die Bewertung der Ungewissheit eingehen können. Im Ergebnis soll damit perspektivisch ein Werkzeug zur Verfügung stehen, welches, wo erforderlich, im Rahmen der Geosynthese zur Anwendung kommen kann. Die Bewertung von Ungewissheiten im Zusammenhang mit gesteinsphysikalischen Parametern (z. B. Festigkeiten, Porositäten etc.) als Eingangsgrößen in die numerischen Transportmodelle ist an dieser Stelle nicht thematisiert.

5.1.2.1 Kenngrößen

Um eine Bewertung der Ableitbarkeit der Untergrundbeschaffenheit methodisch zu entwicklen, werden vier Kenngrößen definiert. Zunächst zwei Kenngrößen zur Datenlage, getrennt nach Datenqualität und Datenquantität, sowie im Weiteren zwei Kenngrößen zu den geologischen Rahmenbedingungen eines Teiluntersuchungsraums, getrennt nach den vorhandenen interpretativen Daten und weiteren (indirekten) Nachweisen und der geologischen Komplexität. Mit Hilfe dieser vier Kenngrößen kann die Verlässlichkeit von Aussagen zur Beschaffenheit des Untergrunds bewertet werden. Diese vier Kenngrößen werden im Folgenden näher spezifiziert.

Datenlage

Die in einem Teiluntersuchungsraum vorliegende Datenlage kann anhand der verfügbaren direkten (z. B. Bohrungen) und indirekten (hier: reflexionsseismische Daten) Nachweise bewertet werden. Die Menge, Art und Verteilung dieser Daten ist wesentlich, um die Ungewissheiten der daraus interpretierten Daten (3D-Modelle, Karten, Profilschnitte) sowie der nachfolgenden Bewertungen im Rahmen von § 7 EndlSiUntV abschätzen zu können. Dafür können in diesem Schritt für eine Abschätzung die verfügbaren Bohrungsinformationen in Form von digital erfassten Schichtenverzeichnissen sowie reflexionsseismischen Daten (2D und 3D) verwendet werden. Im Rahmen des Verbundprojekts *GeoBlocks* (BGR, RWTH Aachen, University of Aberdeen; vgl. Kapitel 5.1.1) wird aktuell auch die Interpretierbarkeit (als Teilaspekt für die Qualität) reflexionsseismischer Daten erarbeitet. Das Vorhandensein von interpretierten Daten wie Mächtigkeitskarten oder 3D-Modelle fließt nicht in die Bewertung der Kenngrößen zur Datenlage (Datenqualität und Datenquantität) ein, sondern schlägt sich in der Bewertung der Kenngrößen zu den geologischen Rahmenbedingungen nieder.

<u>Kenngröße 1: Datenqualität (DQL)</u>

Die Kenngröße der Datenqualität soll für ausgewählte Daten, die in die Kategorie direkte und indirekte Nachweise fallen, über eine einfache und objektive Methode festgestellt werden. Bohrungen und reflexionsseismische Daten werden bei der Exploration des tiefen Untergrundes (Geothermie, Kohlenwasserstoffe u. a.) aufgrund ihrer großen Aussagekraft regelmäßig erhoben. Alle anderen

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

Explorationsmethoden spielen eine untergeordnete Rolle. Daher wird für die Erfassung der Datenqualität auf diese beiden Datentypen zurückgegriffen. Mögliche weitere indirekte Daten fließen in die Bewertung der geologischen Rahmenbedingungen ein.

Ein (Teil-)Aspekt für die Bewertung der Datenqualität kann der Informationsgehalt von Bohrungen sein. Als Hinweis auf die Qualität von Bohrungsdaten wird die Menge an vorliegenden digitalen Schichtinformationen bezogen auf Petrologie- und Stratigraphieangaben in der Bohrdatenbank herangezogen. Der Detailgrad innerhalb der Schichtbeschreibungen ist ein Hinweis auf die Datenqualität. Dieser Aspekt wird anhand des in Beispiel 31, Abbildung 63 angegebenen Vorgehens zunächst für jede Bohrung einzeln als Mittelwert des Detailgrads der einzelnen Schichten ermittelt. Auf diese Weise lässt sich einheitlich und nachvollziehbar der Informationsgehalt der in einem Teiluntersuchungsraum verfügbaren Bohrungen erfassen.

Beispiel 31: Bestimmung des Informationsgehalts der Bohrungen am Beispiel des GzME „Thüringer Becken“ (03_00UR)

Informationsgehalt der Bohrungen im GzME „Thüringer Becken“ (03_00UR)

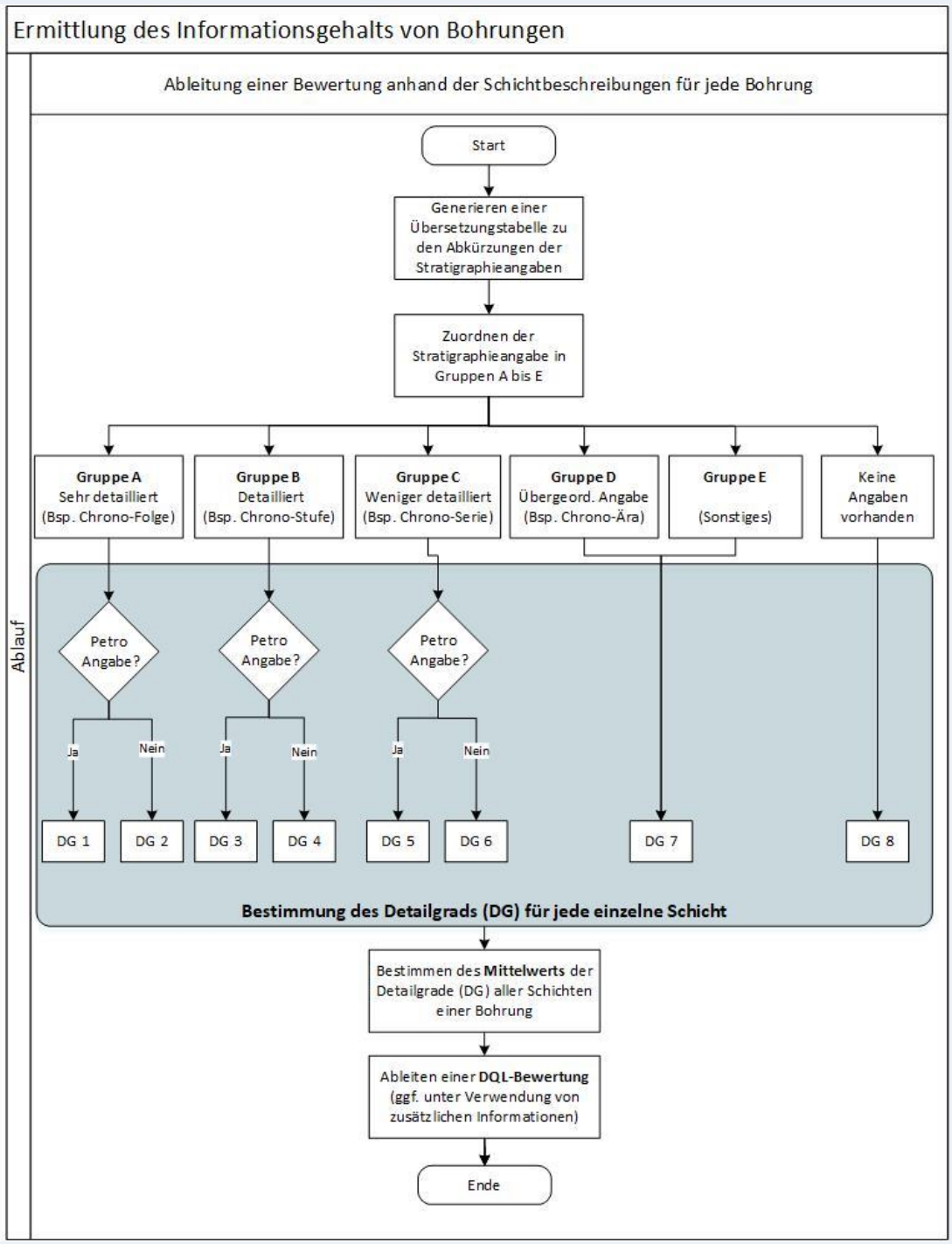


Abbildung 63: Schematische Darstellung der Ermittlung des Informationsgehalts und damit der Datenqualität von Bohrungen

Informationsgehalt der Bohrungen im GzME „Thüringer Becken“ (03_00UR)

Für alle Bohrungen im GzME „Thüringer Becken“ wurde automatisiert anhand des in Abbildung 63 gezeigten Vorgehens der Informationsgehalt und damit ein Aspekt für die Datenqualität bestimmt. In Abbildung 64 ist die bohrungsspezifische Kategorisierung des Informationsgehalts dargestellt.

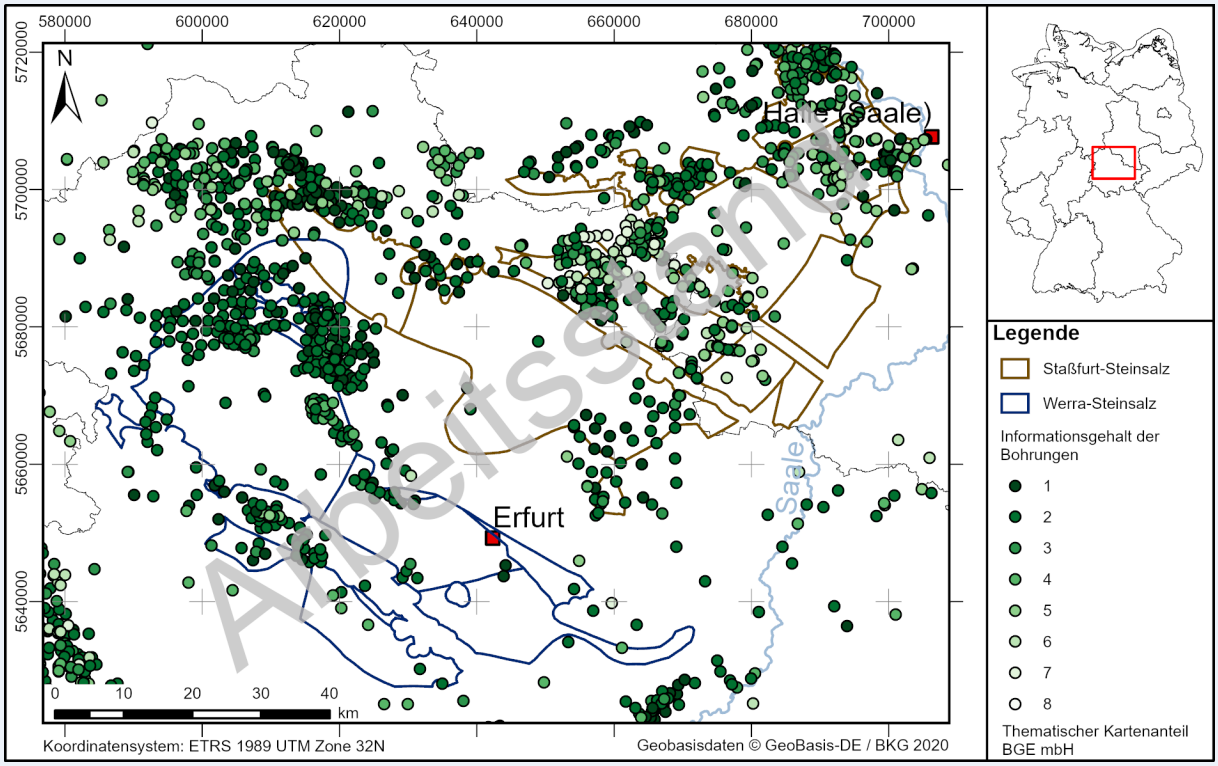


Abbildung 64: Darstellung der Kategorisierung hinsichtlich des Informationsgehalts von Bohrungen am Beispiel der Teiluntersuchungsräume im GzME „Thüringer Becken“

Der Informationsgehalt aller Bohrungen, die in einem Teiluntersuchungsraum vorkommen, wird in eine Teiluntersuchungsraum-spezifische Bewertung der allgemeinen Datenqualität einfließen. Die genaue Vorgehensweise zur Einstufung eines Teiluntersuchungsraums hinsichtlich der Datenqualität von Bohrungsdaten und reflexionsseismischen Daten ist noch nicht abschließend definiert. Im Ergebnis könnte eine wie in Tabelle 28 gezeigte Einteilung nach Datenqualität in Stufen stattfinden.

Tabelle 28: Mögliche Einstufung der Bewertung der Datenqualität anhand einer Einschätzung der teiluntersuchungsraumspezifischen Datenqualität

Einschätzung der DQL (für TUR oder Teil-TUR)	DQL-Stufen
Sehr gute Qualität	1
Gute Qualität	2
Eher gute Qualität	3
Weniger gute Qualität	4
Schlechte Qualität	5
Sehr schlechte Qualität	6

Kenngröße 2: Datenquantität (DQN)

Auch die Kenngröße der Datenquantität soll anhand von Bohrungsdaten und reflexionsseismischen Daten bewertet werden. Für eine Bewertung der Quantität der vorhandenen relevanten Bohrungsinformationen für einen Teiluntersuchungsraum werden Filter verwendet, um nur solche Bohrungen zu bewerten, die auch Informationen zum betrachteten Horizont liefern können. Auch Bohrungen außerhalb des Teiluntersuchungsraums werden in diese Betrachtung mit einbezogen, sofern sie für das Gebiet relevant sind.

Mit diesen Bohrungen kann z. B. über eine Nachbarschaftsanalyse mit Thiessen-Polygonen (Abbildung 65) die Quantität der Bohrungsinformationen bestimmt werden. Die Größe eines Thiessen-Polygons ist mit den Entfernungen zu den nächstgelegenen Nachbarbohrungen korreliert.

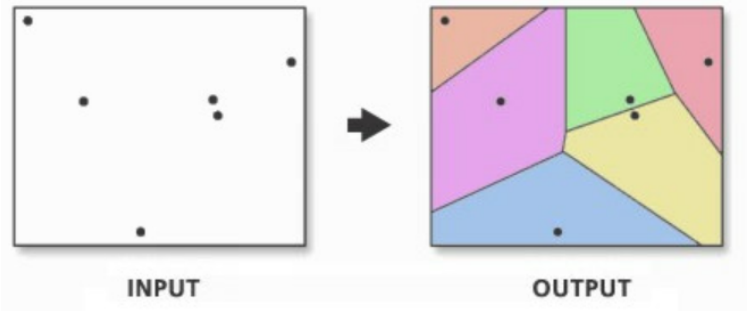


Abbildung 65: Beispiel für die Erstellung von Thiessen-Polygonen mit ArcGIS[17]

Über die Darstellung der Größe von Thiessen-Polygonen lässt sich objektiv zeigen, wie gut die Datenquantität bezogen auf relevante Bohrungen innerhalb von Gebieten ist (vgl. Beispiel 32). Die Größe der Thiessen-Polygone innerhalb eines Teiluntersuchungsraums wird verwendet, um in die

[17] Siehe dazu auch Thiessen-Polygone erstellen (Analysis)—ArcGIS Pro | Dokumentation; https://pro.arcgis.com/de/pro-app/latest/tool-reference/analysis/create-thiessen-polygons.htm, abgerufen am 19.01.22

spätere Ableitung des Konfidenzniveaus hinsichtlich getätigter Interpretationen und Aussagen zu dem Teiluntersuchungsraum einzufließen (vgl. Kapitel 5.1.2.2).

Beispiel 32: Darstellung der Quantität von Bohrungsdaten am Beispiel des GzME „Thüringer Becken“ (03_00UR)

Quantität von Bohrungsdaten im GzME „Thüringer Becken“ (03_00UR)

Für die Bohrungen im Thüringer Becken, die den Zechstein erreichen, wurden die Thiessen-Polygone errechnet (Abbildung 66). Die gewählte Farbkodierung steht für die Flächengröße und verdeutlicht damit die Menge und Abdeckung von Bohrungsdaten in den verschiedenen Teiluntersuchungsräumen im Thüringer Becken. Ihre Dimensionierung hat hier keine spezielle Relevanz, da die Größen der Thiessen-Polygone direkt verwendet und nicht weiter klassifiziert werden.

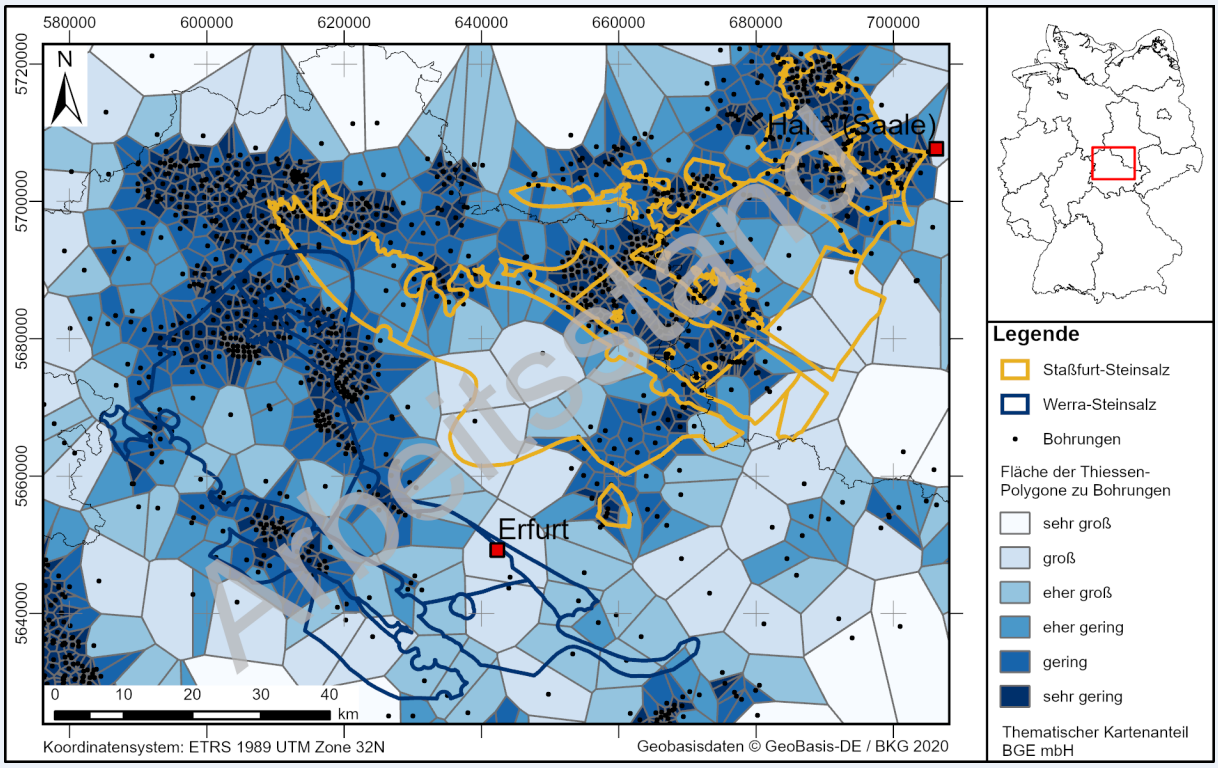


Abbildung 66: Darstellung der Datenquantität bezogen auf Bohrungsinformationen über Thiessen-Polygone am Beispiel der Teiluntersuchungsräume im GzME „Thüringer Becken“

Die Methode zur Bewertung der Quantität von reflexionsseismischen Daten wird aktuell noch entwickelt. Sie soll gemeinsam mit der Quantität der Bohrungsdaten in die teiluntersuchungsraumspezifischen Kenngröße der Datenquantität einfließen.

Geologische Rahmenbedingungen

In jedem Teiluntersuchungsraum (oder bei großen Teiluntersuchungsräumen auch für mehrere Bereiche) wird der Grad des existierenden geologischen Verständnisses und der Komplexität abgeschätzt. Dafür werden die weiteren interpretativen Daten und Nachweise sowie die geologische Komplexität separat bewertet.

Kenngröße 3: Interpretative Daten und weitere (indirekte) Nachweise (IDN)

Für die Kenngröße IDN wird die Qualität und die Menge an interpretativen Nachweisen in Form von interpretierten Daten (3D-Modelle, Profilschnitte etc.), weiteren indirekten Nachweisen aus geophysikalischer Erkundung wie Gravimetrie, Geoelektrik oder ähnlichem sowie lokalen Studien und Modellvorstellungen bewertet. Die Art, Qualität und Menge dieser weiteren Informationen und Nachweise hilft ein geologisches Verständnis zu einem bestimmten Gebiet zu erlangen. Dabei können auch Informationen, die außerhalb des zu bewertenden Gebiets erhoben wurden, mit einbezogen werden, sofern diese für das Gebiet relevant sind. Anhand einer subjektiven Bewertung kann die IDN folgendermaßen abgeschätzt werden:

Tabelle 29: Einstufung der Bewertung der interpretativen und weiteren (indirekten) Nachweise anhand einer subjektiven Einschätzung der teiluntersuchungsraumspezifischen Datenlage

Einschätzung der IDN (für TUR oder Teil-TUR)	IDN-Stufen
Sehr viele und/oder sehr gute interpretative Daten und weitere Nachweise vorhanden	1
Viele und/oder gute interpretative Daten und weitere Nachweise vorhanden	2
Mäßig viele und/oder mäßig gute interpretative Daten und weitere Nachweise vorhanden	3
Eher wenige und/oder eher weniger gute interpretative Daten und weitere Nachweise vorhanden	4
Wenige und/oder weniger gute interpretative Daten und weitere Nachweise vorhanden	5
Sehr wenige und/oder minderwertige interpretative Daten und weitere Nachweise vorhanden	6

Kenngröße 4: Geologische Komplexität (KX)

Informationen zu tektonischen Strukturen aus Karten, 3D-Modellen und Profilschnitten helfen dabei, die Kenngröße der geologischen Komplexität einzuschätzen. Generische und paläogeographische Ausarbeitungen können zur Vorhersage möglicher räumlicher Variationen und Änderungen der Fazies und Gesteinsausbildung herangezogen werden. Bei einer hohen Komplexität der Verhält-

nisse ist die Interpretation oder Übertragbarkeit benachbarter Informationen erschwert. So wird zwischen einer „einfachen“ Geometrie mit ungestörter, schichtparalleler und flacher Lagerung und solchen Gebieten, die eine starke tektonische Zerblockung und/oder Verstellung erfahren haben, unterschieden. Anhand einer subjektiven Bewertung kann die geologische Komplexität folgendermaßen abgeschätzt werden.

Tabelle 30: Einschätzung und Einstufung der Bewertung der geologischen Komplexität

Einschätzung der KX (für TUR oder Teil-TUR)	KX-Stufen
Sehr geringe Komplexität	1
Geringe Komplexität	2
Eher geringe Komplexität	3
Eher hohe Komplexität	4
Hohe Komplexität	5
Sehr hohe Komplexität	6

5.1.2.2 Ableitbarkeit der Untergrundbeschaffenheit

Die Ableitbarkeit der Untergrundbeschaffenheit gibt Aufschluss über die Verlässlichkeit der geowissenschaftlichen Interpretationen des Untergrundes, welche aufgrund der vorliegenden Informationen in einem Gebiet erreicht wird. Diese spiegelt sich in einer gemeinsamen Betrachtung der vorgestellten vier Kenngrößen wider und kann auf Basis der Bewertungen der genannten Kenngrößen Teiluntersuchungsraum-spezifisch ermittelt werden. Sie ergibt sich aus der gemeinsamen Betrachtung der Datenlage, bezogen auf Qualität und Quantität, sowie den geologischen Rahmenbedingungen. Damit soll die Ableitbarkeit der Untergrundbeschaffenheit den Grad der Ungewissheit für vorgenommene Bewertungen innerhalb eines Teiluntersuchungsraums beschreiben. Sie ermöglicht damit eine Einschätzung zum Grad der Aussagefähigkeit zu bestimmten Eigenschaften bzw. zur Verlässlichkeit (Konfidenzniveau) bzgl. der getroffenen Bewertungen.

Trotz schlechter Datenlage kann bei einer sehr geringen Komplexität der geologischen Situation dennoch eine Ableitbarkeit der Untergrundbeschaffenheit mit relativer hoher Gewissheit vorliegen. Ist ein Gebiet sehr komplex aufgebaut, z. B. stark tektonisch zerblockt, muss die Datenlage gut sein, um dennoch vertrauenswürdige Bewertungen für das Gebiet vornehmen zu können. Wurde in einem komplex aufgebauten Gebiet beispielsweise viel gearbeitet, erkundet und/oder geforscht, fällt die Abschätzung zur Verlässlichkeit der getätigten Aussagen und Bewertungen besser aus als ohne solche zusätzlichen geologischen Erkenntnisse.

Es wird aktuell erarbeitet, wie genau die Verlässlichkeit der geowissenschaftlichen Interpretationen des Untergrunds aus den vier Kenngrößen ermittelt werden kann. Fragen zur Wichtung der vier Kenngrößen und der Herleitung eines Wertes zur Ableitbarkeit der Untergrundbeschaffenheit sollen

erarbeitet werden, um ein Werkzeug bzgl. der Ableitung eines Konfidenzniveaus hinsichtlich getätigter Aussagen und Interpretationen im Rahmen der Geosynthese verfügbar zu haben. Ergebnisse aus dem bereits erwähnten Verbundprojekt *GeoBlocks* können im weiteren Verfahren in diese Beurteilung mit einfließen.

5.1.3 Maßnahmen in Zusammenhang mit heterogener Datenlage

5.1.3.1 Überarbeiteter Bewertungsansatz für Phase I Schritt 2

Im Rahmen der Methodenentwicklung für Schritt 2 der Phase I des Standortauswahlverfahrens hat sich herausgestellt, dass im Rahmen des nun steigenden Dateillierungsgrades der Umgang mit geringer Datenlage neu bewertet werden muss. In Schritt 1 der Phase I wurde ein konservativer Ansatz gewählt, bei dem sich Bewertungen durch einen Informationsgewinn in späteren Phasen nicht verbessern, sondern nur beibehalten oder schlechter werden können. Dieser Ansatz könnte für Schritt 2 tendenziell dazu führen, dass potenzielle Standortregionen insbesondere aus Gebieten mit geringer Datenlage auf Basis von überschätzenden Bewertungen ermittelt werden. Daher ist für den Umgang mit Gebieten mit geringer Datenlage ein Perspektivwechsel sinnvoll.

In Schritt 2 der Phase I werden Bewertungen in Gebieten mit geringer Datenlage mit geologischem Sachverstand grundsätzlich im Sinne einer besten Schätzung („best estimate“) formuliert. Dafür werden auf Basis aller vorliegenden Informationen und Analogieschlüsse Abschätzungen zum Untergrundaufbau und den Eigenschaften vorgenommen und zur Bewertung herangezogen. Es wird damit im Umkehrschluss akzeptiert, dass eine Gebietsbewertung in Phase II auch günstiger werden kann, sofern sich die getroffenen Annahmen mit zunehmendem Informationsgewinn über die Explorationsmaßnahmen in Phase II als zu pessimistisch herausstellen.

Bewertungen erfolgen in Schritt 2 der Phase I durch eine möglichst realistische Abschätzung der geologischen Bedingungen, welche sich an allen vorhandenen Informationen zum Teiluntersuchungsraum orientiert. Bewertungen, die auf einer vergleichsweise schlechten Informationsbasis erfolgen, haben eine geringere Aussagekraft und können im Verlauf des Verfahrens durch neue Erkenntnisse sowohl günstiger als auch ungünstiger ausfallen. Bewertungen, die auf einer guten oder sehr guten Informationsbasis erfolgen, haben eine höhere Aussagekraft als Bewertungen, die auf einer schlechten Informationsbasis beruhen. Diese Ungewissheit wird im Rahmen der rvSU in § 11 EndlSiUntV (vgl. Kapitel 10) berücksichtigt.

Die teiluntersuchungsraumspezifische Ungewissheit aller Bewertungen fließt nicht als Entscheidungskriterium in den Vergleich zwischen Gebieten ein. Jedoch wird die Ungewissheit bezüglich der Bewertung einzelner sicherheitsrelevanter Kriterien bei der Darlegung der Relevanz der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien nach den Anlagen 1 bis 11 (zu § 24) StandAG (§ 7 Absatz 4 EndlSiUntV) berücksichtigt (siehe Kapitel 8). Damit wird sichergestellt, dass die heterogene Informationsbasis weder zu systematischen Vor- noch Nachteilen in der sicherheitsgerichteten Bewertung von Gebieten führt.

5.1.3.2 Repräsentative Profile

Um die geologischen Verhältnisse im Untergrund abzubilden, werden oft 3D-Modelle verwendet, in welchen die Informationen verschiedener Datentypen, wie beispielsweise Bohrungsdaten, bohrlochgeophysikalische Daten oder Informationen aus Kartierungen integriert werden.

Nicht in allen Fällen ist die aufwändige Erstellung von 3D-Modellen sinnvoll. Daher werden als erster Schritt im Rahmen der rvSU sogenannte repräsentative vertikale 1D-Profile entwickelt. Diese spiegeln die zeitliche Abfolge, die Lithologie sowie die Eigenschaften bestimmter Gesteinseinheiten in einem Gebiet wider und berücksichtigen Informationen zu allen verfügbaren Datenquellen, die für das Gebiet eine Relevanz haben. Den Modelleinheiten im repräsentativen Profil können je nach Datenverfügbarkeit lithologische Informationen (ggf. aus verschiedenen Quellen), bohrlochgeophysikalische Daten und Interpretationen und ggf. eine hydrostratigraphische Gliederung mitgegeben werden.

Für die Teiluntersuchungsrräume werden, je nach Größe, ein oder mehrere repräsentative Profile verwendet, um die geologische Situation in 1D abzubilden. Ein repräsentatives Profil ist somit charakteristisch für einen bestimmten Bereich eines Teiluntersuchungsraums oder den gesamten Teiluntersuchungsraum (vgl. Kapitel 5.7.1). Auf diese Weise wird jeder Teiluntersuchungsraum im Rahmen der ersten Arbeiten der rvSU gleichbehandelt, egal ob eine eher gute oder eher mäßige Datenlage im Teiluntersuchungsraum vorliegt.

5.1.3.3 Umgang mit interpretativen Grundlagen für die rvSU

Die Ungewissheit, die aus der Verwendung eines repräsentativen Profils (Kapitel 5.1.3.2) resultiert, ist unterschiedlich groß, je nachdem wie gut oder schlecht die Ableitbarkeit der Untergrundbeschaffenheit bzw. das Konfidenzniveau (vgl. Kapitel 5.1.2.2) für den jeweiligen Teiluntersuchungsraum oder Teiluntersuchungsraumbereich ist. Dies gilt gleichermaßen für alle weiteren Interpretationen, die im Rahmen der Standortsuche erarbeitet werden. Dazu können neben den repräsentativen 1D-Profilen auch Profilschnitte (2D) sowie 3D-Modelle gehören, welche zusammen mit den entsprechenden Karten der relevanten Einheiten (z. B. Teufen-, Mächtigkeits-, Fazieskarten) den Untergrund eines Teiluntersuchungsraums charakterisieren.

In Gebieten mit geringer Ableitbarkeit des Untergrundes bzw. geringer geologischer Charakterisierbarkeit ist die Aussagekraft geringer und die Übertragbarkeit ggf. nicht gegeben. In Gebieten mit hoher Ableitbarkeit der Untergrundbeschaffenheit, z. B. bei ungestörter schichtparalleler Lagerung, haben Interpretationen dagegen ein höheres Konfidenzniveau.

Dieses Konfidenzniveau bezüglich der geologischen Aussagen kann im Rahmen der Geosynthese auf geologische Interpretationen übertragen werden. Das heißt, die Bewertung hinsichtlich des Konfidenzniveaus wird dann bei den folgenden Bearbeitungsschritten mitgeführt, so dass sich eine Abschätzung der Ungewissheit bezüglich einer Aussage oder Bewertung daran orientieren kann.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

Mit diesem Ansatz können unabhängig von der Datenlage für jedes Gebiet Interpretationen und geologische Modellvorstellungen entwickelt und Bewertungen vergeben werden. Durch das Übertragen des spezifischen Konfidenzniveaus wird einer unterschiedlichen Datenlage Rechnung getragen.

Dieser Ansatz funktioniert nicht, sofern die Datenlage in einem Gebiet nicht hinreichend ist. Der Umgang mit solchen Gebieten wird im folgenden Kapitel beschrieben.

5.1.4 Umgang mit Gebieten ohne hinreichende Informationen nach § 14 StandAG

Der Gesetzgeber hat erkannt, dass es ggf. Gebiete geben kann, für die die vorhandenen Informationen nicht ausreichen, um die Kriterien des StandAG (§§ 22 bis 24 StandAG) belastbar prüfen und bewerten zu können. Der Umgang mit den Gebieten ohne hinreichende Informationen wird deshalb in Schritt 2 der Phase I gesondert behandelt (§ 14 StandAG).

Da in den rvSU die Grundlagen für die Bewertung der Kriterien nach §§ 22 bis 24 StandAG gelegt werden oder einige Kriterien hier direkt zur Anwendung kommen (z. B. Ausschlusskriterien), werden in der geowissenschaftlichen Bearbeitung im Rahmen der Geosynthese die Gebiete ohne hinreichende Informationen identifiziert. Zusätzlich muss von der Vorhabenträgerin eine Empfehlung zum weiteren Verfahren für alle Gebiete, in denen die Daten- und Informationslage nicht ausreicht, aufgenommen werden (§ 14 Abs. 2 StandAG).

In der Begründung des Gesetzentwurfs (BT-Drs. 18/11398, Seite 59) wird zu § 14 Abs. 2 StandAG erläutert:

„Es kann derzeit nicht vorhergesehen werden, ob der Vorhabenträger als Ergebnis seiner Auswertungen Gebiete mit Informationsdefiziten ausweisen muss oder ob er alle Gebiete nach Anwendung der geowissenschaftlichen Kriterien abschließend als für die übertägige Erkundung günstige oder nicht günstige Standortregionen einstufen kann. Auch die Anzahl und Größe dieser Gebiete ist nicht absehbar und wird sich erst aus den Auswertungen des Vorhabenträgers ergeben. Deshalb hat der Vorhabenträger für den Fall, dass zu einzelnen Gebieten keine hinreichenden Informationen für eine Anwendung der Kriterien vorliegen, eine Empfehlung zum weiteren Verfahren mit diesen Gebieten zu erarbeiten und in seinen Vorschlag aufzunehmen.

Jedenfalls dürfen Gebiete aus dem Suchprozess nicht allein deshalb ausgeschlossen werden, weil über sie zu wenig bekannt ist, sofern zu erwarten ist, dass sich unter diesen Gebieten ein Standort befindet, der auf Grundlage der Kriterien in § 22 bis § 24 besser zu bewerten ist, als das in allen Regionen mit ausreichender Datenlage der Fall ist.“

Die Ausweisung von Gebieten ohne hinreichende Informationen wird als sinnvoll betrachtet, da hiermit folgenden Punkten Rechnung getragen wird:

- Eine Ausweisung der Gebiete ohne hinreichende Informationen erzeugt Transparenz im Umgang mit einer deutschlandweit heterogenen Datendichte und gibt Aufschluss darüber, wie mit diesen Gebieten im weiteren Verfahren umgegangen wird.

- Durch die Ausweisung wird vermieden, dass es zu Analysen und Bewertungen innerhalb der rvSU und der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien kommt, die keinen oder einen sehr geringen Informationsgehalt haben. Diese wären als Grundlage für die Bewertung der Sicherheit unbrauchbar.
- Dadurch wird vermieden, dass Gebiete anhand unbrauchbarer, aber günstiger Bewertungen als Standortregionen für die übertägige Erkundung ausgewiesen werden.

Hierbei gilt zu beachten, dass die Ausweisung von Gebieten ohne hinreichende Informationen in Schritt 2 der Phase I nur in Ausnahmefällen erfolgt und die Hürden dementsprechend hoch sind.

5.1.4.1 Grundlegende Definition von nicht hinreichenden Informationen

Für die Analysen in der rvSU und der Anwendung der Kriterien nach den §§ 22 bis 24 StandAG sollte die Datenlage eine geowissenschaftliche Begründung darüber zulassen, ob eine Wirtsgesteinsformation in einem Gebiet mit hoher Wahrscheinlichkeit angetroffen werden kann oder nicht. Darüber hinaus sollten Informationen vorliegen, anhand derer die Mächtigkeit, Teufenlage sowie die lithologische Ausprägung des Wirtsgesteinskörpers abgeschätzt werden können. Für Gebiete, die eine dieser Anforderungen nicht erfüllen, kann keine sinnvolle sicherheitsgerichtete Bewertung in den rvSU stattfinden. Zusätzlich ist es unter diesen Voraussetzungen nicht möglich, eine Einstufung als günstige oder nicht günstige Standortregion für die übertägige Erkundung vorzunehmen. Die Notwendigkeit der Ausweisung ist in der Geosynthese gesondert zu begründen. Sie basiert auf einer Beschreibung der vorliegenden Datenlage sowie der regionalgeologischen Kenntnisse. Die Beschreibung möglicher Gebiete ohne hinreichende Information wird anhand des GzME „Saxothuringikum“ beispielhaft gezeigt (siehe Beispiel 33).

Die Definition von nicht hinreichenden Informationen wird damit nicht direkt an einzelne Kriterien des StandAG gekoppelt. Es wird vielmehr eine allgemeingültige Grundvoraussetzung formuliert, die erfüllt sein muss, um Gebiete im Sinne des Standortauswahlverfahrens bearbeiten zu können. Es wird davon ausgegangen, dass für Gebiete, die diese Grundvoraussetzungen erfüllen, die rvSU und die Anwendung der Kriterien nach den §§ 22 bis 24 StandAG durchführbar ist.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

Beispiel 33: Kontaktmetamorphe Gesteine als mögliche Gebiete ohne hinreichende Informationen – Beispiel im GzME „Saxothuringikum“

Kontaktmetamorphe Gesteine als mögliche Gebiete ohne hinreichende Informationen – Beispiel im GzME „Saxothuringikum“

Im Bereich der Lausitzer Grauwacken-Einheit im GzME „Saxothuringikum“ ist die geologische Daten- und Informationslage sehr gering (z. B. existieren keine Bohrungsdaten tiefer 300 m u. GOK). Das bedeutet, dass aktuell nicht mit hoher Wahrscheinlichkeit festgestellt werden kann, ob kristalline Wirtsgesteinsformationen im geologischen Untergrund vorkommen oder nicht. Es kann nicht abgeschätzt werden, in welcher Gesteinsausbildung, Mächtigkeit oder Teufenlage diese ggf. vorhandenenen kristallinen Wirtsgesteinskörper vorkommen.

Die lithologischen Begrenzungen im Norden der Lausitzer Granodiorite hin zur Lausitzer Grauwacke sind Intrusionskontakte, die durch deutliche kontaktmetamorphe Aureolen in den Lausitzer Grauwacken belegt sind. Die geologischen Karten „Lausitz - Jizera - Karkonosze“ im Maßstab 1 : 100 000 (GK100 LJK) und im Maßstab 1 : 400 000 ohne känozoische Sedimente (GK400) geben Aufschluss über die Verbreitung von kartierten kontaktmetamorphen Gesteinen und Plutoniten in Gebieten wie der Lausitzer Grauwacken-Einheit (Abbildung 67).

Aufgrund dieser eingeschränkten Datenlage und den indirekten geologischen Hinweisen auf kristalline Wirtsgesteine (Plutonite) wurde in diesem Bereich des GzME „Saxothurinigkum“ eine flächendeckende Auswertung und Interpretation von vorhandenen geophysikalischen Potenzialfelddaten, Gravimetrie und Magnetik vorgenommen (Skiba et al. 2010; Gabriel et al. 2011). Die Datenquelle für die Magnetik in dem Gebiet ist ein kompilierter und homogenisierter Datensatz von Aero- und Boden-Magnetikmessungen des VEB Geophysik Leipzig aus den 1980er Jahren.

Grundlegende Eigenschaft der beiden Potenzialfeldmethoden Gravimetrie und Magnetik ist ihr ausschließlich kartierender Charakter. Die jeweils für die Methode wirksamen Gesteinseigenschaften (Dichte ρ, magnetische Suszeptibilität χ) werden dabei nicht unmittelbar abgebildet, sondern lediglich deren Wirkung. Die aufgenommene Messgröße (Schwerebeschleunigung g, magnetische Induktion B) ist stets ein Summeneffekt der Feldwirkung aller vorhandenen Gesteinskörper bzw. -massen in einem Bereich.

Als Grundlage für die Interpretation der Potenzialfelddaten wurden die relevanten Gesteinsparameter für den Untersuchungraum im östlichen Bereich des GzME „Saxothuringikum“ recherchiert (z. T. auch aus petrophysikalischen Arbeiten zu vergleichbaren Gesteinseinheiten im Saxothuringikum und Moldanubikum). Die Granodiorite (ca. 2,66 g/cm³ bis 2,73 g/cm³) unterscheiden sich von ihrer Dichte nicht signifikant von Grauwacken (2,72 g/cm³ bis 2,75 g/cm³). Variszische Granite sind mit Dichtewerten von ca. 2,65 g/cm³ bis 2,67 g/cm³ deutlich leichter und zeigen dadurch einen deutlichen Kontrast zu Granodioriten. Die mesozoischen Sedimente besitzen üblicherweise Dichtewerte von deutlich kleiner als 2,5 g/cm³.

Kontaktmetamorphe Gesteine als mögliche Gebiete ohne hinreichende Informationen – Beispiel im GzME „Saxothuringikum“

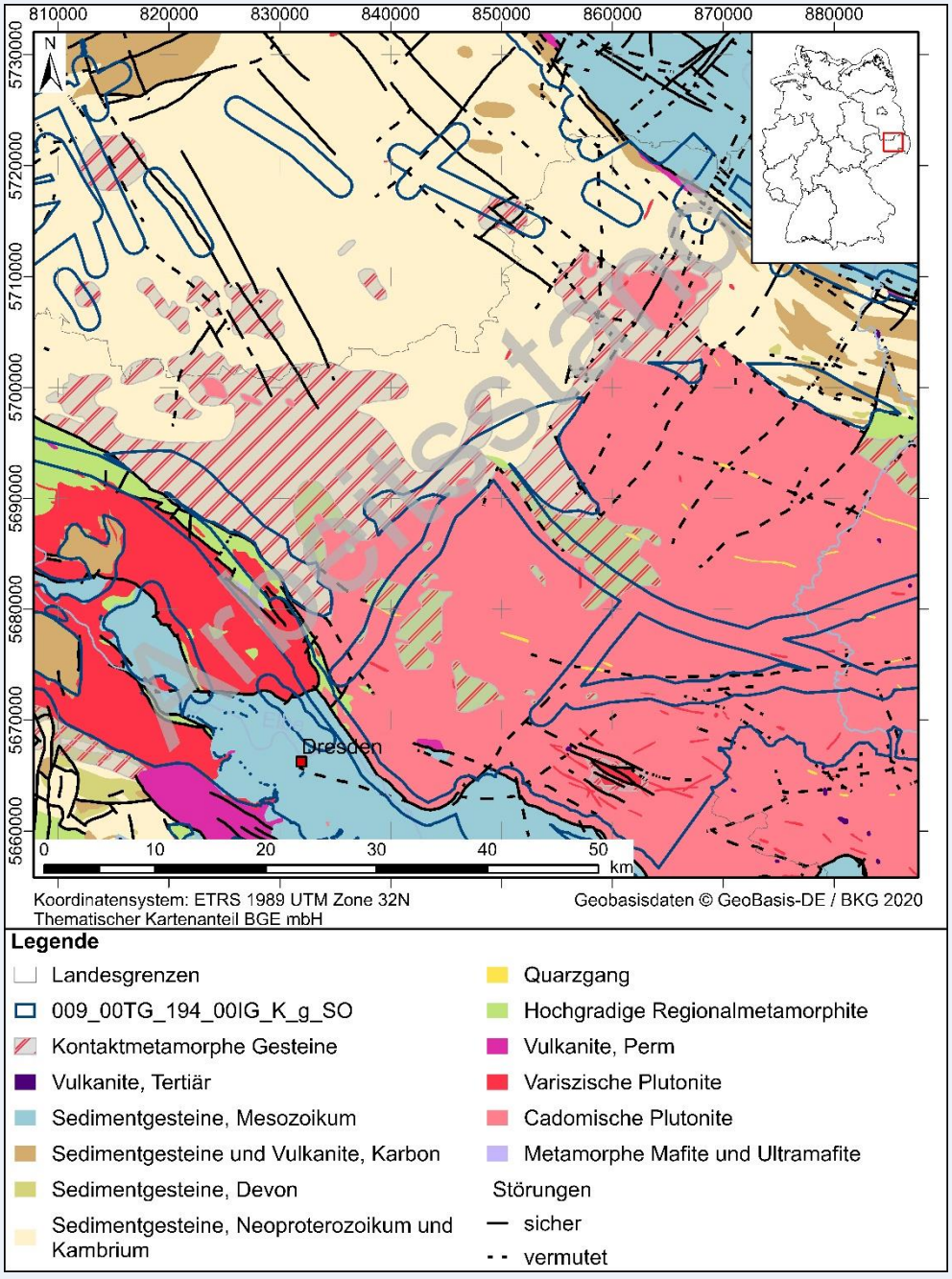


Abbildung 67: Geologischer Ausschnitt aus der GK400 (LfULG, DokID_11839344_5) im Bereich der Lausitzer Grauwacken-Einheit und des Lausitzer Granodiorit-Komplexes.

Geologische Einheiten und Legende wurden stark vereinfacht und schematisiert; eine rote Schraffur zeigt das Vorkommen von kontaktmetamorphen Gesteinen (Kontakthöfe).

Kontaktmetamorphe Gesteine als mögliche Gebiete ohne hinreichende Informationen – Beispiel im GzME „Saxothuringikum“

Kristalline Gesteinseinheiten, wie Granite und Granodiorite, besitzen je nach Bildungsbedingungen eine unterschiedliche magnetische Suszeptibilität. Granitoide der Ilmenit-Serie (z. B. die S-Typ-Granite des Erzgebirges) weisen deutlich geringere Suszeptibilitäten als Granitoide der Magnetit-Serie auf (Ishihara 1977).

Die alkalireichen mafischen Gesteine (z. B. Diorite und Monzonite) des Meißener Plutons zeigen eine sehr deutliche magnetische Anomalie (Abbildung 69), wohingegen die Granodiorite und Granite im Zentrum des Meißener Plutons sich durch eine geringe magnetische Anomalie und ein Schwereminimum abgrenzen lassen.

Neben einer qualititativen Interpretation und Bewertung der gravimetrischen und magnetischen Feldverteilungen und Anomalien wurden einige Bereiche in der Grauwacken-Einheit und dem Lausitzer-Komplex durch kombinierte 2,5-dimensionale Modellrechnungen quantitativ untersucht.

Der Übergang der Lausitzer Grauwacken-Einheit zum Granodiorit-Komplex liegt innerhalb des dominierenden Schwerehochs (A). Dies kann durch die ähnlichen Dichten von Grauwacke und Granodiorit erklärt werden. An der Grenze zu den Granodioriten zeigt sich eine marginale Erhöhung der Schwere im Bereich der Grauwacken-Einheit, die auf eine geringfügig höhere Dichte der Grauwacken hindeutet (Abbildung 68). Im Nordwesten der Grauwacken-Einheit liegt eine Zone relativ verminderter Schwere vor (Zone F). Diese Schwereverminderung lässt sich nicht allein durch Gesteine der Grauwacken-Einheit erklären und könnte auch auf Gesteine mit geringeren Dichten, wie z. B. Granite, hindeuten.

Abbildung 69 zeigt viele kleinräumige magnetische Anomalien und geologische Strukturen. Vor allem der Lausitzer Granodioritkomplex ist geprägt von einer Anordnung mehrerer schwacher Anomaliezüge (Zone I), die im Streichen einiger Störungen (NW–SE) und insbesondere der Intrusionen mafischer kristalliner Ganggesteine (vorwiegend Gabbros, Gabbrodiorite) liegen. Am unmittelbaren Übergang zwischen Grauwacken-Einheit und Lausitzer Granodiorit (Zone J) und in der Zone K können mehrere kleinteilige parallele magnetische Anomalieachsen in der Grauwacken-Einheit beobachtet werden (Zonen J–K in Abbildung 69). Diese magnetisch auffälligen Bereiche in der Grauwacken-Einheit korrelieren außergewöhnlich gut mit der Verbreitung von kontaktmetamorphen Gesteinen. Im Übergangsbereich von Grauwacken-Einheit zu Lausitzer Granodioriten ist eine schwache langwellige Anomalie (Zone A1) unterlagert, die sich über beide regionalgeologische Einheiten erstreckt. Die kombinierten 2,5-dimensionalen Modellrechnungen für die Zonen J, K, F und A1 lassen viele verschiedenen Szenarien zu (unterschiedliche Modellannahmen führen zu identischen Projektionen des Potenzials an der Erdoberfläche). Grundsätzlich besteht für die magnetische Anomalie A1 die Möglichkeit, dass es sich um einen großen plutonischen Körper handelt, der die Mindestanforderungen erfüllen könnte. Gleichzeitig gibt es große Ungewissheiten bei der geophysikalischen Interpretation und die mögliche Bandbreite der geophysikalischen Interpretationen für die Zonen

Kontaktmetamorphe Gesteine als mögliche Gebiete ohne hinreichende Informationen – Beispiel im GzME „Saxothuringikum“

A1, J – K und F in Hinblick auf die Mächtigkeit, Teufenlage und Suszeptibilitätskontraste von möglichen kristallinen Wirtsgesteinskörpern ist immens groß.

Die Auswertung der Gravimetrie- und Magnetikdaten für den Bereich der Grauwacken-Einheit und den Übergang zum Lausitzer Granodiorit-Komplex lässt einige Mehrdeutigkeiten in der geologischen Interpretation zu und zeigt, dass essentielle Informationen zu einer Bewertung im Rahmen der rvSU und der Anwendung der Kriterien nach den §§ 22 bis 24 StandAG nicht vorliegen. Insbesondere geologische Informationen zur Mächtigkeit, Teufenlage sowie zur Gesteinsausbildung von möglichen kristallinen Wirtsgesteinskörpern können in diesen Gebieten nicht abgeleitet werden, auch nicht durch die zusätzliche Interpretation von vorhandenen geophysikalischen Potenzialfelddaten und Analogieschlüssen.

Die magnetisch auffälligen Bereiche im Süden und Osten der Grauwacken-Einheit (Zonen J – K in Abbildung 69) korrelieren gut mit Verbreitungsgebieten von kontaktmetamorphen Gesteinen in den geologischen Karten des LfULG (GK100 LJK und GK400). Gebiete mit diesen kontaktmetamorphen Gesteinseinheiten in der Grauwacken-Einheit können somit als mögliche Gebiete ohne hinreichende Informationen in Frage kommen (Abbildung 67).

Geschäftszeichen: SG02303/97-2/2-2022#10 – Objekt-ID: 919256 – Stand:28.03.2022

Kontaktmetamorphe Gesteine als mögliche Gebiete ohne hinreichende Informationen – Beispiel im GzME „Saxothuringikum“

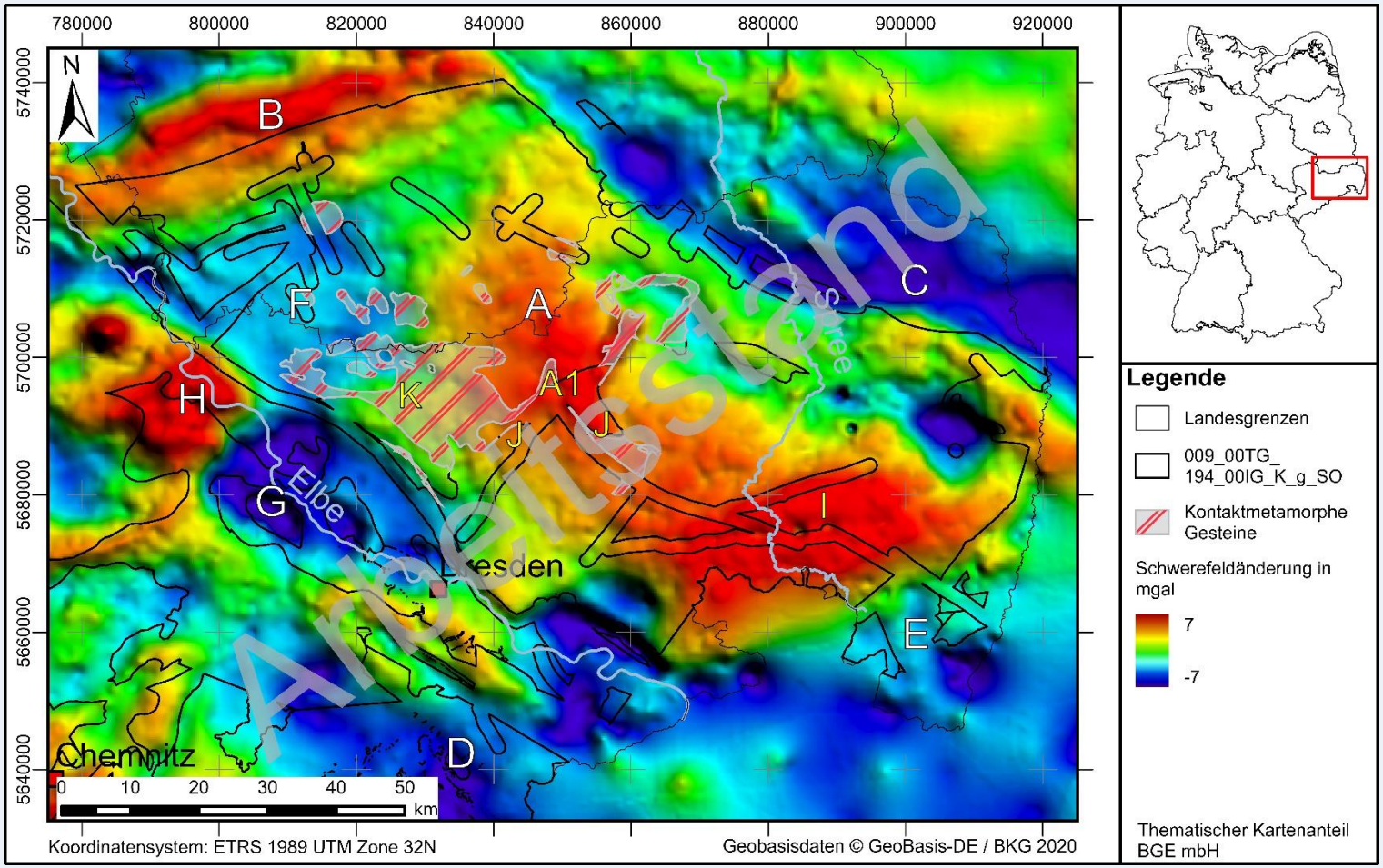


Abbildung 68: Gravimetrische Daten (nach Wellenlängenfilterung Hochpass 50 km) im Bereich der GK100 LJK; Datenquelle Gravimetrie: LIAG; Skiba et al. (2010)

Arbeitsstand

Projekt	PSP-Element	Funktion / Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev
NAAN	NNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN
SG	0330				EA	TF	0002	00

Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung

BGE BUNDESGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG

Blatt: 248

Geschäftszeichen: SG02303/97-2/2-2022#10 – Objekt-ID: 919256 – Stand:28.03.2022

Kontaktmetamorphe Gesteine als mögliche Gebiete ohne hinreichende Informationen – Beispiel im GzME „Saxothuringikum“

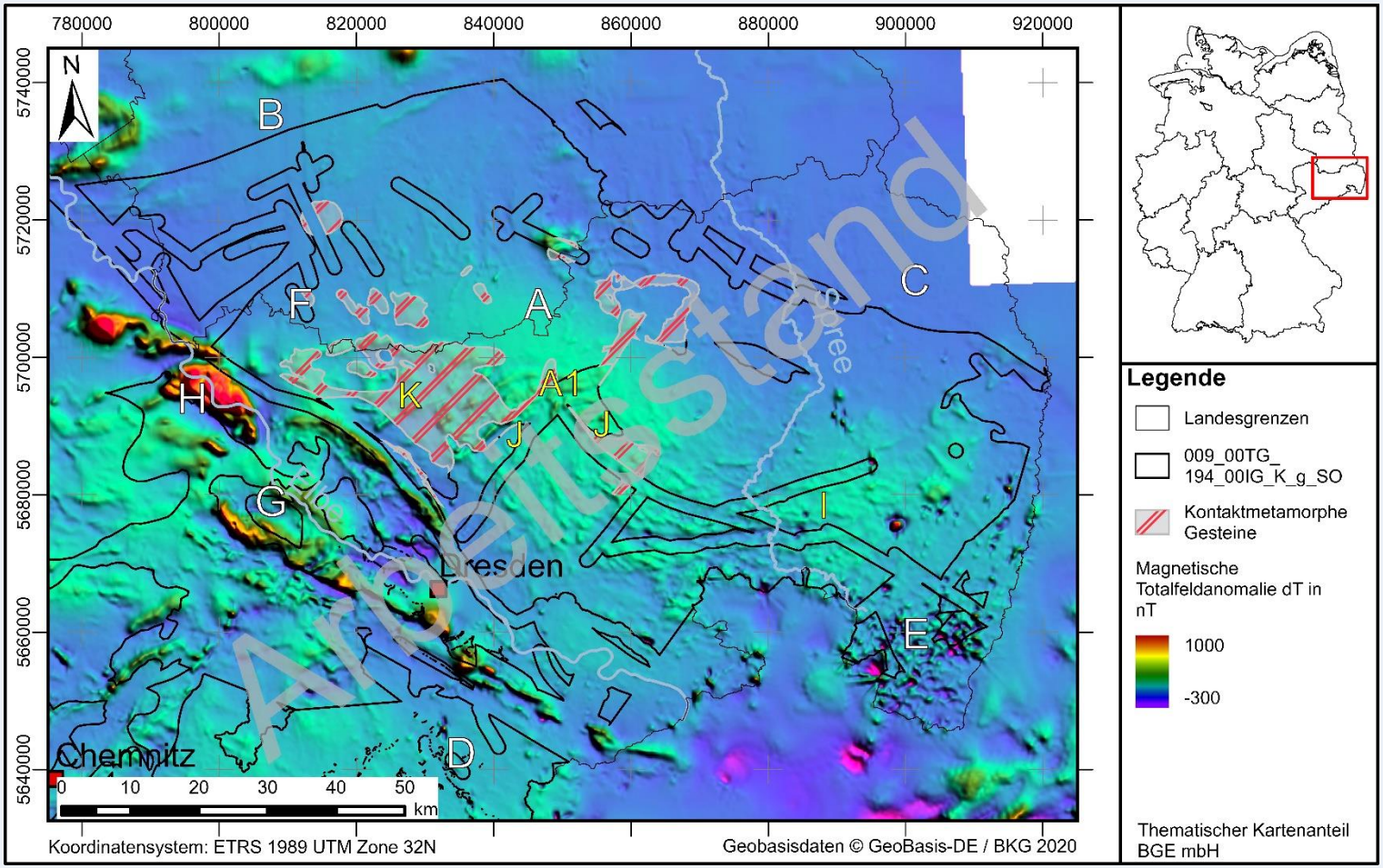


Abbildung 69: Magnetik-Daten im Bereich der GK100 LJK; dargestellt als magnetische Totalfeldanomalie ΔT in nT (Datenquelle: VEB Geophysik Leipzig)

Arbeitsstand

Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung										
Projekt	PSP-Element	Funktion / Thema	Komponente	Baugruppe	Aufgabe	UA	Lfd Nr.	Rev	BGE BUNDESGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG	
NAAN	NNNNNNNNN	NNAAANN	AANNNNA	AANN	AAAA	AA	NNNN	NN		
SG	0330				EA	TF	0002	00		Blatt: 249

5.1.4.2 Umgang mit Gebieten mit nicht hinreichender Informationen

Wenn bei der geowissenschaftlichen Ausarbeitung Gebiete ohne hinreichende Informationen identifiziert werden, so werden diese separat als solche ausgewiesen. Diese Gebiete ohne hinreichende Informationen werden im Folgenden während der rvSU, geowissenschaftlichen und planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien nicht weiterbearbeitet, sondern erst mit dem Standortregionen-Vorschlag bewertet.

Mit dem Standortregionen-Vorschlag durch die BGE wird der weitere Umgang mit den betroffenen Gebieten ohne hinreichende Informationen individuell empfohlen und fachlich begründet. Hier wird die Begründung in der jeweiligen Geosynthese wieder aufgegriffen und es erfolgt eine Prüfung. Dabei wird geprüft, ob eine Region ohne hinreichende Informationen eine gleichwertige oder bessere Bewertung der Anforderungen und Kriterien nach §§ 22 bis 24 StandAG erwarten lässt, als dies bei den ermittelten Standortregionen der Fall ist. Bei positiver Prüfung wird im Rahmen des Standortregionenberichts empfohlen, dass das ausgewiesene Gebiet in Phase II anhand eines spezifischen Erkundungsprogramms weiter im Suchprozess verbleibt. Bei negativer Prüfung wird hingegen empfohlen, dass das ausgewiesene Gebiet in Phase II nicht übertägig erkundet wird.

Die Empfehlung über den weiteren Umgang mit einzelnen Gebieten hängt auch maßgeblich von der Eignung der ermittelten Standortregionen bezüglich der bestmöglichen Sicherheit ab. Mit Blick auf die Suche und Auswahl des Standorts mit der bestmöglichen Sicherheit wäre es nicht zielführend, systematisch Gebiete ohne hinreichende Datenlage zu erkunden, wenn für diese Gebiete keine oder nur eine geringe Aussicht besteht, dass sie sich in dem vergleichenden Verfahren am Ende der Phase II durchsetzen können. Grundsätzlich gilt, dass kein Gebiet aufgrund nicht hinreichender Informationen gegenüber Gebieten mit ausreichend Informationen benachteiligt wird. Die Bewertung hinsichtlich der Eignungsfähigkeit dieser Gebiete für einen Endlagerstandort wird einer großen Bedeutung im Rahmen der Umgangsempfehlung der BGE zuteil.

5.2 Herausforderung Internbauprognose Steinsalz „in steiler Lagerung“

Im ersten Schritt des Standortauswahlverfahrens, der Ausweisung von Teilgebieten nach § 13 StandAG, wurde für das Wirtsgestein Steinsalz „in steiler Lagerung“ (Salzstöcke und Salzmauern) ein stratigraphischer Ansatz gewählt. Dies bedeutete konkret, dass die gesamte permische Zechsteingruppe (mit Rotliegendanteilen im Kern der Salzstrukturen) als geologische Abfolge betrachtet wurde, die u. a. mächtige Steinsalzvorkommen als potenziell endlagerrelevantes Wirtsgestein enthält. Dabei blieben die naturgemäß komplexen, internen Verhältnisse der Salzstrukturen zunächst bewusst unberücksichtigt. Für den Schritt 2 der Phase I, der Ermittlung von Standortregionen nach § 14 StandAG, wird der Detailgrad der Betrachtungen erhöht. Ziel ist es, aus den 60 im Wirtsgestein Steinsalz „in steiler Lagerung“ ausgewiesenen Teilgebieten diejenigen zu benennen, welche die günstigsten geologischen Voraussetzungen für eine sichere Endlagerung erwarten lassen. Dabei spielt der interne Aufbau von Salzstrukturen eine wesentliche Rolle, wobei Strukturen mit mächtigen homogenisierten, relative großräumig verfalteteten Steinsalzbereichen vorteilhaft gegenüber Strukturen mit kleinräumig verfaltetetem, komplexem internen Aufbau sind. Mit den aktuell vorliegenden Informationen aus Bohrungen, können nur sehr eingeschränkt Aussagen zum internen Aufbau einer

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

Salzstruktur bzw. eines Teilgebietes getätigt werden. Analogiebetrachtungen können im Rahmen einer sicherheitsgerichteten und vergleichenden Bewertung eine Differenzierung zwischen den Salzstrukturen ermöglichen. Es ist daher notwendig, neben den vorliegenden ortsspezifischen Daten, auch die geologische Entwicklungsgeschichte und andere Faktoren (z. B. Morphologie, Größe) einzubeziehen. Letztere soll zusätzlich dazu dienen, Rückschlüsse auf die Konfiguration der internen Gesteinsabfolgen der Salzstrukturen zu ermöglichen, die allein auf Basis der begrenzten ortspezifischen Daten nicht ermittelbar sind. Im Weiteren werden diese Prozesse oder Faktoren als Indikatoren für den Internbau von Salzstrukturen herangezogen.

5.2.1 Salzstrukturen in Norddeutschland

Salzstrukturen in Deutschland befinden sich im intrakontinentalen Norddeutschen Becken und sind überwiegend durch Gesteinsabfolgen des Zechsteins oder durch eine Kombination (Doppelsalinare) aus Gesteinsabfolgen des Zechsteins und des Rotliegenden aufgebaut. In beiden Strukturtypen sind Teilgebiete im Wirtsgestein „Steinsalz in steiler Lagerung“ ausgewiesen worden. Andere in Deutschland vorkommende Salze spielen bei der Entwicklung von Salzstrukturen eine untergeordnete Rolle (z. B. Muschelkalk-, Oberjura- oder Rötsalze) und wurden nicht als Teilgebiete ausgewiesen.

Die primären Sedimentabfolgen des Zechsteins kennzeichnen zyklische Wechsellagerungen mariner Abfolgen von (Salz-)Tonsteinen, Karbonaten, Sulfaten (Anhydrit, Gips), Steinsalz sowie Kali- und Magnesiumsalzen. In Abhängigkeit von der Beckenposition und den damit verbundenen verschiedenen Ablagerungsbedingungen, variieren Mächtigkeit, Vollständigkeit und Zusammensetzung dieser Abfolgen. Während der letzten ca. 250 Millionen Jahre haben sich diese Ablagerungen durch halokinetische sowie halotektonische Prozesse aus ihrem ursprünglichen Schichtverband gelöst und zu komplexen geologischen Strukturen entwickelt, siehe Abbildung 70 (Jackson & Hudec 2017; Pollok et al. 2020; AkEnd 2002).

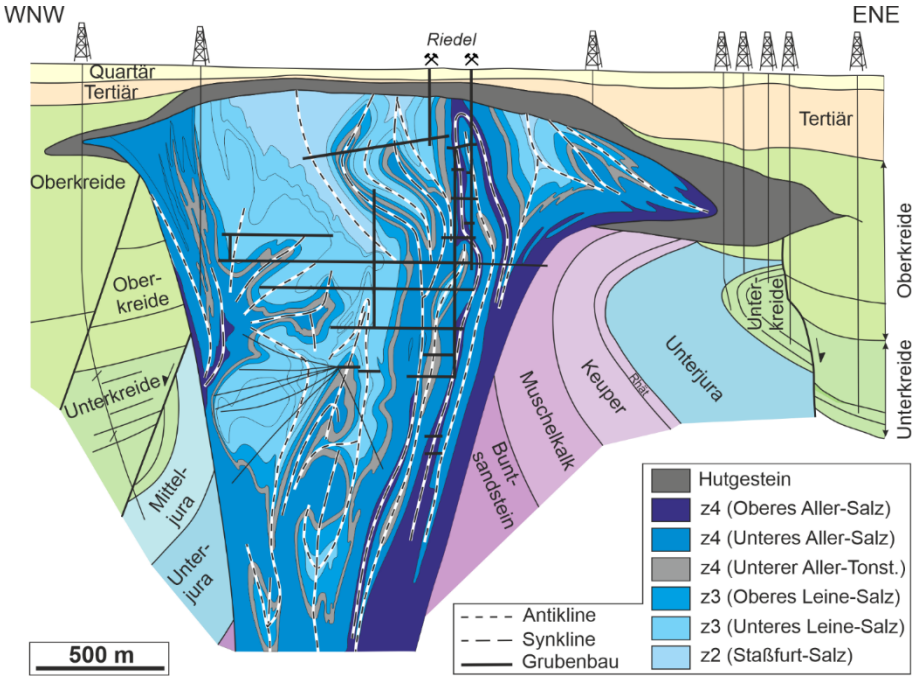


Abbildung 70: Beispiel einer Salzstruktur (Hänigsen-Wathlingen) mit komplexem Internbau. Zu sehen sind Verfaltungen verschiedener geologischer Zechstein-Einheiten. Erkenntnisse zum Internbau stammen aus Bergbauaktivitäten (verändert nach Schachl 1987).

5.2.2 Lithologischer Aufbau der Salzstrukturen mit Wirtsgestein Steinsalz „in steiler Lagerung“

Als Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion, der den einschlusswirksamen Gebirgsbereich aufnehmen kann, werden für die Endlagerung hoch radioaktiver Abfälle mächtige reine Steinsalzabfolgen der Zechstein-Gruppe favorisiert (s. Anhang 6). Diese Anforderung erfüllen vor allem die Steinsalzpartien des sogenannten Hauptsalzes der Staßfurt-Formation. Diese sind durch hohe Mächtigkeiten ihrer ursprünglichen Ablagerung charakterisiert (Abbildung 71) und weisen geringe Gehalte an nichthalitischen Verunreinigungen auf. Dadurch besitzt das Hauptsalz besonders günstige Kriecheigenschaften (z. B. Hunsche et al. 2003; Plischke 2007). In Folge dessen wurden insbesondere diese Steinsalzfolgen halotektonisch mobilisiert und bilden heute häufig den Kern der norddeutschen Salzstrukturen. Im Zuge des Salzaufstiegs wird die primäre Ablagerungsmächtigkeit durch Salzakkumulation weiter erhöht. Die nicht-chloridischen Schichten der basalen Staßfurt-Formation sowie die Salinargesteine der älteren Werra-Formation sind i. d. R. nicht am Aufbau der Salzstrukturen beteiligt. Die jüngeren Salinare der Leine- und Aller-Formation werden beim Salzaufstieg mitgeschleppt und verfaltet (Kockel & Krull 1995). Sie sind vorzugsweise in den Flankenbereichen und dem Top der Salzstrukturen zu finden. Durch tektonische Beanspruchungen können die jüngeren Zechsteinfolgen bis in das Strukturzentrum in Form von Mulden eingefaltet sein (Abbildung 70). Darüber hinaus zeichnen sich die Steinsalzpartien der Leine- und Aller-Formation. im Vergleich zur Staßfurt-Steinsalz durch Zwischenlagen von Anhydrit und Kalisalz aus. Die ursprüngliche Primärmächtigkeit der Steinsalzhorizonte ist deutlich geringer als die der Staßfurt-Formation (Abbildung 71).

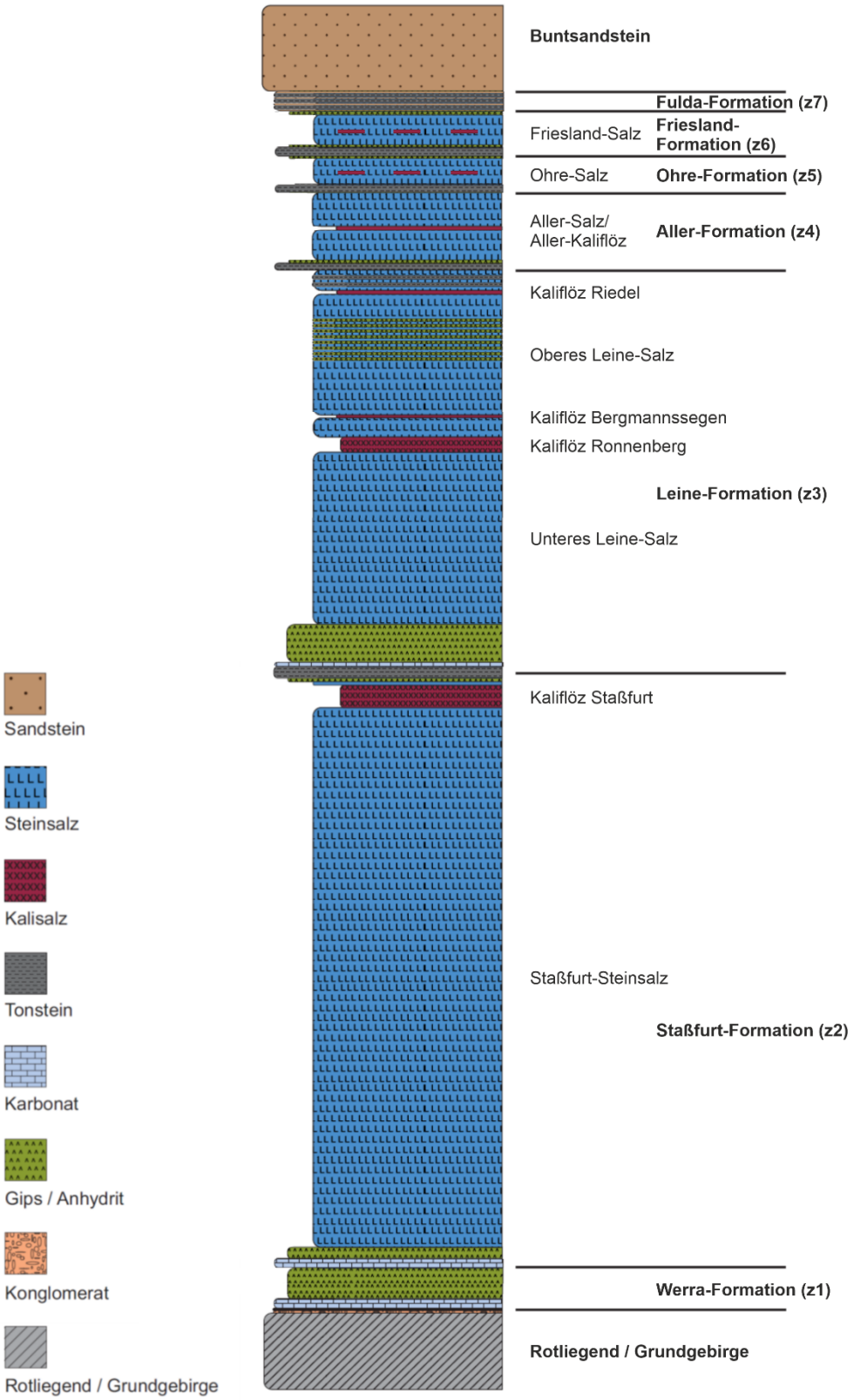


Abbildung 71: Schematisches stratigraphisches Profil des Zechstein im Bereich der Beckenfazies (Elsner 2016)

5.2.3 Charakterisierbarkeit von Salzstrukturen

Der Internbau jeder Salzstruktur ist individuell und nur schwer vorherzusagen. Letzteres begründet sich vor allem in der Tatsache, dass die komplexen, z. T. kleinräumigen Lagerungsverhältnisse durch geophysikalische Erkundungsmethoden von der Oberfläche schlecht abgebildet werden können (Jackson & Hudec 2017). Informationen aus Bohrungen, vor allem in Kombination mit geophysikalischen Messungen (Logs), geben einen detaillierten Einblick in die punktuelle Konfiguration der internen Gesteinsabfolgen. Jedoch liefern sie aufgrund der Komplexität und räumlichen Variabilität der Salzstrukturen keine verlässlichen Informationen in hunderte Meter bis Kilometer Abstand zum Datenpunkt. Detaillierte Informationen liegen meist nur zu Strukturen vor, in welchen Berg-, Kavernenbau betrieben oder ein Erkundungsbergwerk aufgefahren wurde. Diese Strukturen befinden sich durch das Ausschlusskriterium *Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit* (§ 22 Abs. 2 Nr. 3 StandAG) nicht mehr im Auswahlverfahren (Ausnahme: Teile der Struktur Allertal). Die dort gewonnenen Detailinformationen und Erkenntnisse zu den internen Lagerungsverhältnissen können jedoch genutzt werden, um Grundannahmen zu anderen nicht oder weniger untersuchten Salzstrukturen zu treffen. Dies wurde z. B. bereits in den InSpEE-Studien der BGR (von Goerne et al. 2016; Fleig & Röhling 2020) zur Potenzialabschätzung für die Errichtung von Salzkavernen gemacht. Insgesamt wurden dort sieben Internbautypen für aus permischen Evaporiten aufgebaute Salzstrukturen definiert.

Abbildung 72 zeigt beispielhaft, wie gering der Informationsgehalt zum Internbau der Salzstruktur Bahlburg und damit des Teilgebietes in einem seismischen 2D-Profil (aus dem Jahr 1985) ist, u. a. auch, weil hier das damalige Erkundungsziel nicht die Abbildung der Salzstruktur selbst war. Im Rahmen des fortschreitenden Standortauswahlverfahrens (§§ 15 und 16 StandAG) wird die BGE eigene Erkundungskampagnen durchzuführen. So können in Zukunft mit speziell angepassten Erkundungsmethoden die Salzstrukturen und in Teilen auch der Internbau besser abgebildet werden.

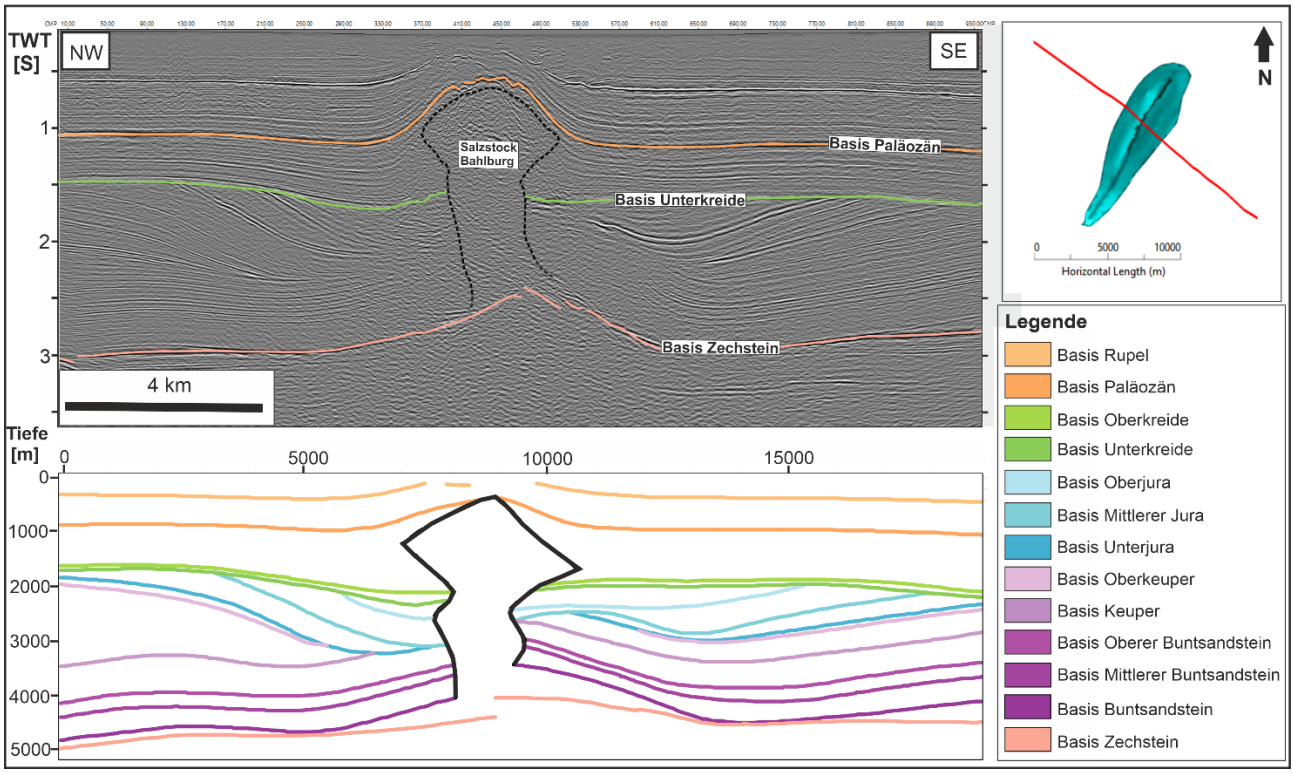


Abbildung 72: Seismisches Profil in Zeit [Zwei-Wege Laufzeit, TWT] mit einigen Interpretationen (oben) und einem geologischen Profilschnitt (in Tiefe) an gleichem Ort aus dem 3D-Modell TUNB (BGR 2021) (unten) über das GzME „Salzstock Bahlburg“. Die Lage der Profile ist durch die rote Linie oben rechts gekennzeichnet.

5.2.4 Internbauprognose

Neben der zielgerichteten Auswertung vorhandener ortsspezifischer Seismik- und Bohrinformationen bzgl. der Charakterisierung von Salzstrukturen hinsichtlich ihres Internbaus, wird in Schritt 2 der Phase I eine Methodik zur Prognose des Internbaus bzw. vielmehr der Komplexität des Internbaus entwickelt. Dazu werden geologische Prozesse und Faktoren analysiert, die Rückschlüsse ermöglichen sollen, inwiefern eine Salzstruktur das Potenzial hat, große homogene Steinsalzbereiche mit geringer Komplexität der Lagerungsverhältnisse aufzuweisen. Folgende Indikatoren werden hinsichtlich ihrer Korrelation bzw. ihres Einflusses auf den Internbau auf Basis vorliegender Daten detailliert beschrieben:

- Genese der Salzstruktur (inkl. tektonischer Überprägung) und Lage der Salzstruktur innerhalb des Norddeutschen Beckens,
- strukturaufbauende Ausgangsgesteine,
- Gesamtgröße sowie
- Morphologie der Salzstrukturen.

Durch die integrative Analyse und Bewertung dieser (und ggf. weiterer) Indikatoren sollen die Teilgebiete im Wirtsgestein Steinsalz „in steiler Lagerung“ in Klassen eingeordnet werden, die eine unterschiedliche interne Komplexität erwarten lassen. Die dabei (durch die BGE) anzuwendende Methode soll mit der BGR gemeinsam entwickelt werden und stellt eine Weiterentwicklung der bereits in den InSpEE-Studien (von Goerne et al. 2016; Fleig & Röhling 2020) vorgenommenen Internbaukategorisierung dar. Anhand des entwickelten Vorgehens werden alle Teilgebiete im Wirtsgestein Steinsalz „in steiler Lagerung“ im Rahmen der Geosynthese (nach § 5 EndlSiUntV) hinsichtlich ihres zu erwartenden Internbaus und des Potenzials mächtige homogene Steinsalzbereiche aufzuweisen beschrieben.

5.2.5 Indikatoren für die Internbauprognose

Nachfolgend werden einige der Indikatoren, welche für die Entwicklung einer Methode zur Internbauprognose analysiert werden, aufgeführt und kurz beschrieben. Wie die einzelnen Indikatoren gewichtet und zu einer stimmigen Gesamtprognose zusammengeführt werden, ist Gegenstand aktueller Arbeiten.

5.2.5.1 Genese der Salzstruktur (inkl. tektonischer Überprägung) und die Lage innerhalb des Norddeutschen Beckens

Die Genese der Salzstrukturen ist eng an die Entwicklungsgeschichte des Norddeutschen Beckens gebunden. Die verschiedenen Entwicklungsphasen des Beckens oder Teile dessen (z. B. Rifting-, Einengungs- oder Senkungsphasen) haben einen direkten Einfluss auf die Genese, die äußere Form und wahrscheinlich die inneren Lagerungsverhältnisse der Salzstrukturen (z. B. Jackson & Hudec 2017; Pollok et al. 2020). Beispielsweise werden Bewegungsphasen in Norddeutschland als Auslöser für die Initiierung der Salzbewegungen und für die fortschreitende Genese der Salzstrukturen gesehen (siehe Abbildung 73 und Warsitzka et al. (2019)).

Ziel ist es, die Genese der Salzstrukturen im Kontext mit der parallel stattfindenden Beckenentwicklung zu rekonstruieren. Beispielsweise könnten Regionen mit besonders hoher tektonischer Beanspruchung identifiziert, kartographisch abgebildet und mit den dort befindlichen Salzstrukturen verknüpft werden. Wie die einzelnen Bewegungsphasen die Komplexität des Internbaus der Salzstrukturen beeinflussen, ist Teil der Prognose-Entwicklung.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

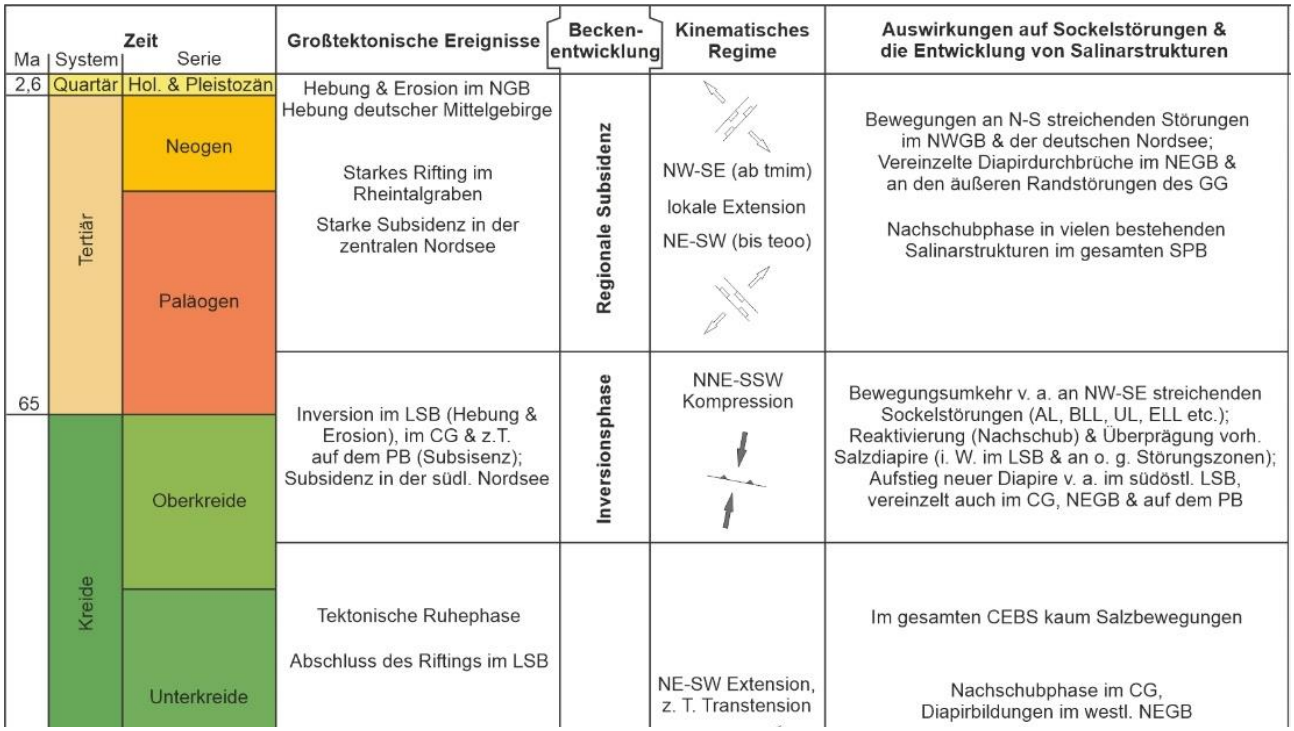


Abbildung 73: Ausschnitt einer zeitbezogenen Zusammenstellung der großtektonischen Ereignisse und Auswirkung unterschiedlich orientierter Stressfelder auf die Beckenentwicklung sowie die Genese von Salzstrukturen in Norddeutschland und der deutschen Nordsee (Auszug aus Pollok et al. 2020).
Abkürzungen: AL: Allertal-Lineament, BGB: Braunschweig-Gifhorn-Bruchzone, BLL: Bremen-Leer-Lineament, CEBS: Zentraleuropäisches Beckensystem, CG: Zentral-Graben, DS: Diapirstadium, EG: Ems-Graben, EL: Ems-Lineament, ELL: Elbe-Lineament, EKL: Emtinghausen-Krautsand-Lineament, GG: Glückstadt-Graben, HG: Horn-Graben, LSB: Niedersächsisches Becken, NEGB: Nordostdeutsches Becken, NWGB: Nordwestdeutsches Becken, NGB: Norddeutsches Becken, PB: Pompeckj-Block, SB: Subherzynes Becken, SPB: Südliches Permbecken, UL: Uelzen-Lineament.

5.2.5.2 Strukturaufbauende Ausgangsgesteine

Die Beckenposition (siehe Kapitel 5.2.5.1) beeinflusst auch die Zusammensetzung und Mächtigkeit der Ausgangsgesteine, d. h. der Gesteinsabfolgen, die am Aufstiegsprozess beteiligt waren und in den Salzstrukturen enthalten sind. Somit variieren die Mengenanteile an für die Ausweisung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs geeigneten (Steinsalz) und nicht nutzbaren (z. B. Kalisalz, Anhydrit) Gesteinsabfolgen in der Salzstruktur. Es kann angenommen werden, dass in Räumen mit mächtigen primären Ablagerungen von Steinsalz (500m bis 600 m beckenzentral, Balzer et al. 2020) auch große Mengenanteile Steinsalz in den Salzstrukturen akkumuliert sind.

Ziel für diesen Indikator ist, jene Räume im Norddeutschen Becken zu identifizieren, welche mächtige primäre Steinsalzablagerungen aufgewiesen haben, und diese mit den existierenden Salzstrukturen zu verknüpfen, z. B. mit Hilfe von paläogeographischen Karten. In Beckenrandlagen ist faziell mit einer Verringerung der primären Steinsalzmächtigkeiten zu rechnen.

5.2.5.3 Größe der Salzstruktur

Vor allem die mächtigen, reinen und gut mobilisierbaren Steinsalzanteile (Steinsalz reagiert unter Druckbelastung plastisch) der primären Ablagerungssequenzen der Zechstein-Gruppe sind an der Strukturbildung beteiligt. Somit wird ein möglicher Zusammenhang zwischen dem Gesamtvolumen einer Salzstruktur und dem Volumen von zusammenhängenden Homogenbereichen von Steinsalz geprüft. Dieser Indikator sagt hingegen wenig darüber aus, wie komplex die aktuellen Lagerungsverhältnisse sind bzw. wie hoch der Grad der Verfaltung von Steinsalz mit z. B. Anhydrit oder Kalisalzen ist.

Daher ist dieser Indikator gekoppelt mit den Indikatoren *strukturaufbauende Ausgangsgesteine* (Kapitel 5.2.5.2) und *Beckenposition* (Kapitel 5.2.5.1) zu betrachten.

5.2.5.4 Morphologie der Salzstrukturen

Die Morphologie (äußere Gestalt) von Salzstrukturen wurde bereits im Bericht des AkEnd (2002) als geowissenschaftliches Abwägungskriterium für Steinsalz „in steiler Lagerung“ diskutiert. Basierend auf Erfahrungen aus dem Kavernen- und Bergbau wurde eine Beziehung zwischen der äußeren Form und der Komplexität der internen Verhältnisse hergeleitet, wobei große ovale Strukturen eine geringere Komplexität aufweisen sollen und kleine rundliche bzw. schmale gestreckte Salzstrukturen eine höhere Komplexität. Auch nach Bornemann et al. (2008) bestehen Abhängigkeiten zwischen der äußeren Form der Salzstruktur und der Intensität der internen Verfaltung (Komplexität). Im Rahmen der Erarbeitung einer Internbauprognose wird geprüft, in wie weit dieser phänomenologische Zusammenhang gültig ist und für die Internbauprognose herangezogen werden kann.

5.3 Geowissenschaftliche Langzeitprognose – Beschreibung geogener Prozesse

Die geologischen Verhältnisse einer Region sind das Ergebnis des Wirkens einer Vielzahl geologischer Prozesse, die fortwährend mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten und Intensitäten zur heutigen Gestalt des geologischen Baus einer Region geführt haben. In der geowissenschaftlichen Langzeitprognose werden diese Prozesse als geogene Prozesse zusammengefasst. Sie werden so von den technogenen Prozessen abgegrenzt (siehe Kapitel 1.2.2. und Kapitel 8) und umfassen sowohl endogene Prozesse wie Magmatismus und Tektonik als auch exogene Prozesse wie z. B. glaziale Erosion.

Für die Langzeitsicherheit eines Endlagers werden Standorte bevorzugt, in denen geologische Prozesse die heutigen geologischen Verhältnisse mitsamt ihren sicherheitsrelevanten Eigenschaften über den Nachweiszeitraum der nächsten eine Million Jahre möglichst wenig ändern werden. Als Grundlage dazu wird in der geowissenschaftlichen Langzeitprognose analysiert, welche geologischen Prozesse in der Vergangenheit aufgetreten sind und wie diese voraussichtlich im Bewertungszeitraum von einer Million Jahren in einem Gebiet auftreten werden (Prognose). Dabei liegt der Fokus auf den geogenen Prozessen, die zu einer Änderung von sicherheitsrelevanten Eigenschaften führen können. In den rvSU betrifft dies insbesondere geogene Prozesse, die das Potenzial haben, die Funktionsfähigkeit der geologischen Barriere zu beeinträchtigen. Die geogenen Einwirkungen

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

auf das Endlagersystem und deren Auswirkung auf den sicheren Einschluss werden anschließend in der Analyse des Endlagersystems (§ 7 EndlSiUntV) bewertet (siehe Kapitel 8).

In der Bearbeitung wird – auf Grundlage der Kenntnisse über das Auftreten und Wirken des jeweiligen Prozesses in der Vergangenheit und dem Aktualitätsprinzip folgend – in einer Prognose bewertet, ob der Prozess auch in Zukunft auftreten wird. Dies setzt voraus, dass die Ursachen bzw. die geologischen Rahmenbedingungen, die dem Prozess zugrunde liegen, weitgehend bekannt sind und potenziell auftretende Veränderungen im Nachweiszeitraum und die damit verbundenen Änderungen hinsichtlich des Prozesses zu beschreiben sind.

Geowissenschaftliche Langzeitprognosen wurden bisher in der Regel als Bestandteil des Sicherheitsnachweises einzelner Endlagerstandorte durchgeführt (z. B. Mrugalla 2011). Eine geowissenschaftliche Langzeitprognose, die im Rahmen der Standortsuche erstellt wird, fordert einen Ansatz, der eine räumlich differenzierte Betrachtung und Bewertung der geogenen Prozesse erlaubt. In Anbetracht der großen Flächen, die in Schritt 2 der Phase I betrachtet werden, erfolgt die Erstellung und Analyse in einem mehrstufigen Prozess, bei der sich die Detailtiefe der geowissenschaftlichen Langzeitprognose mit abnehmender Größe der zu betrachtenden Fläche im Laufe der Arbeiten kontinuierlich erhöht. Dies bedeutet, dass die relevanten Prozesse zunächst übergeordnet, deutschlandweit oder Untersuchungsraum-übergreifend, beschrieben und analysiert werden, um in der ortsspezifischen Ausprägung der Prozesse in den Geosynthesen des Untersuchungsraums bzw. den spezifischen Geosynthesen der Teiluntersuchungsräume gezielt integriert zu werden.

Die Ergebnisse und Informationen, die im Rahmen der Arbeiten zur geowissenschaftlichen Langzeitprognose entstehen, dienen zum einen als Grundlage für die Analyse des Endlagersystems nach § 7 Abs. 6 EndlSiUntV. Zum anderen kann bei der zielgerichteten Anwendung einzelner Mindestanforderungen und Ausschlusskriterien auf Erkenntnisse aus der geowissenschaftlichen Langzeitprognose, die auf die Nicht-Erfüllung einer Mindestanforderung bzw. auf die Erfüllung eines Ausschlusskriteriums hinweisen, zurückgegriffen werden. Zum Beispiel werden Prozesse wie magmatische und vulkanische Aktivität oder Erosion in der geowissenschaftlichen Langzeitprognose betrachtet, was zur Erfüllung des Ausschlusskriteriums „Vulkanismus“ oder der Nicht-Erfüllung der Mindestanforderung „Erhalt der Barrierewirkung“ führen kann (siehe Kapitel 5.4.4 und 0).

Geowissenschaftliche Prozesse, die im Rahmen der Langzeitprognose betrachtet werden, ergeben sich aus dem IFEP-Katalog der OECD-NEA (Capouet et al. 2019), dessen Umfang auf nicht-technische sowie auf die Erfordernisse der rvSU reduziert wurden (siehe Kapitel 8). Die folgende Liste zeigt eine Auswahl von geogenen Prozessen, die in der geowissenschaftlichen Langzeitprognose berücksichtigt werden (siehe Beispiel 34).

Beispiel 34: Auswahl von geogenen Prozessen, die in der geowissenschaftlichen Langzeitprognose berücksichtigt werden

Auswahl von geogenen Prozessen, die in der geowissenschaftlichen Langzeitprognose berücksichtigt werden

Transgression/Regression

Veränderungen in der Position der Küstenlinie werden als Transgression bezeichnet, wenn sich die Küstenlinie landeinwärts verschiebt, während die entgegengesetzte Verschiebung der Küstenlinie als Regression bezeichnet wird. Verlagerungen der Küstenlinie werden durch unterschiedliche Prozesse hervorgerufen und reichen von eustatischen Meeresspiegelschwankungen bis hin zu Vertikalbewegungen der Lithosphäre oder verstärkter Sedimentation in küstennahen Mündungsbereichen. Als sicherheitsrelevanter Faktor können sich durch Regressions- bzw. Transgressionsprozesse hervorgerufene Änderungen der Spannungszustände ergeben, die durch die Änderung der Auflast durch die Ablagerung von Sedimenten und der Wassersäule selbst entstehen können.

Magmatische und vulkanische Aktivität

Magmatismus ist ein Sammelbegriff für alle Vorgänge und Bildungen, die im Zusammenhang mit aus dem Erdmantel oder aus tieferen Bereichen der Erdkruste aufsteigendem Magma stehen. Unter Magmen versteht man nach Murawski & Meyer (2010) Massen teilweise oder vollkommen geschmolzener Silikate mit gelösten Gasen, die – aus der Tiefe aufsteigend – entweder in die Gesteine der Erdkruste eindringen und dort zur Erstarrung kommen (Intrusion) oder bis zur Erdoberfläche gelangen und dort ausfließen (Effusion) oder auch ausgeschleudert werden (Ejektion). Außerdem ist mit dem Magmaaufstieg eine Veränderung der Wärmestromdichte verbunden, wodurch sich das Temperaturfeld im Untergrund verändert und dadurch weitere Prozesse ausgelöst werden können. Dazu gehört z. B. die wärmebedingte Änderung von Gesteinseigenschaften und von Grundwasserfließrichtungen. Unterschieden werden beim Magmatismus intrusive und extrusive Vorgänge, bei denen es sich um in der Tiefe erstarrte oder bis an die Oberfläche vorgedrungene Magmen handelt. Intrusive Bildungen werden als Plutonite und die damit verbundenen Vorgänge als Plutonismus bezeichnet, extrusive als Vulkanite und die entsprechenden Vorgänge als Vulkanismus. Magmatismus wird entlang von Plattengrenzen z. B. bei der Orogenese oder der Grabenbildung beobachtet. Außerdem können auch tief reichende seismisch aktive Schwächezonen das Auftreten von Magmatismus begünstigen.

Die Intrusion von Magmenkörpern hat in dessen Umfeld einen starken Einfluss auf hydrothermale Aktivitäten und Prozesse. Des Weiteren stehen magmatische Intrusionen in der Oberen Kruste häufig im Zentrum hydrothermaler Aktivität. Bei den hydrothermalen Lösungen handelt es sich um Restlösungen aus der auskristallisierten Gesteinsschmelze oder um im Nebengestein vorhandene Lösungen (ursprünglich oberflächennahes Grundwasser, Meerwasser, Formationswässer oder metamorphe Wässer), die durch den Wärmetransport im Umfeld des Magmakörpers erhitzt wurden. Die heiße Intrusion treibt dabei die Konvektion hydrothermaler

Auswahl von geogenen Prozessen, die in der geowissenschaftlichen Langzeitprognose berücksichtigt werden

Fluide in den umgebenden Gesteinen an. Durch Wärme- und Massentransport in diesen Systemen können bedeutende Lagerstätten sowie Geothermalressourcen entstehen. Dringen Lösungen mit hohen Temperaturen bis dicht an die Oberfläche, können sie auch in Form von heißen Quellen oder Geysiren austreten. Beispiele dafür finden sich vor allem auf Island und in Deutschland im Bereich der Eifel. Aufgrund des hohen Mineralgehaltes dieser Wässer können durch Wechselwirkungen sowohl lokal die Gesteinseigenschaften des Gebirges als auch die hydrochemischen Verhältnisse in den Gesteinsschichten verändert werden (vgl. dazu auch Mrugalla 2014).

Aufgrund des Ausschlusskriteriums „Vulkanismus“ (§ 22 StandAG) sind alle Gebiete, in denen quartärer Vulkanismus auftrat, im ersten Schritt der Phase I bereits mit einem pauschalen Sicherheitsabstand von 10 km um das Eruptionszentrum ausgeschlossen worden. Tiefergehende Betrachtungen, zum Beispiel auf Grundlage des Forschungsprojektes „Vulkanische Gefährdung in Deutschland“ (Schreiber & Jentzsch 2021), welches angepasste Sicherheitsabstände um aktive Eruptionszentren definiert und die Prognose einer erneuten Aktivität der tertiären Vulkanfelder in Deutschland bewertet, werden im Rahmen der geowissenschaftlichen Langzeitprognose berücksichtigt. Sofern neue Eruptionszentren identifiziert werden, die mit hoher Wahrscheinlichkeit im Nachweiszeitraum als aktiv einzustufen sind, oder weitere Flächen durch den erweiterten Sicherheitsabstand um bestehende Eruptionszentren betroffen sind, wird in den betroffenen Bereichen das Ausschlußkriterium „Vulkanische Aktivität“ als erfüllt angesehen und angewendet. Präquartärer Vulkanismus, dessen Wiederaufleben im Nachweiszeitraum unwahrscheinlich, aber nicht vollständig auszuschließen ist, kann im Rahmen der Arbeiten zur Analyse des Endlagersystems in § 7 EndlSiUntV berücksichtigt werden.

Diagenese

Diagenese ist die – z. B. durch Druck- und Temperaturänderungen, chemische Lösung sowie Ausfällung – lang- oder kurzfristig ablaufende Umbildung lockerer Sedimente zu festen Sedimentgesteinen (Murawski & Meyer 2010). Diese Verfestigung pelitischer Lockersedimente umfasst i. d. R. die Prozesse Kompaktion inkl. Entwässerung, Zementation, Stoffdiffusion (inkl. Fluidbewegungen), Mineralneu- bzw. -umbildung (Alteration, Authigenese, Verdrängung, Kristallisation), Lösung, Hydratation von Mineralen und bakterielle Aktivitäten. Bei dieser Umbildung ändern sich abhängig vom Sedimenttyp und der Intensität der Diagenese auch Eigenschaften wie Permeabilität, Porosität, Festigkeit und Wärmeleitfähigkeit. Eine einsetzende Diagenese könnte demnach unterschiedlichste sicherheitsrelevante Eigenschaften der Gesteine im Endlagerbereich verändern.

Auswahl von geogenen Prozessen, die in der geowissenschaftlichen Langzeitprognose berücksichtigt werden

Erosion

Erosionsprozesse können die obere Geosphäre durch lineare oder flächenhafte Abtragung beeinflussen. Abgesehen von Gebieten, die von langanhaltender Subsidenz und Sedimentation geprägt sind, sind alle Regionen Deutschlands in unterschiedlichen Maße von Erosionsprozessen betroffen. Die Intensität der Erosion wird dabei von vielen unterschiedlichen Faktoren gesteuert und ist das Ergebnis der Wechselwirkungen der jeweiligen lokalen und regionalen Ausprägung dieser Faktoren. Maßgeblich sind exogene Einflüsse wie klimatische Faktoren (z. B. Niederschlags- und Temperaturverhältnisse), die Entwicklung und Dynamik des Gewässernetzwerkes (z. B. Stream Piracy), aber auch endogene Faktoren wie großräumige Vertikalbewegungen durch manteldynamische Prozesse sowie tektonische Prozesse. Die Vielzahl an Faktoren mit Einfluss auf das lokale Erosionsgeschehen macht deutlich, dass Informationen über die Ausprägung einzelner Faktoren nur eingeschränkt Rückschlüsse auf die resultierenden Erosionsraten geben können, insbesondere da alle Faktoren miteinander in Wechselwirkung stehen. Daher sind zur Bestimmung des Erosionsgeschehens in der Regel direkte Erosionsratenmessungen, z. B. über Flussterrassen, Sedimentflussfracht oder analytische Methoden wie die Analyse von kosmogenen Nukliden notwendig. Da diese Informationen bisher in Deutschland nur sehr vereinzelt und eingeschränkt vorliegen, ist eine ortsspezifische Bewertung von Erosionsvorgängen und der im Nachweiszeitraum zu erwartenden Gesamterosionsbeträge bisher nicht flächendeckend möglich. Diese sollen mit einem Forschungsprojekt (BGE 2021f) flächendeckend erhoben werden und unter Berücksichtigung verschiedener zukünftiger Klimaszenarien, eine realistische Abschätzung der zukünftig zu erwartenden Erosionsbeträge hergeleitet werden. Die Ergebnisse können dann je nach lokaler Ausprägung der zu erwartenden Erosionsbeträge, zu einer Nichterfüllung der Mindestanforderung führen. Wenn beispielsweise Hinweise vorliegen, dass Erosionsvorgänge zur Freilegung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs führen, dann erscheint der Erhalt der Barrierewirkung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs zweifelhaft (Mindestanforderung 5, Erhalt der Barrierewirkung) (Kapitel 5.4.4). Dies kann auch durch Dekompaktion und der damit verbundenen Erhöhung der Gebirgsdurchlässigkeit der Wirtsgesteinsformation infolge einer verstärkten Abtragung des Deckgebirges in Kristallin und Tongestein auftreten.

Eine Sonderform der Erosion sind glaziale Rinnen. Diese entstehen durch glaziale Schmelzwässer, die an der Basis des Gletschers in Richtung der Gletscherfront entwässern und sich durch das hohe hydraulische Potenzial tief in den Untergrund einschneiden können. Aufgrund der damit verbundenen hohen Relevanz für die Standortsuche wurden Forschungsprojekte initiiert, die sowohl die Genese von glazialen Rinnen untersuchen als auch die bei zukünftigen Vereisungsphasen zu erwartende ortsabhängige Tiefenwirkung von glazialen Rinnen analysieren (BGE 2021e).

Auswahl von geogenen Prozessen, die in der geowissenschaftlichen Langzeitprognose berücksichtigt werden

Subrosion

Subrosion beschreibt die durch Grundwässer hervorgerufene Ablaugung von wasserlöslichen Gesteinen, was insbesondere leichtlösliche Salzgesteine, aber auch Sulfate und Karbonate betrifft. Verschiedene Faktoren wie die lokalen hydrogeologischen Verhältnissen und der Chemismus des Grundwassers, aber auch klimatische Änderungen und tektonische Prozesse beeinflussen Subrosionsprozesse an Salinargesteinen. Die mit den Subrosionsvorgängen verbundene Volumenreduzierung, kann entweder direkt auf die Mächtigkeit oder Ausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs salinarer Wirtsgesteine in flacher oder steiler Lagerung wirken oder indirekt durch die bruchhafte Deformation des überlagernden Deckgebirges. Derartige Deformationsstrukturen werden als atektonische Vorgänge durch das Ausschlusskriterium aktive Störungszonen berücksichtigt.

Die Auswirkungen von Subrosion auf die Barrierewirkung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und des Deckgebirges eines potenziellen Endlagerstandorts für hochradioaktive Abfälle, sollen in einem Forschungsprojekt untersucht werden. In dem Projekt soll eine systematische Zusammenstellung aller potenziell subrosionsgefährdeten stratigraphischen Einheiten in Deutschland mit einer Einschätzung zur Prognose von Subrosionsvorgängen für die nächsten 1 Million Jahre erfolgen. Weiterhin sollen erwartbare Subrosionsraten an Salzstöcken hergeleitet werden und eine numerische Modellierung der hydrologischen und hydrochemischen Reaktionen, die zur Subrosion führen, erfolgen.

Salzdiapirismus

Unter Diapirismus wird das Aufdringen von Salzgesteinen aus tiefen Gebirgsbereichen verstanden, bei dem das Deckgebirge durchbrochen wird und steilstehende Salzstrukturen (Salzstöcke oder -mauern) entstehen. Voraussetzungen für diesen Vorgang sind eine ausreichende Mächtigkeit von primär abgelagertem, mobilisierbarem Salzgestein, ein ausreichender Überlagerungsdruck, der von jüngeren Gesteinen mit höherer Dichte erzeugt wird und das Vorhandensein von Schwächezonen im Deckgebirge. In vielen Fällen wurden auch Störungen im präsalinaren Sockel nachgewiesen, deren Bewegungen den Salzaufstieg auslösten.

Durch Salzdiapirismus entstehen – im Falle des Wirtsgesteinstyps Steinsalz „in steiler Lagerung“ und in schwächerer Form auch im Typ Steinsalz „in flacher Lagerung“ – einerseits Auswirkungen im Wirtsgestein durch das Wirtsgestein selbst (der den einschlusswirksamen Gebirgsbereich bildende Salzstock verändert sich durch den Salzdiapirismus selbst). Andererseits können die Auswirkungen von Salzdiapirismus benachbarte nichtsalinare Wirtsgesteine (Tongestein und kristallines Wirtsgestein) hinsichtlich Mächtigkeit, Ausdehnung und Gebirgsdurchlässigkeit beeinträchtigen.

5.4 Beschreibung des Wirtsgesteinsbereichs mit Barrierefunktion in Hinblick auf die zielgerichtete Anwendung der Mindestanforderungen

Ein wichtiger Bestandteil der Geosysnthese ist die Beschreibung des Wirtsgesteinsbereiches mit Barrierefunktion, der einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich aufnehmen kann (Endlagersystem Typ 1, siehe auch Kapitel 4.1.3.2). Für das kristalline Wirtsgestein ist darüber hinaus auch ein wesentlich auf technischen oder geotechnischen Barrieren beruhendes Endlagersystem möglich (Endlagersystem Typ 2, siehe auch 4.1.3.2). Ziel ist eine möglichst konsistente Darstellung der geowissenschaftlichen Gegebenheiten, welche z. B. die Mächtigkeit, Raumlage, Lithologie, sowie eine strukturgeologische Beschreibung der jeweiligen Wirtsgesteinsformation beinhaltet. Darauf basierend können für Wirtsgesteinsbereiche mit Barrierefunktion einzelne Mindestanforderungen überprüft werden. Wenn eine dieser Mindestanforderung gemäß § 23 Abs. 5 Nr. 1 bis 5 StandAG nicht erfüllt ist, dann ist das Gebiet nicht als Endlagerstandort geeignet. Hierbei ist anzumerken, dass die Erfüllung der Mindestanforderungen im Schritt 2 der Phase I nur zielgerichtet (siehe Kapitel 1.4.1) und nicht nur im Rahmen der Geosynthese, sondern auch in den nachfolgenden Arbeiten der rvSU geprüft wird.

Für eine der Geosynthese angemessene Beschreibung des Wirtsgesteinsbereiches mit Barrierefunktion sollten nach Möglichkeit gebietsspezifische Informationen verwendet werden. Für die geowissenschaftliche Bewertung in Schritt 2 der Phase I ist es stellenweise notwendig, Daten großräumig zu betrachten, um Interpretationen und Modelle zu validieren und zu erstellen. Daher müssen in diesem Schritt des Verfahrens auch Daten einbezogen werden, die sich außerhalb der Untersuchungsräume befinden, sobald eine geowissenschaftliche Relevanz dieser Daten erkennbar ist.

Im Schritt 1 der Phase I wurden im gesamten Bundesgebiet stratigraphische Einheiten inventarisiert, welche über ein potenzielles Wirtsgestein mit Barriereeigenschaften verfügen. Auf diese stratigraphischen Einheiten, in welchen alle Gesteinstypen eines bestimmten Zeitabschnitts der Erdgeschichte zusammenfasst sind, wurden die Mindestanforderungen gemäß § 23 Abs. 5 Nr. 1 bis 5 StandAG angewendet. Im Schritt 2 der Phase I wird der Detailgrad grundsätzlich erhöht, indem endlagerrelevante lithologische Einheiten innerhalb der in den Teilgebieten ausgewiesenen stratigraphischen Einheiten identifiziert werden, z. B. einzelne Steinsalz- oder Tongesteinsformationen. Danach können Abfolgen ausgewiesen und bearbeitet werden, die die Ansprüche an die Barrierewirkung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs voraussichtlich erfüllen. Grundlage für die Ausweisung und Anwendung der Mindestanforderungen gemäß lithologischem Ansatz sind die Wirtsgesteinsdefinitionen der drei gemäß § 23 Abs. 1 StandAG für die Endlagerung in Betracht kommenden Wirtsgesteine Steinsalz, Tongestein und Kristallingestein (siehe Definition der Wirtsgesteine, Anhang 6).

Der lithologische Ansatz kann insbesondere bei der Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ (§ 23 Abs. 1 Nr. 2 StandAG) zu einer deutlichen Eingrenzung der Gebiete führen. Im Folgenden wird das Vorgehen und die in Kapitel 1.4.3 angeführte weiterentwickelte Anwendung der Mindestanforderungen im Einzelnen beschrieben. Für die Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ (§ 23 Abs. 1 Nr. 1 StandAG) werden ortsspezifische Informationen einbezogen, sofern diese vorliegen. Die Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ (§ 23 Abs. 1

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

Nr. 4 StandAG) wird auf Basis der bereits in § 13 StandAG von der BGE verwendeteten Werte angewendet und kann unter Berücksichtigung der im Rahmen der Analyse des Endlagersystems ermittelten Flächenbedarfe spezifiziert werden.

5.4.1 Mindestanforderung „Mächtigkeit“

Die Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ ist in § 23 Abs. 5 Nr. 2 StandAG definiert: „*der Gebirgsbereich, der den einschlusswirksamen Gebirgsbereich aufnehmen soll, muss mindestens 100 Meter mächtig sein; bei Gesteinskörpern des Wirtsgesteins Kristallin mit geringerer Mächtigkeit kann der Nachweis des sicheren Einschlusses für den betroffenen Gebirgsbereich bei Vorliegen geringer Gebirgsdurchlässigkeit auch über das Zusammenwirken des Wirtsgesteins mit geotechnischen und technischen Barrieren geführt werden; eine Unterteilung in mehrere solcher Gebirgsbereiche innerhalb eines Endlagersystems ist zulässig*“.

Zur Überprüfung der Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ wurden im Schritt 1 der Phase I mindestens 100 m mächtige stratigraphische Einheiten identifiziert, welche die Wirtsgesteine Steinsalz, Tongestein oder kristallines Wirtsgestein in ausreichender Mächtigkeit enthalten könnten. Sofern es die Datenlage oder Analogieschlüsse zulassen, sollen im Schritt 2 der Phase I mindestens 100 m mächtige lithologische Einheiten der Wirtsgesteine Steinsalz, Tongestein oder kristallines Wirtsgestein gemäß der Wirtsgesteinsdefinitionen ausgewiesen werden (siehe Kapitel 5). Das Kriterium wird von heterogenen Schichtfolgen, welche nur kumuliert eine Mächtigkeit über 100 m erreichen, nicht erfüllt (z. B. eine Abfolge aus 50 m Tongestein und 50 m Steinsalz oder eine Abfolge aus 50 m Steinsalz, 10 m Kalisalz und 50 m Steinsalz). Aufgrund von Diskontinuitäten in diesen heterogenen Schichtfolgen, d. h. Schichtgrenzen, welche als potenzielle hydraulische und geomechanische Schwächezonen sowie potenzielle Wegsamkeiten für Fluide infrage kommen, kann ein einschlusswirksamer Gebirgsbereich nicht mit Sicherheit ausgewiesen werden. Die Mindestanforderung wird daher nur in homogenen und mindestens 100 m mächtigen Gesteinsformationen, die einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich aufnehmen können, erfüllt (vgl. Hoth et al. 2007 für Tongesteinsformationen; Fischer-Appelt et al. 2013 für Steinsalz in steiler Lagerung; und Völkner et al. 2017 für Steinsalz in flacher Lagerung).

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

5.4.2 Beispiele zur Überprüfung der Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“

Im Folgenden werden Beispielanwendungen für die Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ anhand der GzME „Thüringer Becken“ (Beispiel 35), „Opalinuston“ (Beispiel 36) und „Saxothuringikum“ (Beispiel 37) gezeigt.

Beispiel 35: Darstellung des Wirtsgesteinsbereiches mit Barrierefunktion und Überprüfung der Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ im GzME „Thüringer Becken“ (03_00UR)

Beispiel GzME „Thüringer Becken“ (03_00UR)

Für die erweiterte Anwendung der Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ wird ein Kumulieren der Steinsalz-Mächtigkeiten über mehrere Steinsalz-Formationen hinweg ausgeschlossen. Somit wird nach mindestens 100 m mächtigen Steinsalzhorizonten gesucht, die zu einer spezifischen Steinsalzformation gehören (s. Anhang 6 und Popp (2022)).

Zur Überprüfung der Erfüllung der Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ bezogen auf den Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion wurden die vorliegenden Informationen aus Bohrungen, Mächtigkeitskarten und Profilschnitten für die Steinsalz-Horizonte separat ausgewertet. Mithilfe von Schichtenverzeichnissen der Bohrungen wurde für jede einzelne Formation (Aller-, Leine-, Staßfurt-, Werra-Formation) überprüft, ob eine Mindestmächtigkeit von 100 m Steinsalz zwischen 300 m und 1500 m Tiefe gemäß Wirtsgesteinsdefinition (s. Anhang 6) angetroffen wurde. Das Auftreten von geringmächtigen Zwischenschichten innerhalb einer Steinsalz-Formation und die damit einhergehende Heterogenität der Abfolge wird bei der Bewertung des geowissenschaftlichen Abwägungskriteriums nach Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG (Räumliche Charakterisierbarkeit) berücksichtigt.

Das Aller-Steinsalz erreicht in keiner Bohrung im gesamten Teilgebiet eine Mächtigkeit von 100 m. Im Fall des Leine-Steinsalz erfüllen nur wenige Lokalitäten die Mindestmächtigkeit von 100 m. Da diese Gebiete mit mehr als 100 m mächtigem Leine-Steinsalz kleinräumig sind und ein Vorhandensein von mindestens 100 m mächtigen Steinsalzformationen auch dort nicht zuverlässig gegeben ist, erfüllen sowohl die Steinsalze der Aller-Formation als auch die Steinsalze der Leine-Formation im Thüringer Becken nicht die Mindestanforderung.

Für das Thüringer Becken sind die relevanten Horizonte, die Wirtsgesteinsbereiche mit Barrierefunktion darstellen können, die Steinsalze der Werra- und der Staßfurt-Formation, da diese in vielen Bohrungen Mächtigkeiten von 100 m und mehr aufweisen (Abbildung 74).

Beispiel GzME „Thüringer Becken“ (03_00UR)

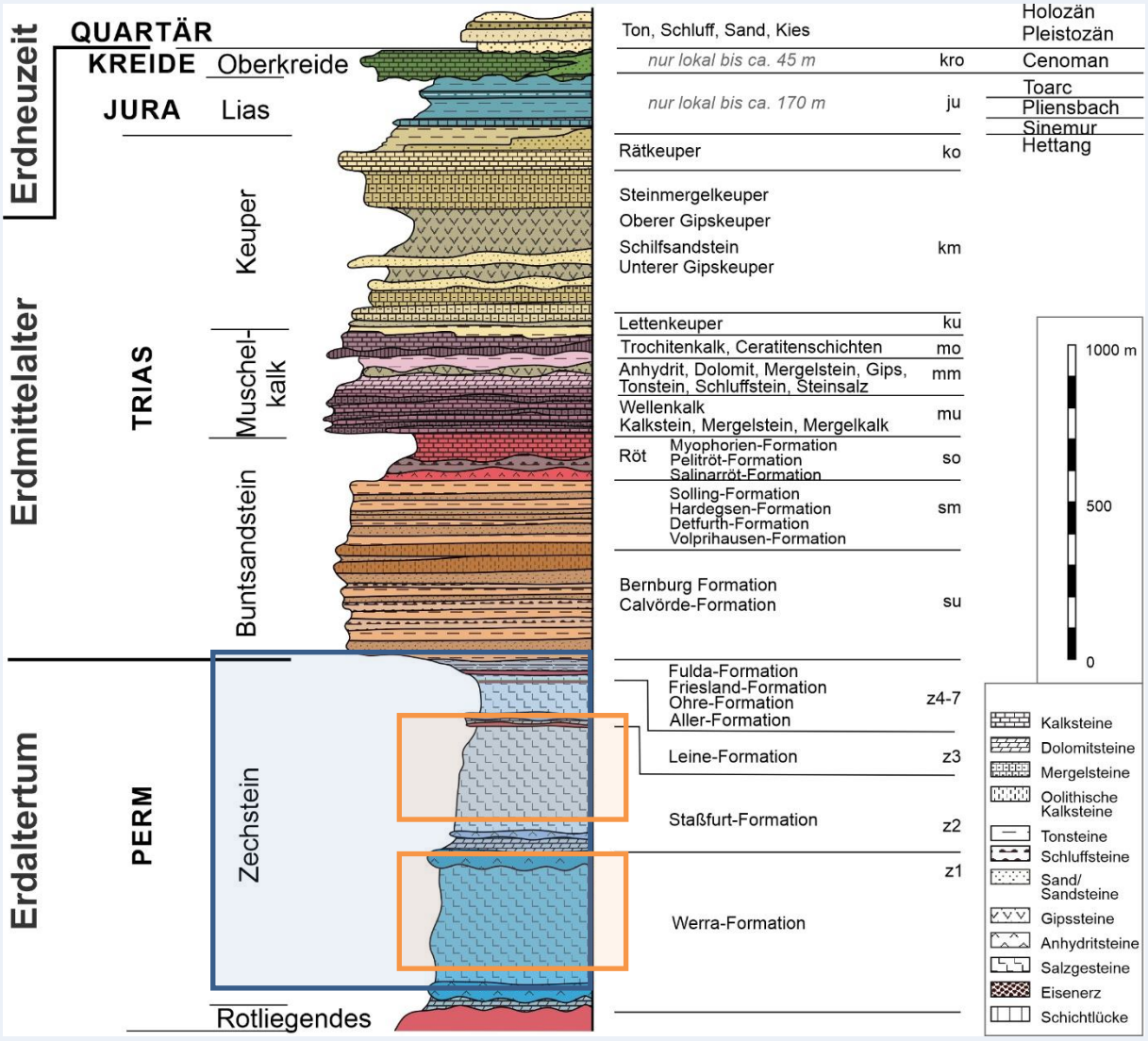


Abbildung 74: Idealisiertes Normalprofil der salinaren und postsalinaren Schichtenfolge im Thüringer Becken (Quelle: BGE).
Blau ist der stratigraphische Bereich des Zechstein gekennzeichnet, der für die Ermittlung der Teilgebiete in Schritt 1 der Phase I ausgewiesen wurde. In Schritt 2 erfolgt eine weitere Eingrenzung hinsichtlich der Bearbeitung auf die Wirtsgesteinsbereiche mit Barrierefunktion des Zechstein (orange: Staßfurt-Steinsalz und Werra-Steinsalz).

Das GzME „Thüringer Becken“ wird über die vorliegenden Verbreitungskarten und Mächtigkeitskarten zu Werra- und Staßfurt-Steinsalz eingegrenzt und das vorläufige Ergebnis über die Bohrungsinformationen geprüft.

Für die Werra-Formation wird zur ersten Eingrenzung in Thüringen die 100 m Isopache der Mächtigkeitskarte zum Werra-Steinsalz aus Seidel (2013) verwendet, da diese zum aktuellen

Beispiel GzME „Thüringer Becken“ (03_00UR)

Zeitpunkt die neueste Veröffentlichung darstellt. In Sachsen-Anhalt ist das Werra-Steinsalz laut Mächtigkeitsinformationen aus den Schichtenverzeichnissen nicht mächtig genug. Eine weitere Eingrenzung der Teilgebietsfläche wurde anhand der Verbreitungskarte des Werra-Steinsalz im Zechsteinband der Deutschen Stratigraphischen Kommission (2020) an solchen Stellen vollzogen, wo diese noch weiter eingrenzt als die Karte von Seidel (2013).

Die Kartenauswertung zum Staßfurt-Steinsalz beruht auf mehreren Datengrundlagen. Für den Thüringer Teil des GzME „Thüringer Becken“ wird zur Eingrenzung, äquivalent zum Vorgehen beim Werra-Steinsalz, die 100-m-Isopache aus der Mächtigkeitskarte des Staßfurt-Steinsalz von Seidel (2013) verwendet. In Sachsen-Anhalt wird die in Franke (2020; Abb. 12) dargestellte Steinsalz-Verbreitungsgrenze der Staßfurt-Formation zur Eingrenzung verwendet. Außerdem werden Inhalte aus einer Mächtigkeitskarte des Zentralen Geologischen Instituts (1963) einbezogen.

In der „Digitalen Geologischen Karte von Thüringen 1 : 25 000“ (Kartendienst des TLUBN 2022) sind für einige Kartenblätter Profilschnitte enthalten, die den Zechstein insgesamt oder die einzelnen Formationen abbilden. Darin enthalten sind zum Teil auch Mächtigkeitsangaben und petrographische Beschreibungen, die mit einbezogen wurden.

Stellenweise wurde außerhalb der Verbreitungsfläche, die durch das erste, oben beschriebene Eingrenzen entstanden ist, das Vorkommen von 100 m mächtigen Steinsalzabfolgen durch Bohrungen nachgewiesen. In solchen Gebieten wird die Verbreitungsfläche dahingehend erweitert, dass diese durch die nächstgelegenen Bohrungen begrenzt wird, die Steinsalz-Mächtigkeiten unter 100 m zeigen.

Durch die Auswertung von Schichtenverzeichnissen, Mächtigkeitskarten und Profilschnitten konnten Bereiche im GzME „Thüringer Becken“ ermittelt werden, in denen die Steinsalz-Horizonte der Werra- und/oder Staßfurt-Formation voraussichtlich über 100 m mächtig sind (Abbildung 75).

Beispiel GzME „Thüringer Becken“ (03_00UR)

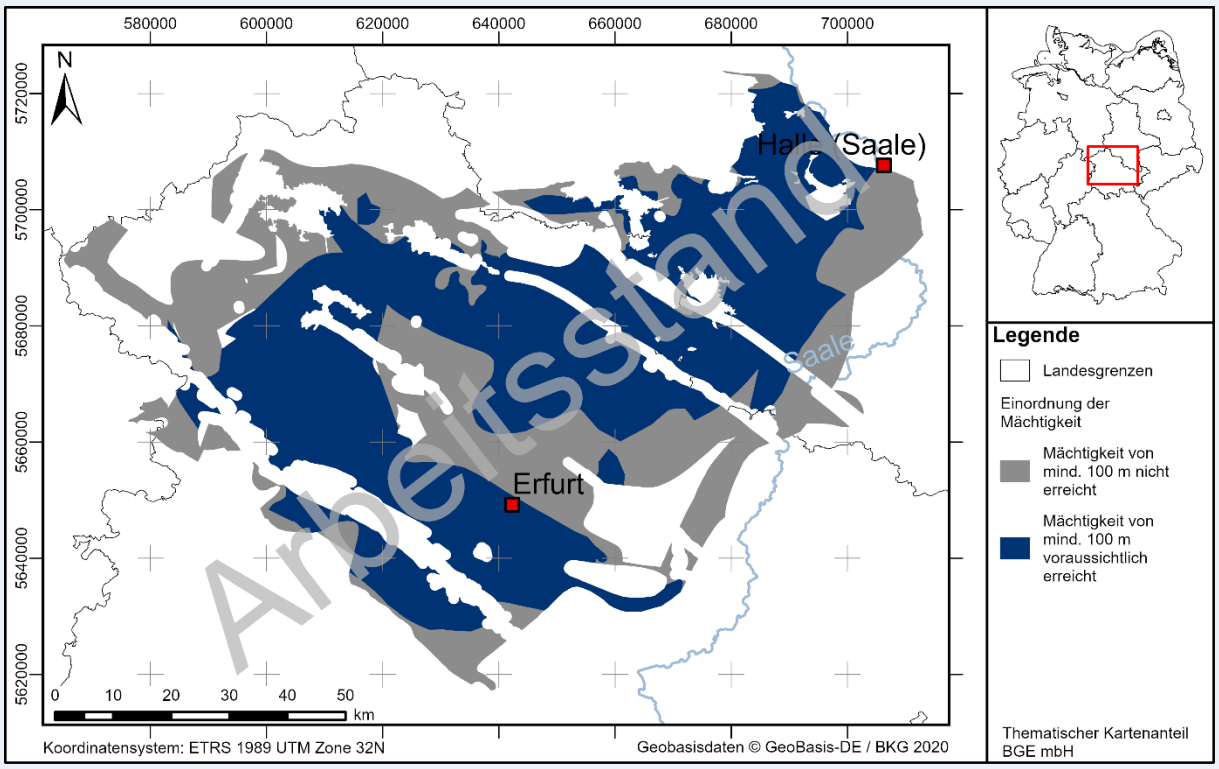


Abbildung 75: Vorläufiges Ergebnis der Überprüfung der Mächtigkeit für die Steinsalz-Horizonte der Werra- und Staßfurt-Formation im GzME „Thüringer Becken“

Beispiel 36: Darstellung der wesentlichen Barriere im GzME „Opalinuston“ (01_00UR)

Beispiel GzME „Opalinuston“ (01_00UR)

Zur Ermittlung des Teilgebietes 001_00TG_032_01IG_T_f_jmOPT wurde für die Anwendung der Mindestanforderung die Mächtigkeit des gesamten Mittleren Jura verwendet (vgl. Abbildung 76). Dazu wurden die im geologischen Landesmodell Baden-Württembergs vorhandenen Strukturflächen der Basis des Mitteljura (04_bjm_ges) und der Basis des Oberjura (03_bjo_ges) genutzt (Rupf & Nitsch 2008). Der Mittlere Jura wurde in der Bearbeitung nicht weiter differenziert. Für die Bearbeitung im bayerischen Teil des Teilgebietes 001_00TG_032_01IG_T_f_jmOPT wurden 2D-Mächtigkeits-Isolinien genutzt (Meyer & Schmidt-Kaler 1996). Die Basis des Opalinuston ist gut ausgewiesen, da sie der Basis des Mittleren Jura entspricht, der Top des Opalinuston fehlt jedoch in den Modellen, daraus resultiert eine Überschätzung der Mächtigkeit des Opalinustons und der ausgewiesenen Teilgebietsfläche.

Für die Bearbeitung im Rahmen von § 14 StandAG wurde daher das 3D-Modell um eine Fläche Top „Opalinuston“ erweitert, um die Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ auf den Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion der Opalinuston-Formation anwenden zu können.

Grundlage der Modellierung der Top-Fläche „Opalinuston“ sind einerseits Flächen bereits existierender Modelle und andererseits Bohrungsmarker aus den Schichtenverzeichnissen der Landesämter. Für den baden-württembergischen Teil des Modells sind die Flächen von der Basis des Muschelkalks bis zur Basis des Tertiärs des Landesmodells Baden-Württembergs sowie Bohrungsmarker des Schichtenverzeichnisses Baden-Württembergs in das vorläufige Ergebnis-Modell eingeflossen (Rupf & Nitsch 2008). Eingangsdaten für den bayerischen Teil des Modells sind die Flächen vom Top Trias bis zur Basis Tertiär des Modells „GeoMol FWM“ sowie Bohrmarker des Schichtenverzeichnisses Bayerns (GeoMol Team 2015).

Das vorläufige Ergebnis-Modell „Opalinuston“ umfasst das Teilgebiet 001_00TG_032_01IG_T_f_jmOPT sowie angrenzende Gebiete in Baden-Württemberg und Bayern und besteht aus acht Strukturflächen:

- Geländeoberfläche
- Basis Tertiär
- Basis Oberjura
- Top Opalinuston
- Basis Mitteljura
- Basis Unterjura

Beispiel GzME „Opalinuston“ (01_00UR)

- Basis Keuper
- Basis Muschelkalk

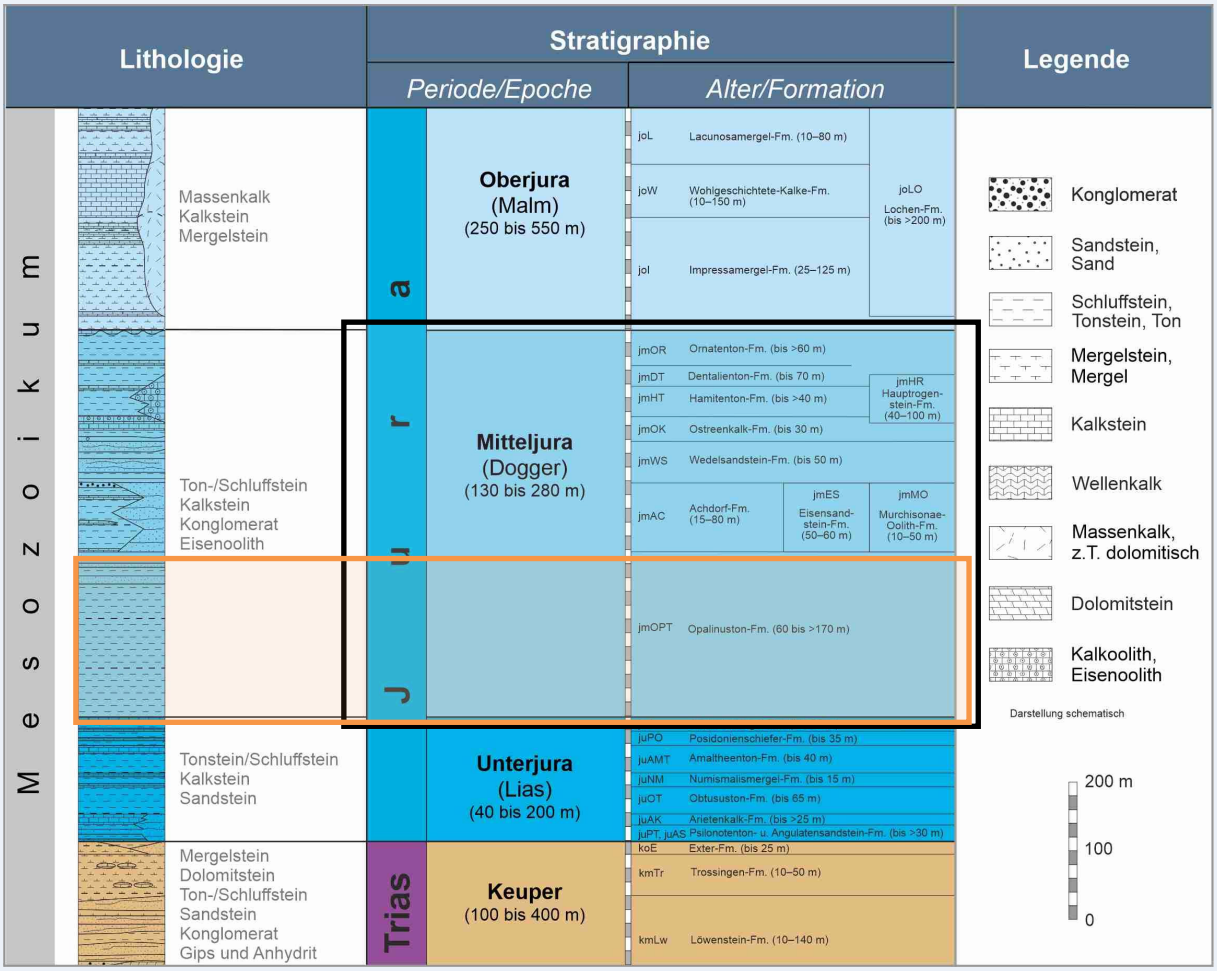


Abbildung 76 *Idealisiertes Normalprofil des Mitteljura in Süddeutschland (verändert nach UM BW 2018, Anlage 2.4; und BGE 2020j).*
Mit einem schwarzen Rahmen ist der stratigraphische Bereich (Mitteljura) gekennzeichnet, der für die Ausweisung der Teilgebiete in Schritt 1 der Phase I ausgewiesen wurde. In Schritt 2 erfolgt eine weitere Eingrenzung hinsichtlich der Bearbeitung auf den Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion des Opalinuston (orangefarbener Rahmen) (BGE 2020j).

Zur Modellierung wurde der „Structure and Stratigraphy“-Workflow von SKUA-GOCAD™ genutzt. Es wurde ein stratigraphisches Gerüst erstellt, bestehend aus dem Mittleren Jura, dem Opalinuston und dem Oberen Jura. Die stratigraphischen Einheiten wurden entsprechende Bohrungsmarker aus den Schichtenverzeichnissen der Bundesländer Bayern und Baden-Württemberg zugewiesen. Dafür wurden die Marker aus den Schichtenverzeichnissen gesich-

Beispiel GzME „Opalinuston“ (01_00UR)

tet, harmonisiert und ausgewählt. Bei der anschließenden Modellierung mit dem DSI-Algorithmus („Discrete Smooth Interpolation“) orientiert sich die zu erstellende Fläche an den Bohrungsmarkern aus den Schichtenverzeichnissen und benutzt zur Interpolation der Lücken zwischen diesen Markern Trendinformationen der Basisflächen Ober- und Mitteljura. Die Mächtigkeit der Einheit „Opalinuston“ wird durch den Abstand zum Mittleren Jura berechnet.

Durch die Neumodellierung des Tops Opalinuston konnten Mächtigkeitskarten erstellt werden, die Gebiete ausweisen, innerhalb derer die Mächtigkeit der Opalinuston-Formation größer als 100 m ist (Abbildung 77).

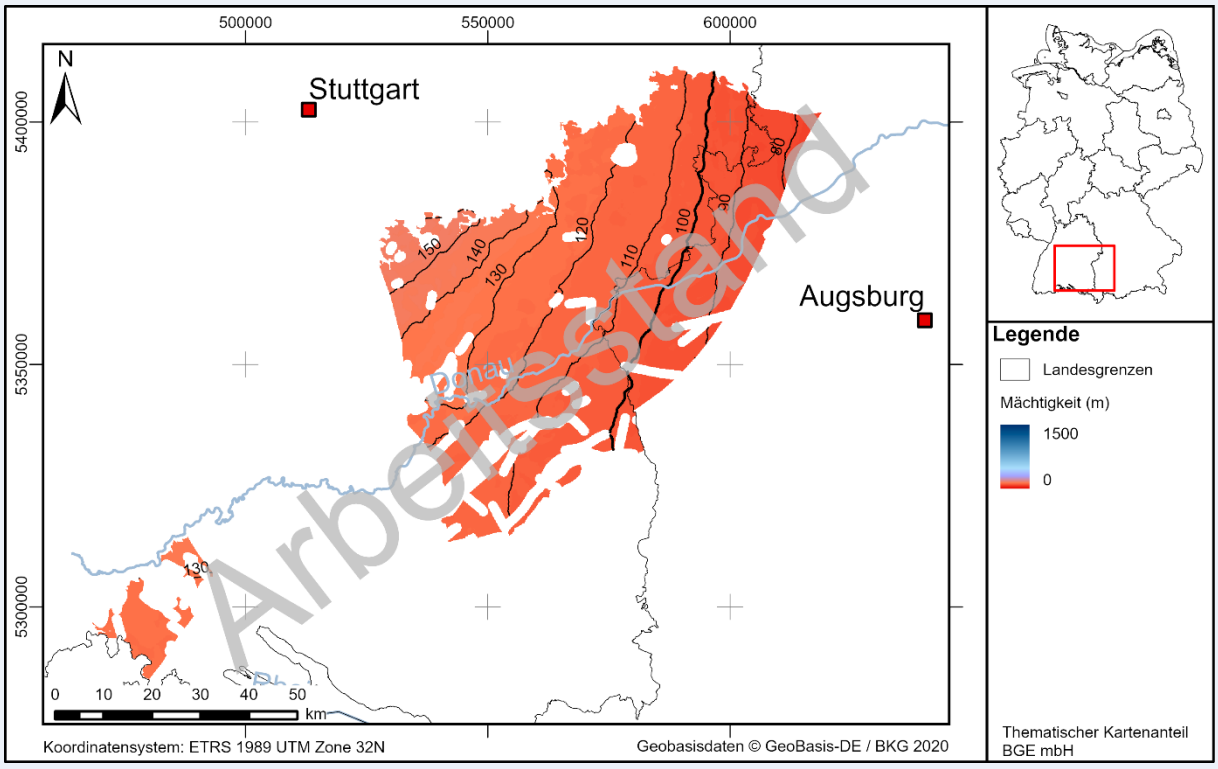


Abbildung 77: Vorläufiges Ergebnis der Überprüfung der Mindestanforderung „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ im GzME „Opalinuston“. Die Konturlinien zeigen Werte gleicher Mächtigkeit und sind mit entsprechenden Werten [m] versehen.

Beispiel 37: Darstellung der geologischen Barrieren am Beispiel GzME „Saxothuringikum“ (04_00UR)

Beispiel im GzME „Saxothuringikum“ (04_00UR)

Zur Bestimmung der Mächtigkeit der kristallinen Wirtsgesteinsformationen im östlichen Bereich des Untersuchungsraumes 04_00UR_009_00TG_194_00IG_K_g_SO kann man vor allem aufgrund des Intrusionscharakters der vorherrschenden Plutonite (v. a. Meißener Pluton und Lausitzer Granodiorite) und der Datenlage von sehr mächtigen Plutoniten ausgehen. Die Bohrungsdaten im Bereich des Meißener Plutons und seismische, gravimetrische und magnetische Erkundungsdaten im östlichen Bereich des Teilgebiets 009_00TG_194_00IG_K_g_SO „Saxothuringikum“ legen nahe, dass diese Plutonite z. T. mehrere Kilometer mächtige Batholithe darstellen (Behr et al. 1994).

In Abbildung 78 ist die Mächtigkeit der kristallinen Wirtsgesteinsformationen im östlichen Bereich des Untersuchungsraumes 04_00UR_009_00TG_194_00IG_K_g_SO bis in eine Tiefe von 1 500 m u. GOK dargestellt. Bei der Ermittlung der Mächtigkeit und Tiefenlage der kristallinen Wirtsgesteinsformationen standen nur wenige Bohr- oder Aufschlussdaten zur Verfügung. Deshalb dienen die geologische Übersichtskarte GK100 LJK des Sächsischen Landesamts für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG) und die Erläuterungen zu dieser regionalgeologischen Karte als wesentliche Grundlage. Lithologische Einheiten wurden durch Literatur, Bohrdaten und geologischen Übersichtskarten in einem Geoinformationssystem definiert und strukturelle und lithologische Merkmale sowie Gesteinsparameter in Datenbanken und Attributtabellen hinterlegt. Flächen, die in Blau dargestellt sind, erfüllen die Mindestanforderung (§ 23 StandAG) von 100 m Mächtigkeit (Abbildung 78).

Beispiel im GzME „Saxothuringikum“ (04_00UR)

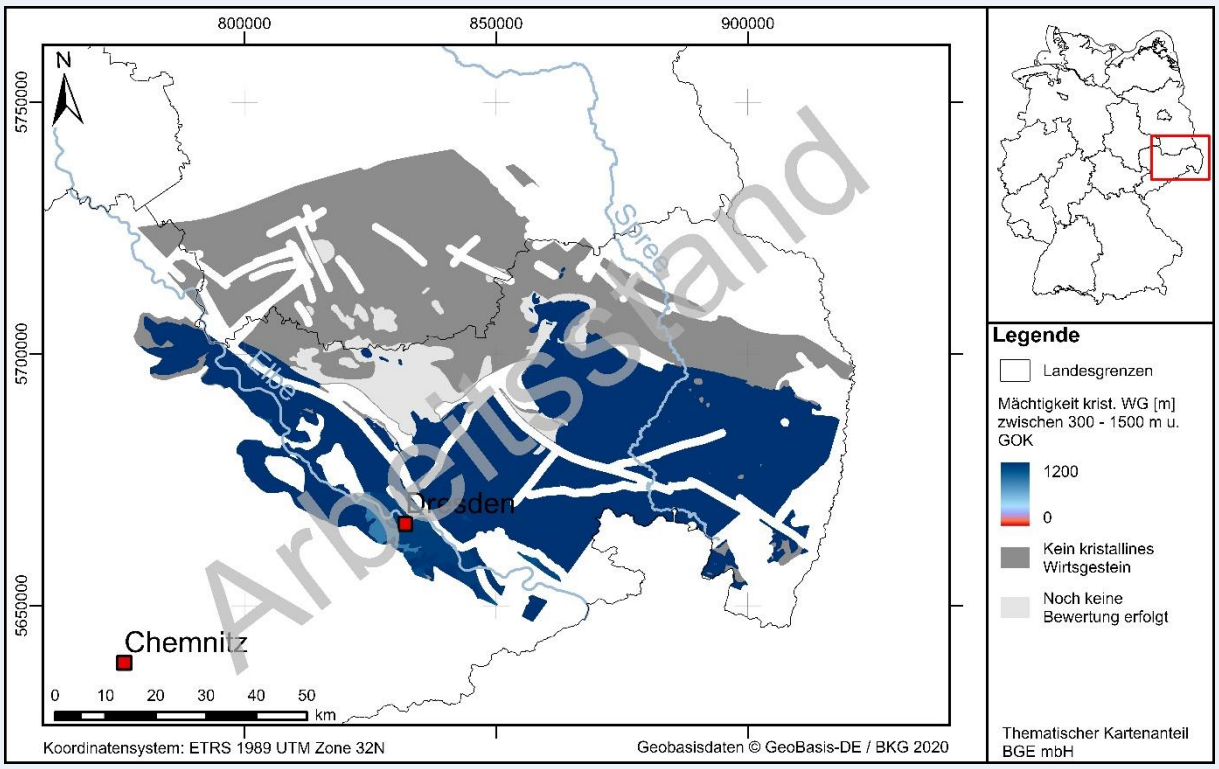


Abbildung 78: Mächtigkeitsinterpretation der kristallinen Wirtsgesteine im Tiefenbereich zwischen 0 m und 1 500 m u. GOK im östlichen Bereich des Gebietes zur Methodenentwicklung, dem Teilgebiet 009_00TG_194_00IG_K_g_SO „Saxothuringikum“.

Hinweis: das Teilgebiet 009_00TG_194_00IG_K_g_SO westlich des Meißener Plutons und der Gesteine der Elbtalzone ist hier nicht dargestellt.

5.4.3 Minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs

Die Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ ist in § 23 Abs. 5 Nr. 3 StandAG definiert: „*die Oberfläche eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs muss mindestens 300 Meter unter der Geländeoberfläche liegen. In Gebieten, in denen im Nachweiszeitraum mit exogenen Prozessen wie insbesondere eiszeitlich bedingter intensiver Erosion zu rechnen ist, deren direkte oder indirekte Auswirkungen zur Beeinträchtigung der Integrität eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs führen können, muss die Oberfläche des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs tiefer als die zu erwartende größte Tiefe der Auswirkungen liegen; soll ein einschlusswirksamer Gebirgsbereich im Gesteinstyp Steinsalz in steiler Lagerung ausgewiesen werden, so muss die Salzschwebe über dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich mindestens 300 Meter mächtig sein; soll ein einschlusswirksamer Gebirgsbereich im Gesteinstyp Tonstein ausgewiesen werden, so muss zu erwarten sein, dass das Deckgebirge auch nach dem Eintreten der genannten exogenen Prozesse ausreichend mächtig ist, um eine Beeinträchtigung der Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durch Dekompaktion ausschließen zu können.*“

Die Begründung des Gesetzentwurfs zum StandAG (BT-Drs. 18/11398) ergänzt dazu: „[...]*wobei zukünftig regional zu erwartende exogene Prozesse* [...] *angemessen und bezogen auf das jeweils vorgesehene Wirtsgestein zu berücksichtigen sind.“*

Gemäß der Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ wurden im Schritt 1 der Phase I nur stratigraphische Einheiten berücksichtigt, die tiefer als 300 m u. GOK liegen. Im Fall des Wirtsgesteins „Steinsalz in steiler Lagerung“ wurde zusätzlich, entsprechend der gesetzlichen Vorgabe, eine Salzschwebe von 300 m berücksichtigt. Im Schritt 2 wird die Anwendungsmethodik zur minimalen Teufe gegenwärtig überprüft und ggf. spezifiziert. Prozesse, wie die Bildung subglazialer Rinnen oder Dekompaktion aufgrund von Erosion, werden im Rahmen der Analyse des Endlagersystems (siehe Kapitel 8) auf ihre Auswirkungen in Endlagersystemen hin untersucht. Die Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ wird damit zielgerichtet geprüft, da diese Auswirkungen lokal verschieden sind und in unterschiedlichen Endlagersystemen anders ausfallen können. Die BGE startete im April 2021 einen Forschungsaufruf zur „Berücksichtigung subglazialer Erosionsprozesse bei der Auswahl eines Standortes für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle“. Die aus diesem Forschungsaufruf resultierenden Projekte werden im Folgenden kurz vorgestellt.

Ziel des Forschungsprojekts „Suchtiefe“ (BGE 2021e) ist die Erstellung einer Prognose über die potenzielle Reichweite und ortsabhängige Tiefenwirkung möglicher zukünftiger Vergletscherungen in Deutschland in den in Schritt 1 der Phase I des Standortausahlverfahrens ermittelten Teilgebieten. Es soll prognostiziert werden, welche minimale Tiefenlage für die obere Begrenzung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs in Abhängigkeit von den regionalgeologischen Verhältnissen und unter Berücksichtigung der in der geologischen Vergangenheit in Deutschland entstandenen, bis zu fast 600 m tiefen subglazialen Rinnen (Katzung et al. 2004; Müller & Obst 2008) zur Anwen-

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

dung kommen sollte. Ferner erfolgt eine Konturierung der Gebiete, welche von zukünftiger Vergletscherung betroffen sein könnten. Die Ergebnisse dieses Projekts werden auch in die geowissenschaftliche Langzeitprognose eingehen (Kapitel 5.3).[18]

Ziel des Forschungsprojekts „Quantifizierung Subglaziale Erosion“ ist die Entwicklung von numerischen Modellen zur Bestimmung von schmelzwassergetriebenem Erosionspotenzial während zukünftiger Vergletscherungen. Dazu werden geologische Beobachtungen und Interpretationen des geologischen Untergrundes genutzt, um mittels numerischer Modellierungen das Erosionspotenzial von schmelzwassergetriebener Erosion zu quantifizieren (Piotrowski 2006; Damsgaard et al. 2017). Das Besondere bei diesen dynamischen Modellen ist, dass diese die subglaziale Schmelzwassererosion auf verschiedenen Lockermaterialien sowie Parameter, die aus vergangenen Vergletscherungen abgeleitet werden können, berücksichtigt. Die Modellierung erfolgt am Beispiel Nordwestdeutschlands. Modellunsicherheiten sollen quantifiziert und diskutiert werden.

Die erweiterte Anwendung der Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ wird exemplarisch für das GzME „Saxothuringikum“ veranschaulicht (Beispiel 38).

[18] Informationen zu diesen und anderen Forschungskooperationen und -projekten des Bereichs Standortauswahl der BGE finden sich unter https://www.bge.de/de/endlagersuche/forschung/

Beispiel 38: Beispiel im GzME „Saxothuringikum“ (009_00TG)

Beispiel im GzME „Saxothuringikum“ (009_00TG)

Am Beispiel des östlichen Bereichs im GzME 009_00TG_194_00IG_K_g_SO wurden zunächst regionalgeologische Gebiete betrachtet. Tektonisch sowie lithologisch abgrenzbare Gebiete mit gleicher geologischer Entwicklung wurden so zu regionalgeologischen Räumen zusammengefasst. Für jeweils diese Räume wurde anhand von Fachliteraturwerken, Bohrungsdaten, Schichtenverzeichnissen und geologischen Übersichtskarten die geologischen Gegebenheiten beschrieben. Als Grundlage dient hier die GK100 LJK (Lausitz-Jizerna-Karkonosze) des LfULG. In einem Geoinformationssystem wurden neben lithologischen und strukturellen Merkmalen und Gesteinsparametern auch Werte für die Tiefenlage dieser geologischen Einheiten aus Bohrungsdaten und Literatur ermittelt. Exemplarisch lässt sich diese stark vereinfachte „Tiefenmodellierung“ in der südlichen Elbtalzone erläutern (zur Lage dieses regionalgeologischen Gebiets siehe Abbildung 88). Hier folgen im Liegenden der kreidezeitlichen Sandsteine cadomische Granodiorite. Den georeferenzierten Flächen der GK100 LJK der kreidezeitlichen Sandsteine konnten Teufenwerte zwischen ca. 300 m und 600 m u. GOK für das liegende kristalline Wirtsgestein zugeordnet werden. Oberflächlich anstehende kristalline Wirtsgesteine erhielten Teufenwerte von 0 m; wurden keine kristallinen Wirtsgesteine bis zu einer Teufe von 1500 m ermittelt oder ist das Vorkommen von kristallinen Wirtsgesteinsformationen eher unwahrscheinlich, wurden diese Gebieten als größer als 1500 m u. GOK kartiert.

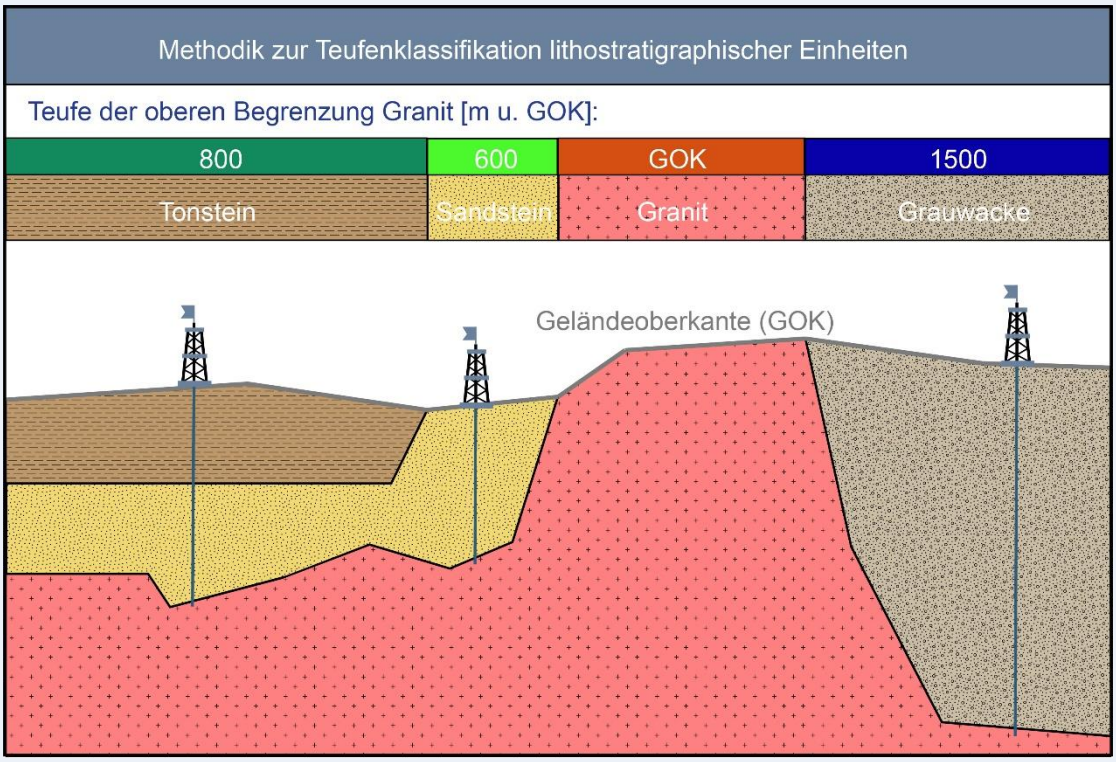


Abbildung 79: Schematische Darstellung der vereinfachten Tiefeninterpretation

Beispiel im GzME „Saxothuringikum“ (009_00TG)

In Abbildung 80 ist diese stark vereinfachte Tiefeninterpretation der kristallinen Wirtsgesteine im östlichen Bereich des Teilgebiets 009_00TG_194_00IG_K_g_SO dargestellt.

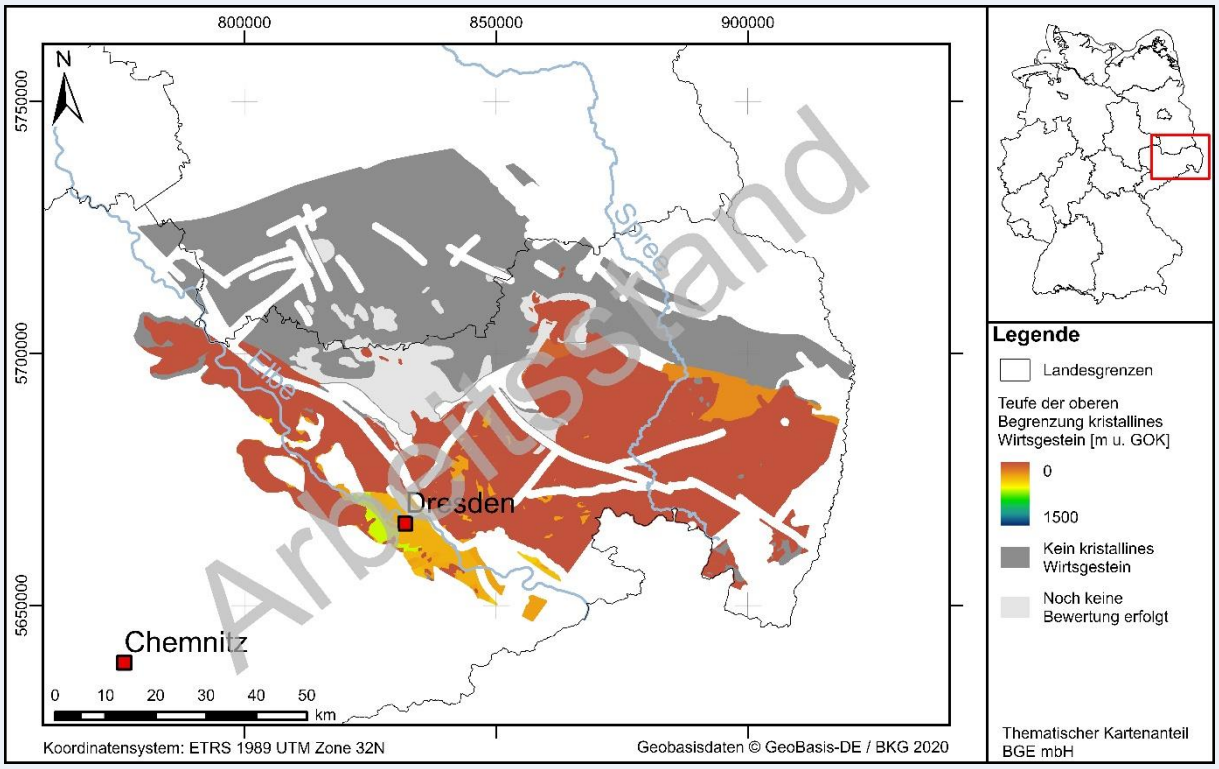


Abbildung 80: Darstellung der Tiefenlage der kristallinen Wirtsgesteine zwischen 0 m und 1 500 m u. GOK.
Hinweis: das Teilgebiet 009_00TG_194_00IG_K_g_SO westlich des Meißener Plutons ist hier nicht dargestellt.

5.4.4 Erhalt der Barrierewirkung

Die Mindestanforderung „Erhalt der Barrierewirkung“ ist in § 23 Abs. 5 Nr. 5 StandAG definiert: „*es dürfen keine Erkenntnisse oder Daten vorliegen, welche die Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, insbesondere die Einhaltung der geowissenschaftlichen Mindestanforderungen zur Gebirgsdurchlässigkeit, Mächtigkeit und Ausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs über einen Zeitraum von einer Million Jahren zweifelhaft erscheinen lassen*“.

Die Begründung des Gesetzentwurfs zum StandAG (BT-Drs. 18/11398) ergänzt: *„[...] Es können darüber hinaus auch Erkenntnisse zu anderen Prozessen, die für die Sicherheit eines Endlagers wesentlich sein können, herangezogen werden.*“

In der Analyse des Endlagersystems (Kapitel 8) werden systematisch diejenigen Prozesse identifiziert, die die Integrität eines Wirtsgesteinsbereichs mit Barrierefunktion, der einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich aufnehmen kann, beeinträchtigen können. Daraufhin findet eine Bewertung statt, ob durch diese Prozesse begründete Zweifel am Erhalt der Barrierewirkung bestehen. Ist zu erwarten, dass der einschlusswirksame Gebirgsbereich bzw. Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion in seiner Mächtigkeit, Ausdehnung oder Gebirgsdurchlässigkeit im Bewertungszeitraum signifikant negativ beeinflusst wird, wird die Mindestanforderung im betroffenen Gebiet als nicht erfüllt angesehen und es kann im Rahmen der Arbeiten zu § 7 EndlSiUntV kein einschlusswirksamer Gebirgsbereich ausgewiesen werden (Kapitel 8.5.10). Prozesse, die unmittelbar auf die Fläche oder die Ausdehnung wirken, können beispielweise Erosions- oder Subrosionsprozesse sein (Beispiel 39).

Beispiel 39: Beeinflussung der Barriereintegrität durch Erosionsprozesse im GzME „Opalinuston“ (01_00UR)

Beeinflussung der Barriereintegrität durch Erosionsprozesse am Beispiel des GzME „Opalinuston“ (01_00UR)

Am folgenden Beispiel des Prozesses der Erosion im GzME „Opalinuston“ wird die mögliche Auswirkung eines Prozeses auf den Erhalt der Barrierewirkung im Bewertungszeitraum dargestellt.

Der Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion wird durch die Opalinuston-Formation (bestehend aus Teufelsloch-Subformation und Zillhausen-Subformation) der stratigraphischen Einheit Mittlerer Jura gebildet. Die Opalinuston-Formation wird von mittel- und oberjurassischen Wechselfolgen, die aus klastischen und karbonatischen Gesteinen bestehen und mit mächtigen oberjurassischen Karbonaten abschließen, überlagert. Der gesamte mesozoische Schichtstapel fällt mit 5° bis 10° nach Südosten ein (Reicherter et al. 2008). Während die feinklastischen Sedimente leicht durch fluviatile Erosion zu erodieren sind, bilden die harten erosionsresistenten Karbonate des Oberjura die markante Schichtstufe des Albtraufs der Schwäbischen Alb. Diese sogenannte Schichtstufe äußert sich topographisch durch eine ausgeprägte Geländestufe mit einem Höhenunterschied von 300 m bis 400 m zwischen dem leicht

Beeinflussung der Barriereintegrität durch Erosionsprozesse am Beispiel des GzME „Opalinuston“ (01_00UR)

nach Süden abfallenden Hochplateau der Schwäbischen Alb und dem tieferliegenden Albvorland. Die leicht zu erodierenden Tonsteine und Mergel am Sockel des Albtraufs werden fortschreitend abgetragen, wodurch die überlagernden erosionsresistenten Kalksteine des Oberjura nachbrechen oder -rutschen. Dies hat über längere Zeiträume ein Rückverlagerung der Schichtstufe des Albtraufs in Richtung Südosten zur Folge. Ein bekanntes Ereignis und gleichzeitig Beleg für die Aktivität dieser Vorgänge ist der Bergrutsch von Mössingen im Jahr 1983 (LGRBwissen 2022a).

Für die geowissenschaftliche Langzeitprognose ist die Erosion – und insbesondere der Erosionsprozess der Schichtstufenverlagerung – von besonderer Bedeutung, da dieser Prozess im Nachweiszeitraum weiterhin wirken wird. Durch den fehlenden Schutz der erosionshemmenden Kalksteine des Oberjura im Deckgebirge ist zu erwarten, dass die Opalinuston-Formation im Albvorland freigelegt wird. Für die Bewertung dieses Prozesses ist es daher wichtig zu wissen, mit welcher Geschwindigkeit die Verlagerung der Schichtstufen in der Vergangenheit stattgefunden hat, um abzuschätzen, wie weit der Albtrauf innerhalb des Nachweiszeitraums in Richtung Südosten zurückweichen kann.

Die bisherigen Schätzungen gingen davon aus, dass die Verlagerung des Albtraufs in der Vergangenheit mit ungefähr 1 km pro einer Million Jahre fortgeschritten ist. Diese Angabe basiert jedoch maßgeblich auf der Annahme, dass die Gesteinsbruchstücke in der Schlotfüllung des Scharnhauser Vulkans, der ca. 20 km nördlich der heutigen Position des Albtraufs liegt und vor 15 Millionen Jahren ausgebrochen ist, den Gesteinen des Oberjura zuzuordnen sind, und sich demnach der Albtrauf zum Zeitpunkt des Ausbruchs auf Höhe des Vulkans befand (Branco 1892). Jüngere Untersuchungen stellen diese Alterseinstufung und damit auch die Annahme zur Verlagerung des Albtraufs infrage (Schweigert 2018).

Das Zurückweichen der Schichtstufen in Südwestdeutschland wird daher Bestandteil eines Forschungsprojektes (BGE 2021f), das sich mit Erosionsvorgängen deutschlandweit beschäftigt. Ein Teil des Forschungsprojekts soll reevaluieren und bestimmen, wie weit die Schichtstufenverlagerung im Bewertungszeitraum fortschreiten kann. Der betroffene Bereich des GzME „Opalinuston“ (01_00UR) kann dann ggf. durch die Nicht-Erfüllung der Mindestanforderung nach § 23 Abs. 5 Nr. 5 StandAG „Erhalt der Barrierewirkung“ eingeordnet werden.

5.5 Zielgerichtete Anwendung der Ausschlusskriterien

Die Ausschlusskriterien gemäß § 22 StandAG werden im Schritt 2 der Phase 1 des Standortauswahlverfahrens in den rvSU zielgerichtet im prozessualen Ablauf angewendet (siehe Kapitel 1.4.1). Zur besseren Übersicht werden die erweiterten Anwendungsmethoden der einzelnen Ausschlusskriterien im Folgenden einzeln vorgestellt und mit Beispielen veranschaulicht. Bei den Ausschlusskriterien „seismische Aktivität“ und „großräumige Vertikalbewegengen“ findet keine weiterentwickelte Anwendung statt. Diese werden nach aktuellem Kenntnissstand in der Bearbeitung im Rahmen des § 14 StandAG als abgeschlossen angesehen.

Zusätzlich zu den weiterentwickelten Anwendungen wird fortlaufend der Kenntnissstand basierend auf dem methodischen Vorgehen von Schritt 1 der Phase 1 aktualisiert, sofern dies Gebiete innerhalb eines Teilgebiets betrifft. Hierbei werden nach fachlicher Prüfung beispielsweise Hinweise aus den Fachstellungnahmen der Staatlichen Geologischen Dienste zum Zwischenbericht Teilgebiete berücksichtigt.

5.5.1 Anwendung des Ausschlusskriteriums Aktive Störungszonen

Das Ausschlusskiterium „Aktive Störungszonen“ berücksichtigt sowohl aktive Störungszonen als auch atektonische Vorgänge.

Aktive Störungszonen

Das Ausschlusskriterium „aktive Störungszonen“ ist in § 22 Abs. 2 Nr. 2 StandAG definiert: „*in den Gebirgsbereichen, die als Endlagerbereich in Betracht kommen, einschließlich eines abdeckenden Sicherheitsabstands, sind geologisch aktive Störungszonen vorhanden, die das Endlagersystem und seine Barrieren beeinträchtigen können;*
Unter einer „aktiven Störungszone“ werden Brüche in den Gesteinsschichten der oberen Erdkruste wie Verwerfungen mit deutlichem Gesteinsversatz sowie ausgedehnte Zerrüttungszonen mit tektonischer Entstehung, an denen nachweislich oder mit großer Wahrscheinlichkeit im Zeitraum Rupel bis heute, also innerhalb der letzten 34 Millionen Jahre, Bewegungen stattgefunden haben. Atektonische beziehungsweise aseismische Vorgänge, also Vorgänge, die nicht aus tektonischen Abläufen abgeleitet werden können oder nicht auf seismische Aktivitäten zurückzuführen sind und die zu ähnlichen Konsequenzen für die Sicherheit eines Endlagers wie tektonische Störungen führen können, sind wie diese zu behandeln“.

In Schritt 1 Phase I wurden von der BGE drei Ansätze zur Identifizierung von aktiven Störungszonen verfolgt:

- Bewertung der Vorschläge der Bundes- und Landesbehörden zur Aktivitätseinschätzung von Störungszonen,
- Identifizierung von Störungszonen, die Gesteinseinheiten mit einem Maximalalter von 34 Millionen Jahren versetzen und
- Abgrenzung von tektonisch aktiven Großstrukturen.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

In Schritt 2 der Phase I soll der Datensatz mit aktiven Störungszonen aktualisiert werden. Dazu soll eine auf die Untersuchungsräume bezogene erweiterte und auf aktuellen Daten basierende detaillierte Literaturrecherche durchgeführt werden. Zudem soll die Methodik des Ausschlusskriteriums „Aktive Störungszonen“, im Rahmen eines externen Forschungsprojektes (BGE 2021g), in folgender Hinsicht erweitert werden:

- Strukturgeologisch sinnvolle Vervollständigung separater Störungsspuren, die aus der Verschneidung von Störungsspuren mit geologischen Einheiten, die jünger als 34 Millionen Jahre sind, stammen.
- Ermittlung von (Mindest-)Versatzbeträgen der identifizierten aktiven Störungszonen und die damit verbundene Bestimmung der Mächtigkeit des Störungskernes und der Zerrüttungszone.
- Ermittlung der Raumlage und Geometrie von aktiven Störungszonen, die auf Störungsspuren basieren und bisher vertikal ausgeschlossen wurden.
- Identifizierung neuer aktiver Störungszonen durch die Analyse der Topographie anhand von hochauflösenden digitale Geländemodellen.
- Fachliche Herleitung von Kriterien für die Bestimmung individueller Sicherheitsabstände.

Die Ergebnisse dieses Forschungsprojektes werden in Schritt 2 der Phase I bei den Detailuntersuchungen in den Untersuchungsräumen zur Verfügung stehen und entsprechend angewendet.

Atektonische Vorgänge

Als atektonische bzw. aseismische Vorgänge werden Gesteinsdeformationen beschrieben, die nicht aus tektonischen Prozessen abgeleitet werden können bzw. nicht auf seismische Aktivitäten zurückzuführen sind, aber zu ähnlichen Konsequenzen für die Sicherheit eines Endlagers wie tektonische Störungszonen führen können. Diese Prozesse sind gemäß § 22 Abs. 2 Nr. 2 StandAG wie aktive Störungszonen zu behandeln. Dazu gehören Deformationsstrukturen wie z. B. Senkungen und Einstürze über Hohlräumen von relativ leicht löslichen Gesteinen (Kalkstein, Gips oder Steinsalz) sowie Deformationen durch Gletscherüberfahrung oder Impaktereignisse (Murawski & Meyer 2010). In Schritt 1 der Phase I wurde für atektonische Vorgänge mit Entstehungs- bzw. Einwirkungstiefen (Impakt) größer als 300 m ein pauschaler Sicherheitsabstand von 1 000 m um das Ereignis, analog zu den tektonischen Störungen, gezogen. Im Schritt 2 der Phase I wird der pauschale Sicherheitsabstand von 1 000 m in den Detailuntersuchungen zu den Teiluntersuchungsräumen überprüft und gegebenfalls anhand weiterer Informationen erweitert (siehe dazu Beispiel 40). Zusätzlich wird fortlaufend der Kenntnissstand aktualisiert (Beispiel 41). Hierbei werden nach fachlicher Prüfung beispielsweise Hinweise aus den Fachstellungnahmen der Staatlichen Geologischen Dienste berücksichtigt.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

Beispiel 40: Ausschlusskriterium „Aktive Störungszonen – Atektonische Vorgänge“ im GzME „Opalinuston“ (01_00UR)

Anwendungsbeispiel Impaktkrater Nördlinger Ries im GzME „Opalinuston“ (01_00UR)

Durch eine Überprüfung des Kenntnisstandes der im Zwischenbericht Teilgebiete verwendeten Informationen zum Ausschlusskriterium „Aktive Störungszonen – Atektonische Vorgänge“ ergab sich die Notwendigkeit der Anpassung des ausgeschlossenen Gebietes im Raum des Impaktkraters Nördlinger Ries. Dieses begrenzt im Süden das GzME „Opalinuston“ (Abbildung 81).

Im Schritt 1 der Phase I des Standortauswahlverfahrens hat die BGE, da keine Daten zu den Impaktereignissen Nördlinger Ries und Steinheimer Becken von den Staatlichen Geologischen Diensten an die BGE übermittelt wurden, mit Hilfe von Geologischen Karten ein Polygon für den Kraterrand des Nördlinger Ries erstellt. Dazu wurde die Linie „Rieskraterrand“ aus der Hydrogeologischen Karte von Bayern im Maßstab 1 : 100 000 (Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU) 2019) vektorisiert und in Baden-Württemberg mit den Umrissen der Einheit „Riessee-Formation“ ergänzt (BGE 2020h).

In der Fachlichen Stellungnahme des Landesamts für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB) im Regierungspräsidium Freiburg zum Zwischenbericht Teilgebiete (LGRB 2021, S. 10) findet sich folgender Hinweis zum Verlauf des Kraterrandes des Nördlinger Ries:

„*Im Zwischenbericht Teilgebiete wurde für Impaktkrater ein Sicherheitsabstand von einem Kilometer um diese Abgrenzung gewählt, um den zerrütteten Bereich festzulegen. Dies scheint dem LGRB für das Nördlinger Ries als zu gering angesetzt. Von Hüttner u. Mitarb. (1980: Geologisches Jahrbuch, E 19) wurde gezeigt, dass der tektonische Kraterrand teilweise zwei Kilometer außerhalb des geomorphologischen Kraterrandes liegt, d. h. dass der Gesteinsverband auch in mehr als einem Kilometer Entfernung zum kartierten Kraterrand durch das Ereignis gestört wurde. Die Verbreitung von Auswurfmassen (Bunte Brekzie) als Hinweis für die laterale Beeinflussung des Gesteinsverbands ist ein deutlicher Indikator und sollte in zukünftigen Verfahrensschritten einbezogen werden.*“

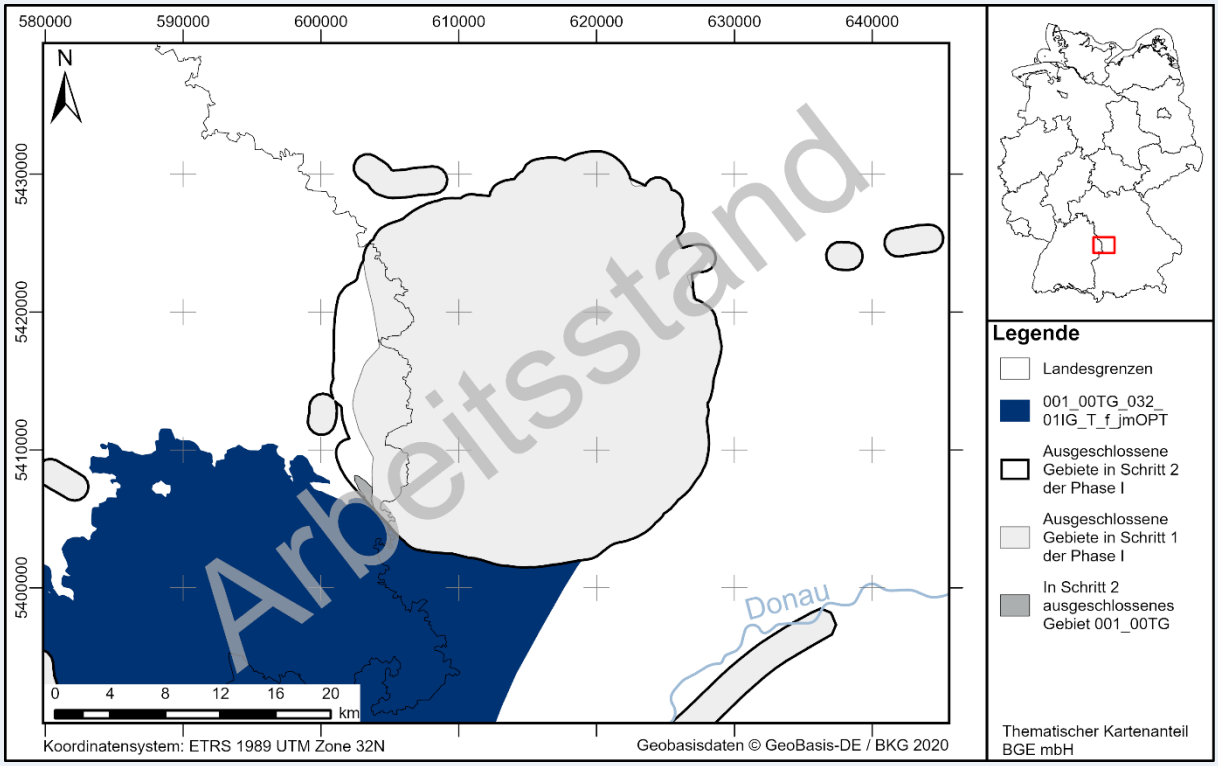
Als morphologischen Kraterrand bezeichnet man den Bereich, ab dem der Abfall von autochthonem Vorland in den Krater hinein einsetzt (Hüttner et al. 1980). Gall et al. (1977) sowie Hüttner et al. (1980) definieren einen „strukturellen“ Kraterrand als die Grenze zwischen dem Gebiet, in dem noch vertikale Verschiebungen stattgefunden haben, und dem anschließenden ungestörten Bereich. Die BGE stimmt dem Hinweis des LGRB (LGRB 2021) zu, dass der „strukturelle“ Kraterrand die Grenze der lateralen Beeinflussung des Gesteinsverbands darstellt und somit als Begrenzung der atektonischen Struktur des Nördlinger Ries genutzt werden sollte.

Der morphologische Kraterrand des Nördlinger Ries wurde im Südwesten, Süden und Osten mittels geoelektrischer Messverfahren kartiert und interpretiert (Hüttner et al. 1980). Hüttner et

Anwendungsbeispiel Impaktkrater Nördlinger Ries im GzME „Opalinuston“ (01_00UR)

al. (1980) konnten für den südlichen Kraterrand feststellen, dass der Verlauf des Kraterrandes überwiegend morphologisch und nur stellenweise strukturell bestimmt ist. An der westlichen und nördlichen Begrenzung des Nördlinger Ries ergeben sich hingegen erosionsbedingt große Diskrepanzen zwischen dem Verlauf des strukturellen und des morphologischen Kraterrandes, sodass der strukturelle Kraterrand zwischen 2 km und 3 km nach außen verschoben ist. Da das Nördlinger Ries mit seinem südlichen Verlauf des Kraterrandes das GzME „Opalinuston“ begrenzt und in diesem Bereich der strukturelle und morphologische Kraterrand lokal nicht übereinstimmen, wurde der Rieskraterrand gemäß Hüttner et al. (1980) neu vektorisiert. Um dieses Polygon wurde der in Schritt 1 der Phase I definierte Sicherheitsabstand von 1 000 m um den atektonischen Vorgang angelegt und die sich ergebende Fläche in alle endlagerelevanten Tiefen projiziert. Das resultierende Volumen ergibt das ausgeschlossene Gebiet.

Das durch die erweiterte Anwendung des Ausschlusskriteriums entstandene ausgeschlossene Gebiet ist in Abbildung 81 dargestellt. Der aus dem Standortauswahlverfahren ausgeschiedene Teil des GzME „Opalinuston“ ist in Grau markiert.



Arbeitsstand

Abbildung 81: Ausgeschlossenes Gebiet durch das Ausschlusskriterium „Aktive Störungszonen – Atektonische Störungen“ im Bereich des Impaktkraters Nördlinger Ries in Schritt 2 der Phase I.
Das ausgeschlossene Gebiet begrenzt im Süden das GzME „Opalinuston“. Ein in Grau dargestellter Bereich des GzME „Opalinuston“ befindet sich im ausgeschlossenen Gebiet.

Beispiel 41: Ausschlusskriterium „Aktive Störungszonen – Atektonische Vorgänge“ – im GzME „Thüringer Becken“ (03_00UR)

Aktualisierung des Kenntnisstandes zu atektonischen Störungszonen im GzME „Thüringer Becken“ (03_00UR)

Durch eine Überprüfung und Aktualisierung des Kenntnisstandes der im Zwischenbericht Teilgebiete verwendeten Informationen zum Ausschlusskriterium „Aktive Störungszonen – Atektonische Vorgänge“ – ergab sich die Notwendigkeit der Erweiterung der Anzahl der ausgeschlossenen Gebiete im Thüringer Becken. In der fachlichen Stellungnahme des TLUBN (2021, S. 26f.) zum Zwischenbericht Teilgebiete wurde darauf verwiesen, Entstehungshorizonte atektonischer Vorgänge durch räumliche Beziehungen mit Geologischen Karten zu ermitteln. Dieser Hinweis wurde seitens der BGE aufgenommen, um weitere atektonische Vorgänge zu definieren, die anschließend analog zu Schritt 1 Phase I zu ausgeschlossenen Gebieten führen.

Für atektonische Vorgänge, die auf Senkungen oder Einstürze über Lösungshohlräumen zurückgehen, wird innerhalb der Teilgebiete eine individuelle Bestimmung des Entstehungshorizonts und/oder -tiefe durchgeführt. Dabei sollen die atektonischen Vorgänge identifiziert werden, die einen Entstehungshorizont im Zechstein mit einer Entstehungstiefe von mindestens 300 m haben, da diese einen direkten Einfluss auf den endlagerrelevanten Tiefenbereich innerhalb des Wirtsgesteins ausüben können. Den atektonischen Vorgängen, die einen Entstehungshorizont im Deckgebirge aufweisen, kann zunächst kein direkter Einfluss auf die stratigraphische Einheit Zechstein nachgewiesen werden, sodass diese bei der Bewertung der langfristigen Stabilität der geologischen Verhältnisse weiter betrachtet werden.

Dabei wurden für die Ermittlung des Entstehungshorizontes im Zechstein im Bereich des Thüringer Beckens geologische Karten verwendet. Mithilfe der Karten kann auf einen möglichen Entstehungshorizont innerhalb der stratigraphischen Einheit des Zechstein geschlossen werden, wenn sich die Objekte an der Geländeoberfläche innerhalb einer Stratigraphie mit unlöslichen Gesteinen befinden und die nächstältere stratigraphische Einheit diejenige ist, die lösliche Gesteine des Zechstein enthält. Im Thüringer Becken bestehen die Abfolgen des Mittleren und Unteren Buntsandstein dominant aus Abfolgen von Sand- und Tonstein. Befindet sich ein atektonischer Vorgang innerhalb oberflächennah anstehender Gesteine des Mittleren und Unteren Buntsandstein, kann demnach nur der Zechstein mit auslaugungsfähigen Gesteinen als Entstehungshorizont infrage kommen.

Die Tiefen der atektonischen Vorgänge, denen ein Entstehungshorizont im Zechstein zugeordnet werden konnte, werden mithilfe von Schichtenverzeichnissen von Bohrungen bestimmt. Die Tiefenbestimmung erfolgt jeweils über die Information des Tops der stratigraphischen Einheit Zechstein. Die Tiefen der atektonischen Vorgänge, bei denen bereits ein Entstehungshorizont angegeben war, werden über die Tiefe des Tops der angegebenen lithostratigraphischen Einheit ermittelt.

Aktualisierung des Kenntnisstandes zu atektonischen Störungszonen im GzME „Thüringer Becken“ (03_00UR)

Bereiche, in denen relevante Subrosionserscheinungen auf die beschriebene Weise nachgewiesen wurden, wurden analog zu Schritt 1 Phase I mit einem Sicherheitsabstand von 1 000 m versehen (BGE 2020h) (Abbildung 82).

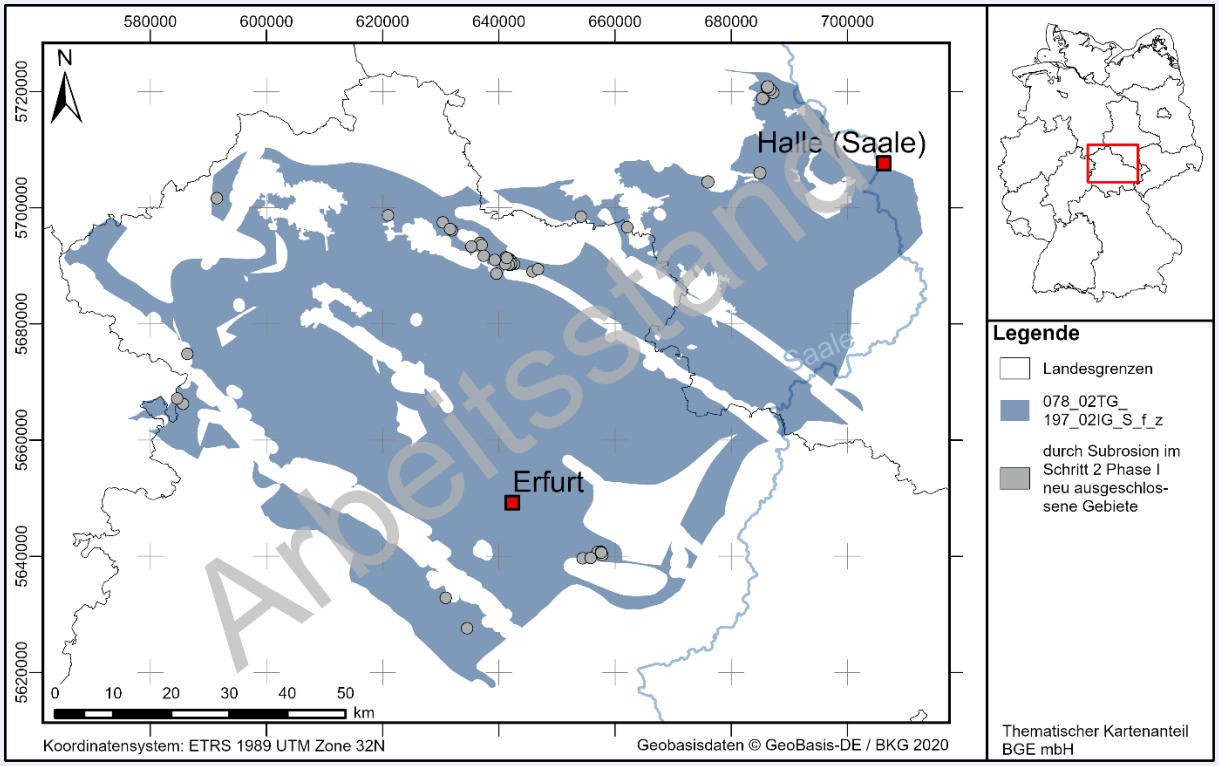


Abbildung 82: Erweiterte Anwendung des Auschlusskriteriums „Aktive Störungszonen – Atektonische Vorgänge“ im GzME „Thüringer Becken“. Anhand der erneuten Anwendung im Schritt 2 der Phase I wurden weitere Gebiete mit Subrosionserscheinungen identifiziert.

Des Weiteren werden Subrosionserscheinungen auch bei der Betrachtung der zu erwartenden und abweichenden Entwicklungen überprüft (vgl. Kapitel 8). Die neuen ausgeschlossenen Gebiete der atektonischen Vorgänge im Thüringer Becken werden im Rahmen der umfassenden Bewertung (§ 10 EndlSiUntV) in Kategorie D eingeordnet (vgl. Kapitel 7).

5.5.2 Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit

Das Ausschlusskriterium „Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit“ ist in § 22 Abs. 2 Nr. 3 StandAG definiert: „*das Gebirge ist durch gegenwärtige oder frühere bergbauliche Tätigkeit so geschädigt, dass daraus negative Einflüsse auf den Spannungszustand und die Permeabilität des Gebirges im Bereich eines vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs oder vorgesehenen Endlagerbereichs zu besorgen sind; vorhandene alte Bohrungen dürfen die Barrieren eines Endlagers, die den sicheren Einschluss gewährleisten, in ihrer Einschlussfunktion nachweislich nicht beeinträchtigen*“.

Ziel ist es, alle Bohrungen und Bergwerke, die sich innerhalb eines besonders geeigneten Gebietes befinden, mit Hilfe einer weiterentwickelten Anwendungsmethode in Hinblick auf eine individuelle Abschätzung der Gebirgsschädigung um das jeweilige Bergbauobjekt zu bewerten. Dieser Arbeitsschritt erfordert durch die Bewertung individueller Objekte einen sehr hohen Detaillierungsgrad. Die Entscheidung, ob eine Bohrung oder Bergwerk individuell bewertet wird, fällt situativ, sobald festgestellt wird, dass dies relevant für die sicherheitsgerichtete Bewertung eines Gebietes ist.

Bohrungen

Im Schritt 1 der Phase I wurde ein pauschaler Sicherheitsabstand von 25 m um den Bohrpfad angewendet. Insgesamt wurden 48.549 Bohrungen im endlagerrelevanten Tiefenbereich (größer als 275 m u. GOK) ausgeschlossen. Ziel von Schritt 2 der Phase I ist eine weiterenentwickelte Anwendungsmethodik für das Ausschlusskriterium „Bohrungen“. Hierzu werden aktuell relevante Kriterien zur Abschätzung der Gebirgsschädigung um Bohrungen erarbeitet, z. B. im Zusammenhang mit Nutzungsart, Bohrart, Spülungsverlust und Lageungenauigkeit. Anhand einer qualitativen Klassifizierungsmethode, die eine Einordnung hinsichtlich der potenziellen Gebirgsschädigung gemäß dieser Kriterien erlaubt, wird ein individueller Sicherheitsabstand für eine Bohrung ermittelt. Dieser kann dann im Rahmen einer Einzelfallprüfung differenziert angewendet werden. Zusätzlich kann es erforderlich sein, für Bohrungscluster (z. B. Produktionsbohrungen in einem Erdgasfeld) eine gesammelte Betrachtung mehrerer Objekte durchzuführen (z. B. durch numerische Modellierung zur Ableitung der Gebirgsschädigung).

Bergwerke

In Schritt 1 der Phase I wurden sogenannte Beeinflussungsbereiche um Bergwerke ausgeschlossen. Hier wurden zwei Informationsquellen verwendet:

- durch die Bergbehörden ausgewiesene Beeinflussungsbereiche;
- durch die BGE abgeschätzte Beeinflussungsbereiche.

Für die Ermittlung der Ausschlussflächen wurde zunächst anhand von digitalen Risswerken die laterale Erstreckung des Bergwerks an die Oberfläche projiziert. Zur Abschätzung eines Beeinflussungsbereichs wurde in Anlehnung an die bundesweit gültige Einwirkungsbereichs-Bergverordnung (EinwirkungsBergV) ein sogenannten Grenzwinkel ermittelt. Innerhalb des daraus resultierenden trichterförmigen Gebildes ist eine Gebirgsschädigung zu erwarten. Der Beeinflussungsbereich ergibt

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

sich aus der Schnittstelle des Grenzwinkels mit der Tagesoberfläche. Jedoch können der Spannungszustand sowie die hydraulischen Eigenschaften auch jenseits des Grenzwinkels durch die bergbauliche Tätigkeit negativ verändert worden sein. Die Ausweisung von Beeinflussungsbereichen auf Basis des steilsten Grenzwinkels nach der EinwirkungsBergV in Schritt 1 der Phase I ist nur als eine erste Näherung und als kleinstmöglich anzunehmender Ausschlussbereich zu verstehen.

Im Schritt 2 der Phase 1 werden zunächst die „vorgemerkten bergbaulichen Tätigkeiten“ aus dem Zwischenbericht Teilgebiete (BGE 2020h) adressiert. Durch eine Vervollständigung der Datenbasis ergeben sich erweiterte oder zusätzliche ausgeschlossene Gebiete im Sinne des § 22 Abs. 2 Nr. 3 StandAG (siehe Beispiel 42: Vervollständigung der Datengrundlage zum Ausschlusskriterium „Bergwerke“).

Darüber hinaus soll im Schritt 2 der Phase I die Anwendungsmethodik für das Ausschlusskriterium „Bergwerke“ weiterentwickelt werden. Ziel ist eine Methode, durch die eine individuelle Bestimmung eines Sicherheitsabstandes um Bergwerke möglich ist. Unter Einbezug unterschiedlicher Quellen soll dieser durch Bergwerke verursachte negative Beeinflussungsbereich abgeleitet werden. Dieser Sicherheitsabstand ermöglicht im Sinne einer belastbaren, robusten Sicherheitsaussage, dass keine negativen Einflüsse gemäß § 22 Abs. 2 Nr. 3 StandAG auf das Gebirge vorliegen.

Das grundlegende Prinzip der weiterentwickelten Vorgehensweise ist, dass sich die Wahl der Methode an der Art des Bergbaus, dem Betriebsstatus und der primären Ursache der Schädigungen des Gebirges orientieren soll. Dazu werden die Bergwerke hinsichtlich

- ihrer Art (z. B. Steinkohle/Tiefbau, Kali-Steinsalz, Kavernenspeicher, Untertagedeponie, Untertageversatz, Endlager, Pumpspeicherkraftwerke, sonstiger Tiefbau etc.) und
- ihrem Betriebsstatus (z. B. aktiv, in Verwahrung befindlich, geflutet oder versetzt etc.) klassifiziert.

Unterschieden werden ferner die Ursachen für die Schädigungen, wie z. B. Verformungen infolge der Auffahrung von untertägigen Hohlräumen, Entwässerung bzw. (ewige) Wasserhaltungen, Einflüsse der Auffahrungstechnik, thermische Einflüsse etc. Zur Ermittlung der räumlichen Ausdehnung der negativen Einflüsse im Sinne des § 22 Abs. 2 Nr. 3 StandAG werden in Abhängigkeit der Bergwerksarten und Kriterien zusätzlich zur Grubenraumumhüllenden mit Grenzwinkel (in Anlehnung an die EinwirkungsBergV) aus dem Zwischenbericht Teilgebiete (BGE 2020g) weitere Methoden definiert. Die allgemeine Vorgehensweise beinhaltet die Auswertung von Genehmigungsunterlagen, Berechtsamen (Bergbauberechtigungen), Messdaten aus Monitoring, Grubenraumumhüllenden mit Grenzwinkeln, analytischen und ggf. numerischen Untersuchungen. Die allgemeine Vorgehensweise zur Ermittlung des negativen Beeinflussungsbereichs wird so strukturiert, dass die Methoden nacheinander angewendet werden. Dabei fließen die Erkenntnisse der vorangegangenen Methoden in die nachfolgenden ein. Aus der allgemeinen Vorgehensweise werden die Methoden anhand der Bergwerksarten, dem Betriebsstatus und den Ursachen für negative Einflüsse gemäß § 22 Abs. 2 Nr. 3 StandAG auf das Gebirge selektiert. Damit steht für jede Kombination aus Bergwerksart und Ursache für Schädigungen eine Auswahl an Methoden zur Verfügung, um möglichst abdeckend die

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

räumliche Ausdehnung der negativen Einflüsse eines Bergwerks auf das Gebirge zu definieren. Bei Berücksichtigung standortspezifischer bergbaulicher, geologischer und hydrogeologischer Randbedingungen werden die Methoden zunehmend komplexer.

Das Ziel ist es für ein spezifisches Bergwerk die räumliche Ausdehnung der negativen Einflüsse im Sinne des § 22 Abs. 2 Nr. 3 StandAG auf Basis von vorhandenen Informationen zu ermitteln. Sind diese Informationen nicht ausreichend, muss der Einflussbereich unter Verwendung der vorher gewonnen Informationen mittels Berechnungen (Grubenraumumhüllende, analytisch oder numerisch) ermittelt werden.

Beispiel 42: Vervollständigung der Datengrundlage zum Ausschlusskriterium „Bergwerke“

Aktualisierung des Kenntnisstandes im GzME „Thüringer Becken“ - Vervollständigung der Datengrundlage zum Ausschlusskriterium „Bergwerke“

Durch eine Überprüfung und Aktualisierung des Kenntnisstandes der im Zwischenbericht Teilgebiete verwendeten Informationen zum Ausschlusskriterium „Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit – Bergwerke“ ergab sich die Notwendigkeit der Erweiterung der Anzahl der durch bergbauliche Tätigkeiten ausgeschlossenen Gebiete.

Im Schritt 1 der Phase I des Standortauswahlverfahrens wurden für § 22 Abs. 2 Nr. 3 StandAG „Bergwerke“ Objekte als „vorgemerkte bergbauliche Tätigkeiten“ deklariert. Der BGE lagen zu diesen Objekten für den Zwischenbericht Teilgebiete zwar Hinweise auf bergbauliche Tätigkeiten vor, deren Informationsgehalt hat jedoch keine Anwendung der Methode zur Ausweisung von Beeinflussungsbereichen erlaubt. Diese vorgemerkten bergbaulichen Tätigkeiten haben somit bisher nicht zu ausgeschlossenen Gebieten geführt. Im Bundesland Thüringen wurden neun Objekte im Zwischenbericht Teilgebiete als vorgemerkt definiert. Nach BGE (2020h) handelt es sich hierbei um:

- Kavernenfeld Dörnfeld
- Kavernenfeld Kehmstedt
- Gewerkschaft Hüpstedt, Beberstedt und Felsenfest
- Steinsalzbergwerk Ilversgehofen (Erfurt)
- Hain I und II
- Schwarzburg
- Kalibergwerk Oldisleben
- Salzbergwerk Heldrungen II
- Kaliwerke Gewerkschaft Walter und Irmgard

Aktualisierung des Kenntnisstandes im GzME „Thüringer Becken“ - Vervollständigung der Datengrundlage zum Ausschlusskriterium „Bergwerke“

Seit der Veröffentlichung des Zwischenberichts Teilgebiete wurden der BGE neue Daten mit zusätzlichen Risswerken, lateralen und vertikalen Ausdehnungen von Grubenbauen und Teufenangaben zu acht der vorgemerkten Bergwerke in Thüringen übermittelt. Somit war es der BGE möglich, die Rissunterlagen zu georeferenzieren und Grubengebäude zu vektorisieren. Da sich diese bergbaulichen Tätigkeiten im endlagerrelevanten Tiefenbereich von mindestens 300 m Tiefe befinden, wurden für diese analog zu der Anwendungsmethode im Schritt 1 der Phase I (BGE 2020h) Beeinflussungsbereiche und somit neu ausgeschlossene Gebiete definiert (Abbildung 83).

Sechs der vorgemerkten Objekte befinden sich innerhalb des GzME „Thüringer Becken“ bzw. wirken sich auf dieses aus. Die neu ausgeschlossenen Bergwerke inklusive Beeinflussungsbereich befinden sich vorrangig im nördlichen Thüringer Becken. Eines ist im Süden des Thüringer Beckens lokalisiert (Abbildung 83).

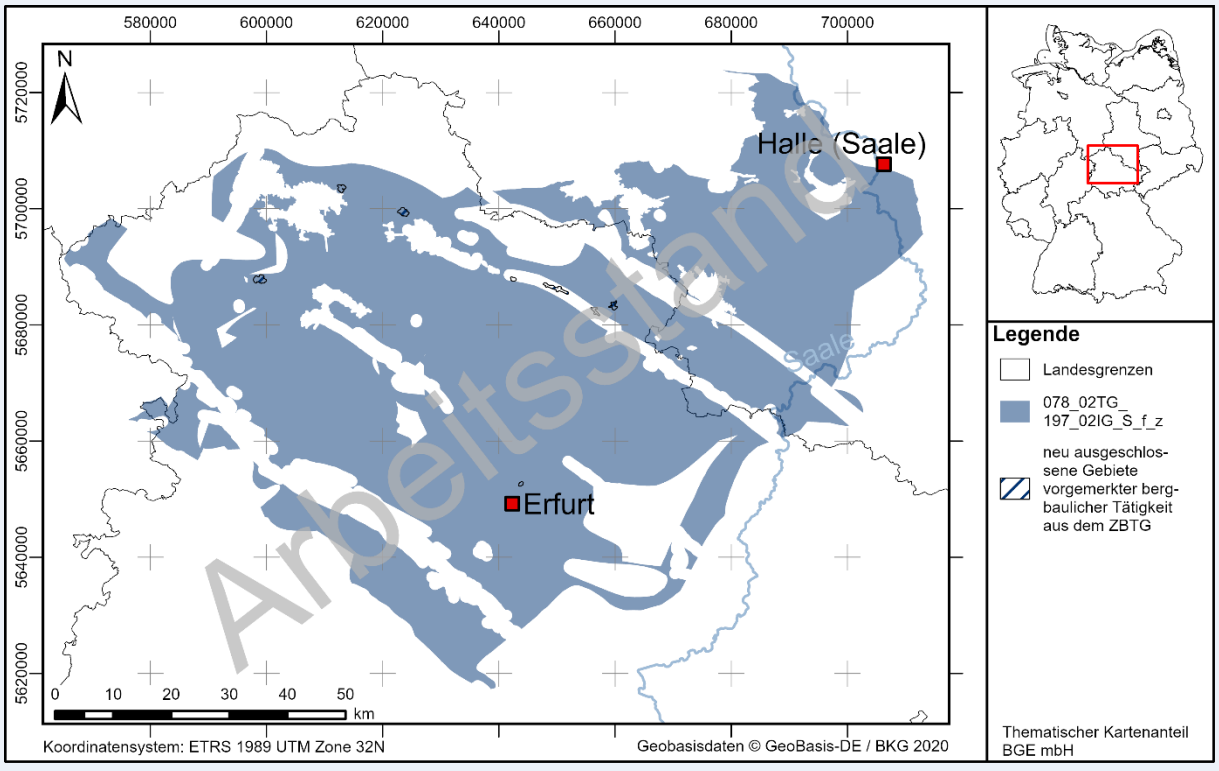


Abbildung 83: Übersicht über die in Schritt 1 der Phase I vorgemerkten bergbaulichen Tätigkeiten, die in Schritt 2 der Phase I zu einem ausgeschlossenen Gebiet führen

5.5.3 Seismische Aktivität

Das Ausschlusskriterium „seismische Aktivität“ ist in § 22 Abs. 2 Nr. 4 StandAG definiert: „*die örtliche seismische Gefährdung ist größer als in Erdbebenzone 1 nach DIN EN 1998-1/NA 2011-01*“.

Für Schritt 2 der Phase I ist keine Änderung der Vorgehensweise aufgrund des statischen Verweises des Gesetzestextes auf die DIN EN 1998-1/NA:2011-01 vorgesehen. Seismische Aktivtäten, die außerhalb der Erdbebenzonen 2 und 3 liegen, werden jedoch im Rahmen der Arbeiten der geogenen Entwicklungen berücksichtigt und hinsichtlich potenzieller Auswirkungen auf die Sicherheitsfunktionen bewertet.

5.5.4 Vulkanische Aktivität

Das Ausschlusskriterium „Vulkanische Aktivität“ ist in § 22 Abs. 2 Nr. 5 StandAG definiert: „*es liegt quartärer Vulkanismus vor oder es ist zukünftig vulkanische Aktivität zu erwarten*“.

Basierend auf den Ergebnissen des Berichts von Schreiber & Jentzsch (2021) werden Gebiete mit einer hohen Eintrittswahrscheinlichkeit von zukünftiger vulkanischer Aktivität unter Berücksichtigung eines erweiterten Sicherheitssaums von 25 km als ausgeschlossene Gebiete ermittelt (Beispiel 43). Im Schritt 1 der Phase I wurde zunächst nur ein Sicherheitssaum von 10 km um vulkanische Eruptionszentren abgegrenzt. Kann Vulkanismus in einem Gebiet mit nur geringer Wahrscheinlichkeit im Bewertungszeitraum auftreten, werden die möglichen Folgen und entsprechende sicherheitsgerichtete Bewertungen bei der Untersuchung der Entwicklungen berücksichtigt (Kapitel 8.2).

Beispiel 43: Anwendung des Ausschlusskriteriums „Vulkanische Aktivität“ am Beispiel der Region Vogtland-Oberpfalz

Anwendung des Ausschlusskriteriums „Vulkanische Aktivität“ am Beispiel der Region Vogtland-Oberpfalz

Die Studie „Vulkanische Gefährdung in Deutschland“ von Schreiber & Jentzsch (2021) überprüfte das Gefährdungspotenzial durch Vulkanismus und mögliche Auswirkungen auf ein Endlager für hochradioaktive Abfälle. Es wurden Gebiete bewertet, in denen vulkanische Aktivität in den letzten 10 Millionen Jahren auftrat oder älterer tertiärer Vulkanismus in der Zukunft reaktiviert werden könnte.

Zur Bewertung einer möglichen vulkanischen Aktivität im Bereich der Region Vogtland-Oberpfalz kann auf umfangreiche Fachliteratur zu seismischer und mikroseismischer Aktivität (d. h. Schwarmbeben, z. B. Fischer et al. 2014), Isotopenanalysen von juvenilen Gasen (z. B. aus Mofetten, d. h. Austrittspunkte von CO_2, vgl. Weinlich et al. 1999; Geissler et al. 2005; Weinlich 2014; Bräuer et al. 2018) und geologische Interpretationen (z. B. Babuška et al. 2007; Hrubcová et al. 2017; Heinicke et al. 2019) zurückgegriffen werden.

Laut Schreiber & Jentzsch (2021) lässt sich eine hohe Wahrscheinlichkeit für eine vulkanische Gefährdung des südlichen Sachsens und des nordöstlichen Bayerns in den nächsten eine Million Jahren ableiten. Zur Festlegung des Gebiets mit hoher Eintrittswahrscheinlichkeit vulkanischer Aktivität in den nächsten eine Million Jahren wurden die bekannten quartären Vulkane und Maare Eisenbühl, Kammerbühl, Neualbenreuth und Mýtina ausgewählt. Zusätzlich dienen die Zentren der „Erdbebenschwärme“ als Grundlage zur Festlegung des Gebiets, da Aufstiegswege der Gase unter bestimmten Spannungszuständen als potenzielle Wegsamkeiten für Magmen dienen könnten. Erdbebenzentren, welche auf rein tektonische Prozesse zurückzuführen sind, wurden bei der Festlegung des Gebiets mit hoher Eintrittswahrscheinlichkeit vulkanischer Aktivität nicht berücksichtigt. Der Sicherheitsabstand, der die Außengrenze des Gebiets mit hoher Eintrittswahrscheinlichkeit vulkanischer Aktivität definiert, wurde mit 25 km angesetzt. Dieser Sicherheitsabstand setzt sich aus der Streuungsbreite um existierende Vulkane und potenzielle Aufstiegswege von 15 km und dem darauf aufbauenden Sicherheitszuschlag von 10 km zusammen (Schreiber & Jentzsch 2021).

Das vorläufige Ergebnis der weiterentwickelten Anwendung des Ausschlusskriteriums „Vulkanische Aktivität mit den Sicherheitsabständen nach Schreiber & Jentzsch (2021) im Vergleich zu den ausgewiesenen Teilgebieten (BGE 2020g) ist in Abbildung 84 dargestellt.

Anwendung des Ausschlusskriteriums „Vulkanische Aktivität“ am Beispiel der Region Vogtland-Oberpfalz

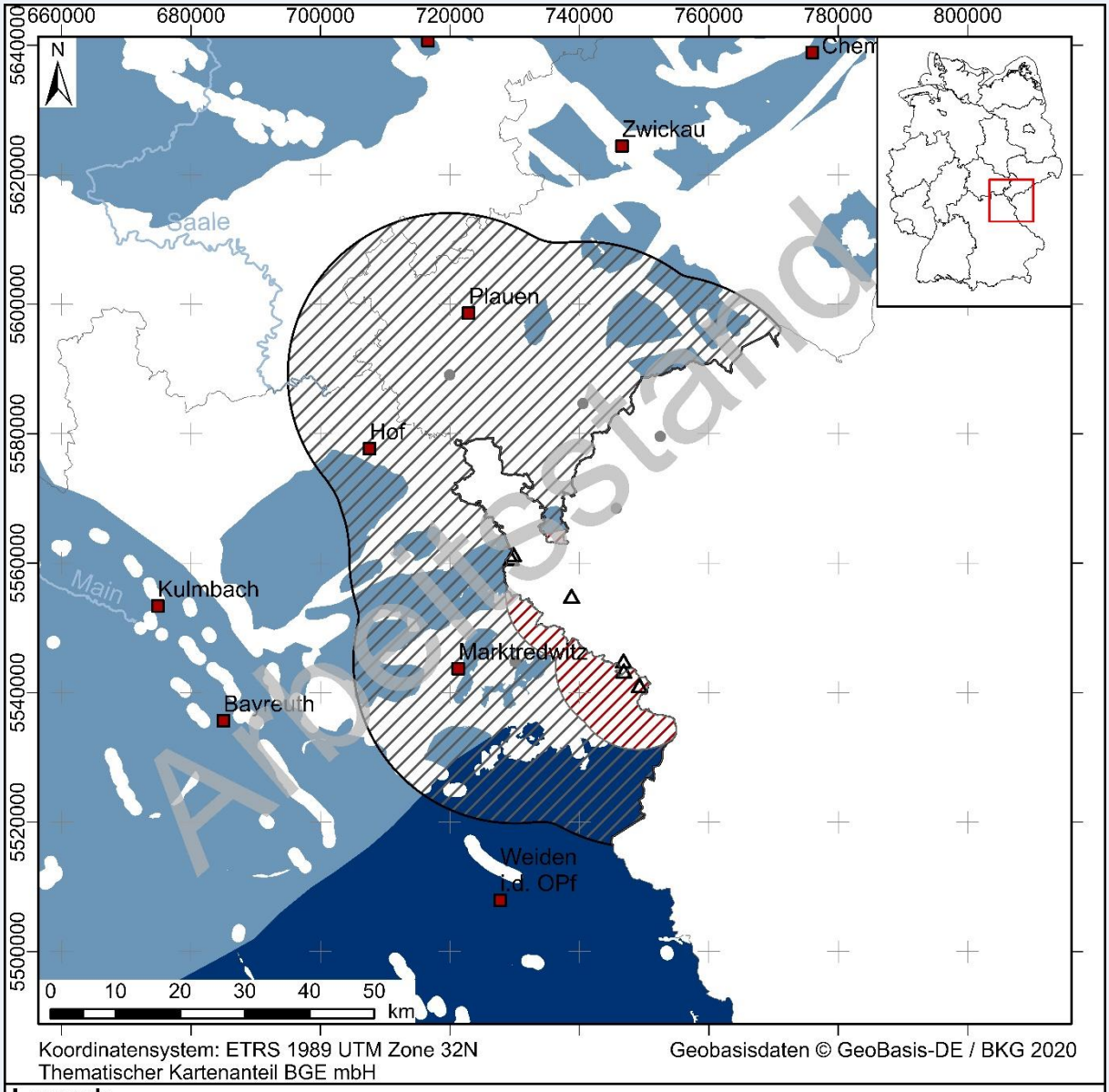


Abbildung 84: *Ausgeschlossene Gebiete im Vogtland und Nordostbayern durch die weiterentwickelte Anwendung des Ausschlusskriteriums „Vulkanische Aktivität“ nach Schreiber & Jentzsch (2021).*

Untersuchungsräume in den Teilgebieten 009_00TG_194_00I_K_g_SO und 013_00T_195_00IG_K_g_MO fallen dementsprechend kleiner aus.

5.5.5 Grundwasseralter

Das Ausschlusskriterium „Grundwasseralter“ ist in § 22 Abs. 2 Nr. 5 StandAG definiert: „*in den Gebirgsbereichen, die als einschlusswirksamer Gebirgsbereich oder Einlagerungsbereich in Betracht kommen, sind junge Grundwässer nachgewiesen worden*“.

Alle vorliegenden Daten zum Grundwasseralter sind mit Bohrungen korreliert, weshalb in Schritt 1 der Phase I kein zusätzlicher Ausschluss stattfand. Es ist davon auszugehen, dass auch in Schritt 2 nur wenige Daten zum Grundwasseralter vorliegen werden. Es ist vorgesehen, dass diese in einer Einzelfallbetrachtung zielgerichtet bewertet werden. Dies kann ggf. im Kontext der hydrogeologischen Verhältnisse zu einem flächenhaften Ausschluss führen.

5.6 Unterteilung von Untersuchungsräumen in Teiluntersuchungsräume

Großflächige Untersuchungsräume können in mehrere kleinräumige Teiluntersuchungsräume unterteilt werden. Die Unterteilung begründet sich darin, dass die im Rahmen der rvSU getroffenen Bewertungen nachvollziehbarer sind, wenn sie sich auf Gebiete mit möglichst einheitlichen geowissenschaftlichen Charakteristika (z. B. stratigraphisch, lithologisch, tektonisch) beziehen. Dadurch kann die für die Geosynthese verfügbare Datengrundlage kleinräumig zugeordnet und die daraus abgeleiteten Bewertungen nachvollzogen werden. Zudem können die Teiluntersuchungsräume als räumlicher Bezug für die Übertragbarkeit von Informationen und Parametern mittels Analogieschlüssen dienen. Speziell für große Untersuchungsräume ist dies relevant, da es in § 5 Abs. 3 EndlSiUntV heißt:

„Informationen, die außerhalb des Untersuchungsraumes gewonnen wurden, sind zu kennzeichnen. Ihre Übertragbarkeit auf den Untersuchungsraum und die Notwendigkeit der Übertragung sind zu begründen.“

Aufgrund der großflächigen und in ihrem geologischen Aufbau teilweise sehr heterogenen Untersuchungsräume ist eine Bewertung der Übertragbarkeit von Informationen durch die Einteilung in Teiluntersuchungsräume praktikabler. Die Definition eines Teiluntersuchungsraums sollte möglichst so gewählt sein, dass die Teiluntersuchungsräume Gebiete darstellen, die eine jeweils gemeinsame geologische Entwicklung und einen möglichst gleichartigen geologischen Bau aufweisen.

Die Teilgebiete aus Schritt 1 der Phase I bestehen oftmals durch die Anwendung der Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen aus einer Vielzahl geographisch isolierter Gebiete, die die Flächenausdehnung der wesentlichen (geologischen) Barriere unterbrechen. Durch die erweiterte Anwendung der Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen im Rahmen der rvSU können zusätzliche solcher Gebietsteile innerhalb eines Untersuchungsraums entstehen. Zusätzlich werden Untersuchungsräume durch geologische Strukturen wie regionale Störungszonen weiter untergliedert. Diese Strukturen können die Flächenausdehnung des Wirtsgesteinsbereiches mit Barrierefunktion unterbrechen und das potenzielle Endlagerbergwerk natürlicherweise begrenzen. In all diesen Fällen werden einzelne Teiluntersuchungsräume nur für räumlich zusammenhängende und nicht untergliederte Bereiche ausgewiesen. Dies ist wichtig für die Bewertung des Flächenbedarfs, der immer auf räumlich zusammenhängende Bereiche bezogen wird.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

Wenn in einem Untersuchungsraum mehrere Wirtsgesteinsbereiche mit Barrierefunktion vertikal übereinanderliegen, die jeweils einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich aufnehmen können, dann werden mehrere, jeweils individuelle Teiluntersuchungsräume ausgewiesen. Speziell bei mächtigen Abfolgen kann dies sinnvoll sein, da sich die Verortung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs auf die Analysen und Bewertungen auswirkt. Durch die Ausweisung separater Teiluntersuchungsräume wird dies frühzeitig kenntlich gemacht.

Aus diesen Überlegungen lassen sich folgende Aspekte für die Unterteilung eines Untersuchungsraums in Teiluntersuchungsräume ableiten:

- Ein Teiluntersuchungsraum stellt ein geographisch zusammenhängendes Gebiet dar
- Prägende geologische Strukturen können Teiluntersuchungsräume begrenzen
- Lithologische, lithofazielle oder paläogeographische Grenzen können einen Teiluntersuchungsraum begrenzen
- Ein Teiluntersuchungsraum bezieht sich auf **einen** Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion

Trotz der Einteilung in Teiluntersuchungsräume anhand der beschriebenen Aspekte kann zusätzlich eine flächendifferenzierte Bewertung der rvSU innerhalb der Teiluntersuchungsräume stattfinden, sofern dies die räumlichen Ausmaße oder geologischen Gegebenheiten des Teiluntersuchungsraums erfordern (z. B. durch eine Änderung der Teufenlage der Wirtsgesteinsabfolge). Die Grenzziehung, die bei der Einteilung von Untersuchungsräume in Teiluntersuchungsräume vorgenommen wird, ist keine finale Festlegung von Gebietsgrenzen für Standortregionen. Der Grund ist, dass im Rahmen der umfassenden Bewertung der gesamte Untersuchungsraum räumlich differenziert, über die Teiluntersuchungsraumgrenzen hinweg, betrachtet wird.

5.6.1 Beispiele zur Unterteilung von Untersuchungsräumen in Teiluntersuchungsräume

Zur besseren Nachvollziehbarkeit wird die Unterteilung von großflächigen Untersuchungsräumen in Teiluntersuchungsräume anhand der GzME „Thüringer Becken“ (Beispiel 44), „Opalinuston“ (Beispiel 45) und „Saxothuringikum“ (Beispiel 46) veranschaulicht. Hierbei wird auf die spezifischen Aspekte, die in den jeweiligen Untersuchungsraum zur Anwendung gekommen sind, eingegangen.

Beispiel 44: Unterteilung des Untersuchungsraums 03_00UR „Thüringer Becken“ in Teiluntersuchungsräume

Beispiel zur Anwendung im GzME „Thüringer Becken“

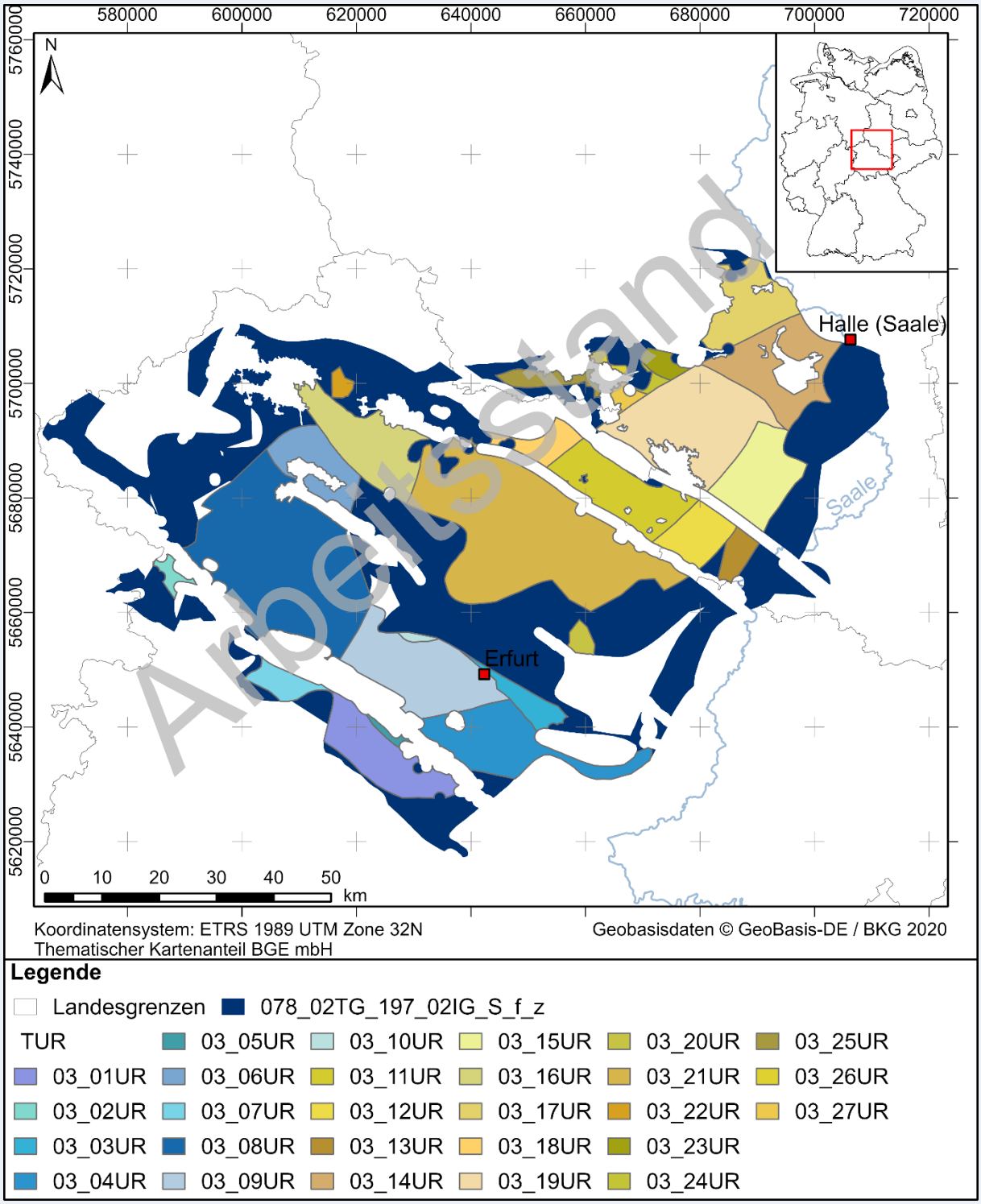
Im Anschluss an die zielgerichtete Anwendung der Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen wurde die verbleibende Fläche des GzME „Thüringer Becken“ in Teiluntersuchungsräume unterteilt. Dabei ergaben sich insgesamt 27 Teiluntersuchungsräumen. Der Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion liegt bei 10 Teiluntersuchungsräumen im Werra-Steinsalz und bei 17 Teiluntersuchungsräumen im Staßfurt-Steinsalz (Abbildung 85). Die Unterteilung erfolgte anhand von bestehenden Teilflächen, die infolge der Fokussierung auf die Steinsalze der Werra- und Staßfurt-Formation durch die erweiterte Anwendung der Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen herausgearbeitet wurden, sowie über Seismik nachweisbare Störungszonen in der Zechsteinbasis bzw. in der Basis des Staßfurt-Steinsalz (Top Basalanhydrit), paläogeographische Elemente (Schwellen/Senken) und Mächtigkeitskarten.

Es wurden folgende Datenquellen verwendet:

- Abb. 1 aus Seidel (2004): Tiefenlinienplan der Zechstein-Basis und tektonische Elemente (Störungen und Störungszonen).
- Abb. 28 und Abb. 29 aus Rappsilber (2003): Tiefenlinienpläne für Zechstein-Basis und Basalanhydrit mit Strukturelementen für das südliche Sachsen-Anhalt.
- Abb. 1 aus Deutsche Stratigraphische Kommission (2020): Paläogeographische Elemente des Zechsteins im Thüringer Becken.
- Abb. 9 aus Seidel (2013): Auslaugungslinie des Staßfurt-Steinsalzes (als Abgrenzung zu Gebieten, wo kein Staßfurt-Steinsalz im Hangenden vorhanden ist).

Im Nordwesten des GzME „Thüringer Becken“ existiert ein Überlappungsbereich, in welchem ein Teiluntersuchungsraum sowohl für Werra- als auch für Staßfurt-Steinsalz ausgewiesen wurde (Teiluntersuchungsraum 03_06UR und 03_16UR).

Beispiel zur Anwendung im GzME „Thüringer Becken“



Arbeitsstand

Abbildung 85: Lage der Teiluntersuchungsräume im GzME „Thüringer Becken“. Die blauen bis türkisfarbenen Töne zeigen Teiluntersuchungsräume des Werra-Steinsalzes, die gelben bis braunen Farben Teiluntersuchungsräume des Staßfurt-Steinsalzes.

Beispiel zur Anwendung im GzME „Thüringer Becken“

Die vorläufige Grenzziehung zwischen den verschiedenen angrenzenden Teiluntersuchungsräumen für das Werra-Steinsalz ist in Tabelle 31 dargestellt.

Tabelle 31: Vorläufige Grenzziehung zwischen den verschiedenen angrenzenden Teiluntersuchungsräumen für das Werra-Steinsalz

TUR-Grenze	Grenzziehung
1, 7	Paläogeographische Grenze: Langensalza-Unterharz-Schwelle
1, 5	Tektonische Grenze: Eichenberg-Gotha-Saalfeld Störungszone
3, 4	Tektonische Grenze: Steiger Störungszone und Tannrodaer Störungszone
3, 9	Tektonische Grenze: Erfurter Störungszone, Steiger Störungszone und Tannrodaer Störungszone
4, 9	Lithologische Grenze: Auslaugungslinie des Staßfurt-Steinsalz (Seidel 2013), d. h. hier kein weiteres Zechstein-Steinsalz im Deckgebirge
6, 8	Tektonische/strukturelle Grenze: Schlotheimer Störungszone und Harnisch Sattel
8, 9	Paläogeographische Grenze: Langensalza-Unterharz-Schwelle
9, 10	Tektonische Grenze: Fahner Störungszone

Die vorläufige Grenzziehung zwischen den verschiedenen angrenzenden Teiluntersuchungsräumen für das Staßfurt-Steinsalz ist in Tabelle 32 dargestellt.

Tabelle 32: Vorläufige Grenzziehung zwischen den verschiedenen angrenzenden Teiluntersuchungsräumen für das Staßfurt-Steinsalz

TUR-Grenze	Grenzziehung
11, 18	Tektonische Grenze: Hornburger Tiefenstörung
14, 15	Tektonische Grenze: Geiseltal-Nordrandstörung
14, 17	Tektonische Grenze: Hornburger Tiefenstörung
14, 19	Tektonische Grenze: Hornburg-SW-Rand-Störung
16, 21	Paläogeographische Grenze: Langensalza-Unterharz-Schwelle
19, 23	Tektonische Grenze: Hornburger Tiefenstörung
19, 24	Tektonische Grenze: Hornburger Tiefenstörung
19, 27	Tektonische Grenze: Hornburger Tiefenstörung
23, 24	Tektonische Grenze: Einsdorf-Störung im Basalanhydrit
24, 27	Tektonische Grenze: Röblinger (?) Störung im Basalanhydrit

Beispiel zur Anwendung im GzME „Thüringer Becken“

Durch diese vorläufige Grenzziehung in Teiluntersuchungsräume ergab sich, dass an mehreren Stellen einzelne Gebiete mit weniger als 3 km² übriggeblieben sind. Diese Gebiete erfüllen nicht mehr die Mindestanforderung des Flächenbedarfs. Die Flächengrößen der einzelnen verbleibenden Teiluntersuchungsräume variieren zwischen 7 km² und 705 km².

Beispiel 45: Unterteilung des Untersuchungsraums 01_00UR „Opalinuston“ in Teiluntersuchungsräume

Beispiel zur Anwendung im GzME „Opalinuston“

Durch die Anwendung einzelner Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen sind Gebiete entstanden, welche im Rahmen der umfassenden Bewertung in Kategorie D eingeordnet werden. Diese Gebiete sind in Abbildung 86 dargestellt und werden im Rahmen der Geosynthese nicht weiter untersucht.

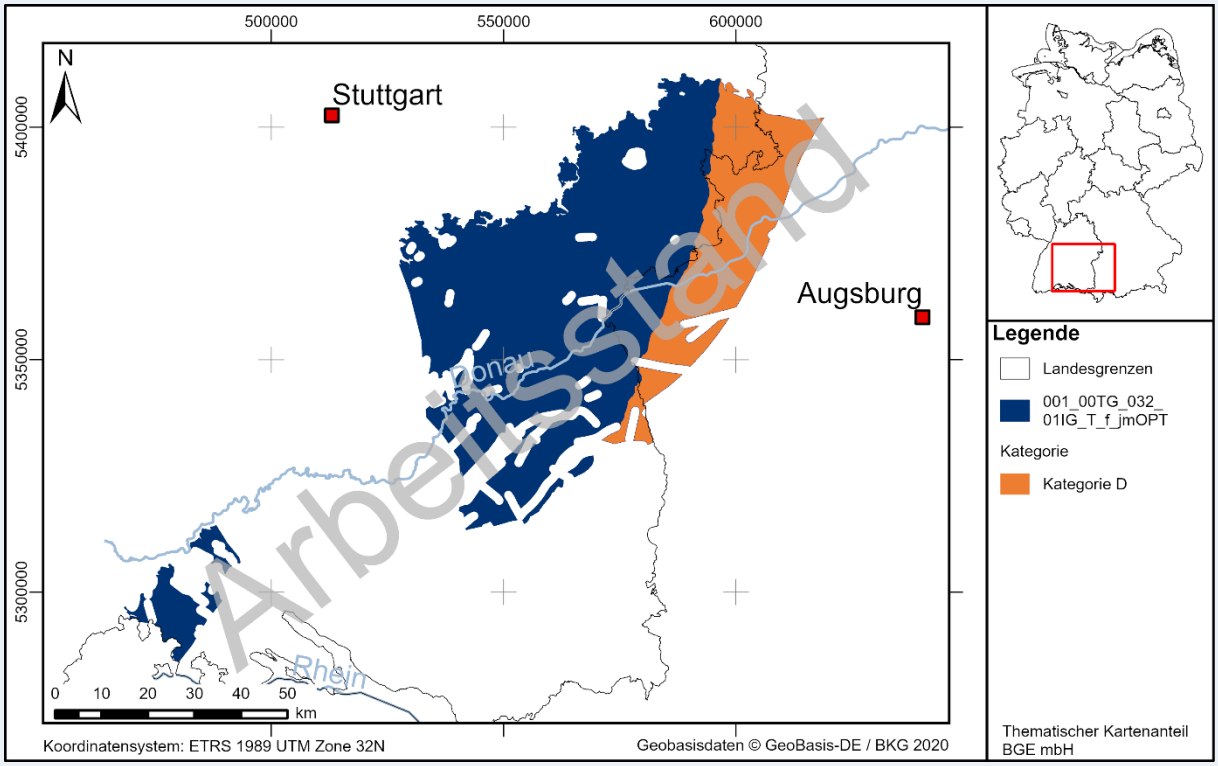
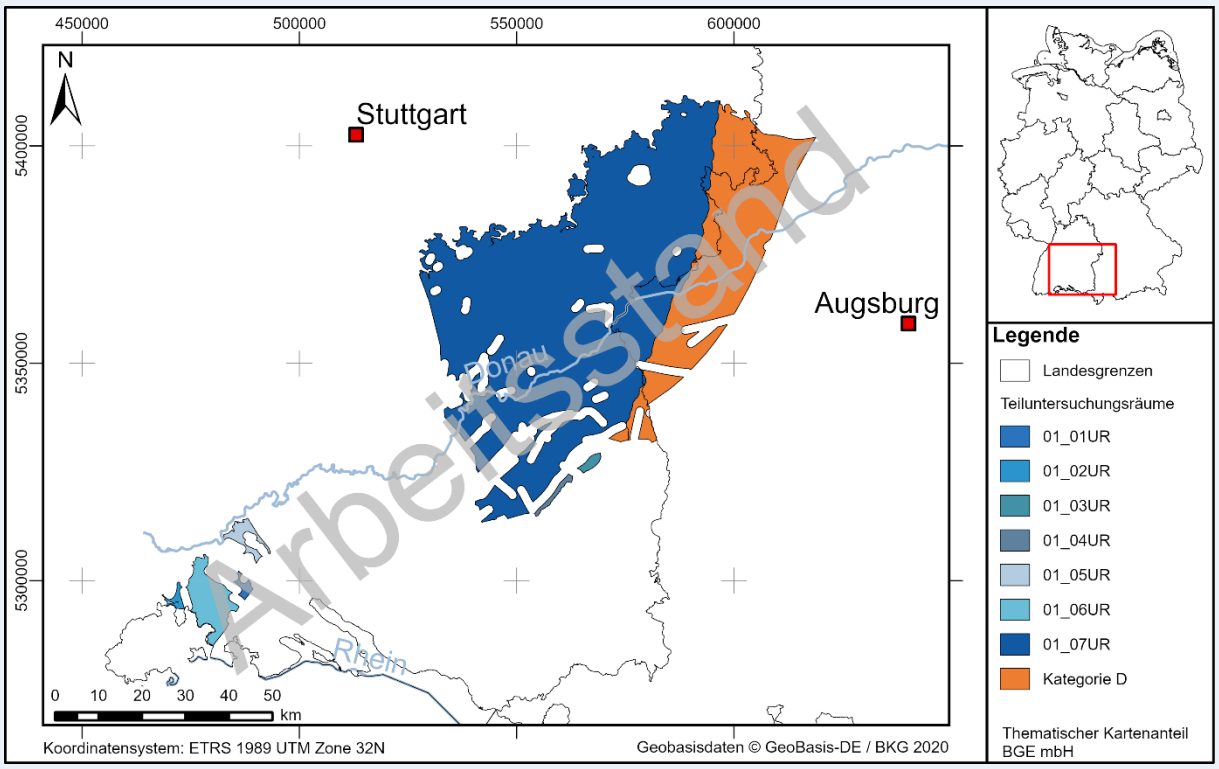


Abbildung 86: Darstellung der Gebiete, die die Mindestanforderungen „Flächenbedarf“ oder „Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ nicht erfüllen und damit nicht weiter betrachtet werden

Die verbleibende Fläche des GzME „Opalinuston“ wurde in insgesamt 7 Teiluntersuchungsräume unterteilt (Abbildung 87). Die Unterteilung erfolgte auf Basis von bestehenden Teilgebietsgrenzen des GzME „Opalinuston“ sowie durch die erweiterte Anwendung der Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen (vgl. Abbildung 86).

Eine Übersicht über die Teiluntersuchungsräume ist in Abbildung 87 gegeben.

Beispiel zur Anwendung im GzME „Opalinuston“



Arbeitsstand

Abbildung 87: Lage der Teiluntersuchungsräume im GzME „Opalinuston“

Die vorläufige Grenzziehung zwischen den verschiedenen angrenzenden Teiluntersuchungsräumen ist in Tabelle 33 dargestellt. Die Flächengrößen der einzelnen verbleibenden Teiluntersuchungsräume variieren zwischen 10 km² und 3 078 km².

Tabelle 33: Vorläufige Grenzziehung zwischen den verschiedenen angrenzenden Teiluntersuchungsräumen imTeilgebiet 001_00

TUR-Grenze	Grenzziehung
01_01UR	Geographische Grenze
01_02UR	Geographische Grenze
01_03UR	Geographische Grenze
01_04UR	Geographische Grenze
01_05UR	Geographische Grenze
01_06UR	Geographische Grenze
01_07UR	Nord, West und Südwest: Geographische Grenze, Ost und Südost: Grenze der erweiterten Anwendung der Mindestanforderungen (MA „Mächtigkeit des ewG“)

Beispiel 46: Unterteilung des Untersuchungsraums 04_00UR „Saxothuringikum in Teiluntersuchungsräume

Beispiel zur Anwendung im GzME „Saxothuringikum“ (009_00TG)

Die Begriffsbestimmung des kristallinen Wirtsgestein nach BGE (2020j) umfasst eine große Anzahl an metamorphen und magmatischen Gesteinen, die in unterschiedlichsten tektonischen Regimen oder Druck- und Temperaturbedingungen entstanden sind. Im GzME „Saxothuringikum“ kommen cadomische, variszische und permische Plutonite sowie hochgradig regionalmetamorphe Gesteine vor. Das Teilgebiet wurde auf Grundlage von regionalgeologischen Gebieten in Teiluntersuchungsräume unterteilt.

Regionalgeologische Gebiete lassen sich wie folgt definieren:

- Gebiete mit gemeinsamer geologischer Entwicklung, in denen sich kristalline Wirtsgesteinsformationen, durch lithologische (unterschiedliche Gesteinsformationen) oder strukturelle Grenzen (v. a. überregionale Hauptstörungen) abgrenzen lassen

Abbildung 88 zeigt die Einteilung des GzME im östlichen Bereich des Saxothuringikums in regionalgeologische Gebiete nach den oben genannten Kriterien. Diese seitens der BGE vorgenommenen Einteilung ist konsistent mit der fachlichen Stellungnahme des LfULG (2021) zum Zwischenbericht Teilgebiete.

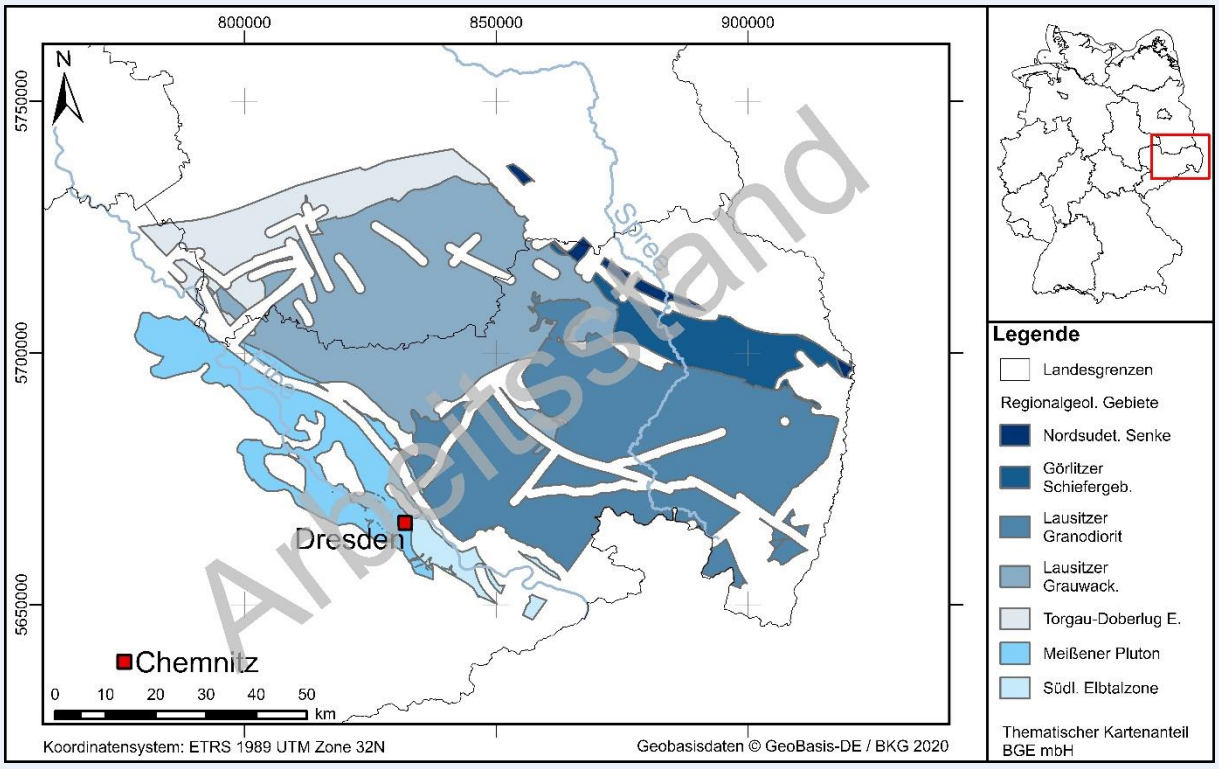


Abbildung 88: Unterteilung des östlichen Bereichs des GzME „Saxothuringikum“ in regionalgeologische Gebiete

Beispiel zur Anwendung im GzME „Saxothuringikum“ (009_00TG)

Für die Unterteilung des östlichen Bereichs des GzME in regionalgeologische Gebiete und darauf basierend in Teiluntersuchungsräume wurden folgende Datenquellen verwendet:

- die lithologischen und strukturellen Grenze aus der geologischen Karte Lausitz-Jizera-Karkonosze im Maßstab 1 : 100 000 (GK100 LJK) sowie teilweise die geologische Karte im Maßstab 1 : 400 000 ohne känozoische Sedimente (GK400)
- Beschreibungen der geologischen Einheiten in der GK100 LJK (Kozdrój et al. 2001)
- Beschreibungen der geologischen Einheiten in Pälchen & Walter (2011)

Innerhalb dieser regionalgeologischen Gebiete wurden ortsbezogene Daten (Schichtenverzeichnisse von Bohrungen), Fachliteratur und geologische Karten (GK25) ausgewertet. Auf Grundlage dieser Auswertung erfolgte die erweiterte Anwendung der Ausschlusskriterien (§ 22 StandAG) und Mindestanforderungen (§ 23 StandAG). Die vorläufigen Ergebnisse sind in Abbildung 89 dargestellt. Im Rahmen der erweiterten Prüfung der Mindestanforderungen konnte festgestellt werden, dass im Norden des GzME keine Gesteinseinheiten oberhalb von 1 500 m Tiefe vorliegen, die der Wirtsgesteinsdefinition der BGE für kristallines Wirtsgestein entsprechen.

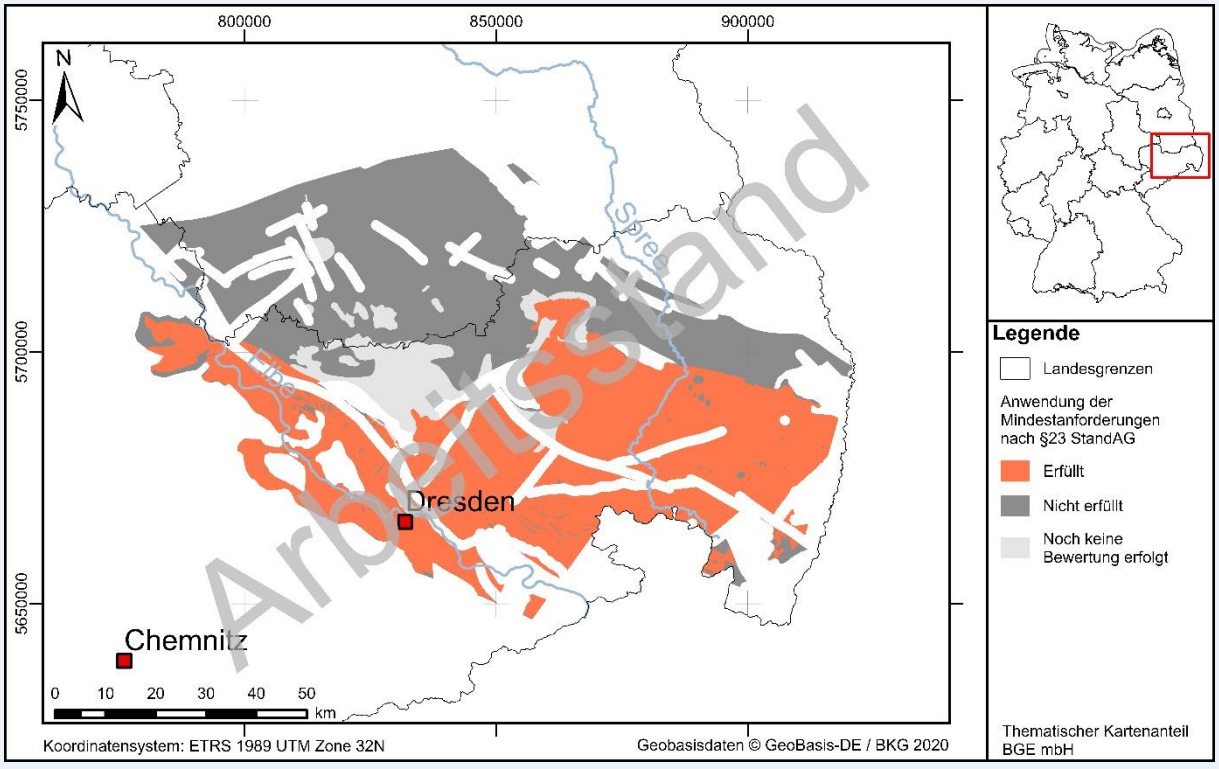


Abbildung 89: Darstellung von Gebieten, welche die Mindestanforderungen nach § 23 StandAG erfüllen, sowie von Gebieten, in denen noch keine Bewertung erfolgt ist

Beispiel zur Anwendung im GzME „Saxothuringikum“ (009_00TG)

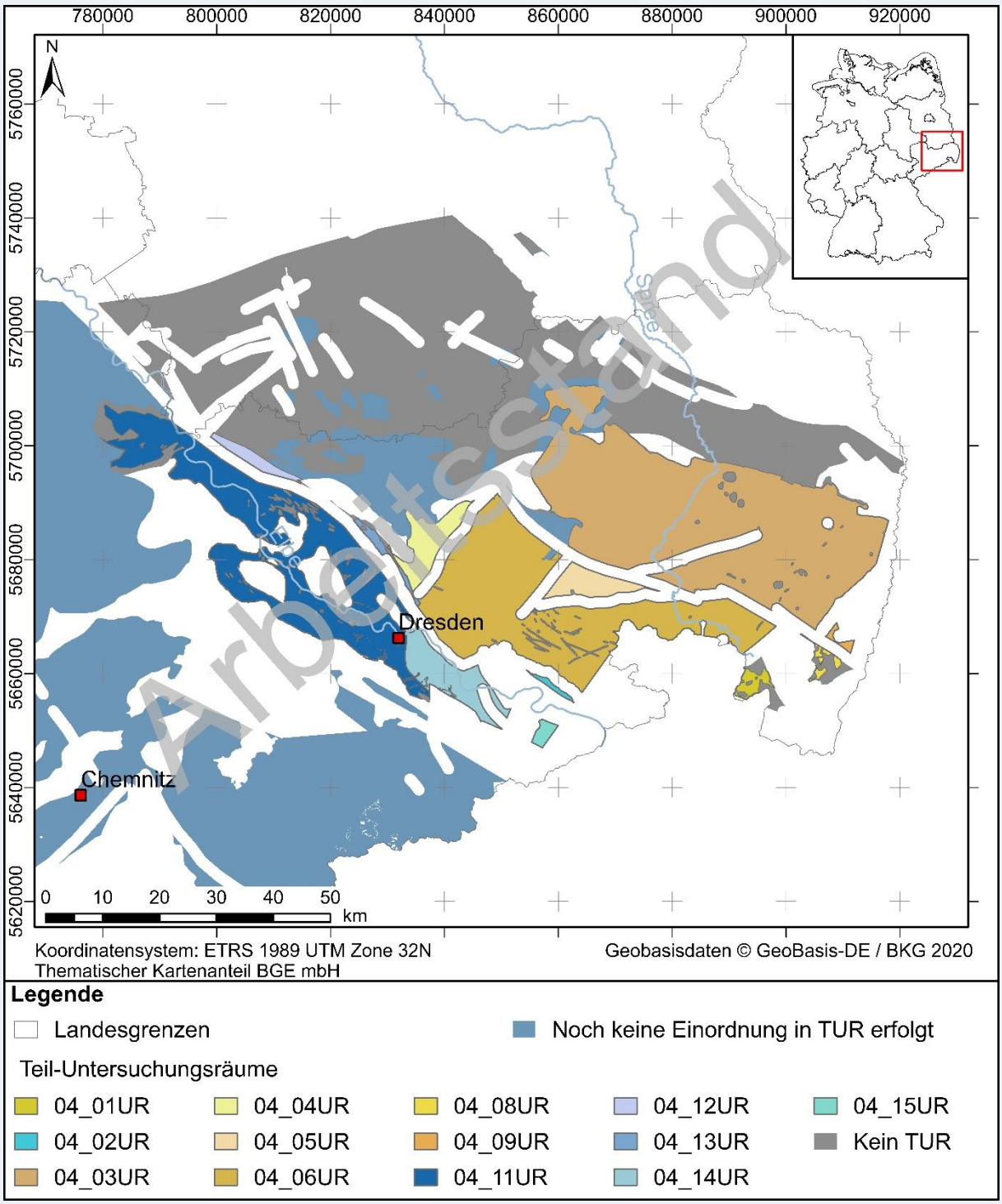
Regionalgeologische Gebiete, welche die Mindestanforderungen nach StandAG erfüllen und von keinen Ausschlusskriterien betroffen sind, werden als Teiluntersuchungsräume berücksichtigt (Abbildung 90). Die Grenzen der Teiluntersuchungsräume beruhen wiederum auf den festgelegten Kriterien zur Bestimmung der regionalgeologischen Gebiete. Somit werden als Teiluntersuchungsräume geographische Räume festgelegt, die:

- räumlich abgrenzbar sind und/oder
- durch lithologische oder strukturelle Kriterien abgrenzbar sowie
- durch eine gemeinsame geologische Entstehung gekennzeichnet sind.

Der Unterschied eines Teiluntersuchungsraums zu einem regionalgeologischen Gebiet besteht z. B. in einer weiteren lithologischen Differenzierung, die über die Einteilung in regionalgeologische Einheiten hinausgehen kann oder durch eine räumliche Trennung, die sich aus der Anwendung der Ausschlusskriterien (§ 22 StandAG) ergeben, wie z. B. dem Ausschlusskriterium „Aktive Störungszonen“.

Die vorläufige Grenzziehung zwischen den verschiedenen Teiluntersuchungsräumen im östlichen Bereich des GzME „Saxothuringikum“ ist in Tabelle 34 dargestellt.

Beispiel zur Anwendung im GzME „Saxothuringikum“ (009_00TG)



Arbeitsstand

Abbildung 90: Lage der Teiluntersuchungsräume im östlichen Bereich des GzME „Saxothuringikum“

Beispiel zur Anwendung im GzME „Saxothuringikum“ (009_00TG)

Tabelle 34: Vorläufige Grenzziehung zwischen den verschiedenen angrenzenden Teiluntersuchungsräumen imTeilgebiet 009_00

TUR-Grenze	Grenzziehung
04_01UR	Lithologische Grenze entlang Lausitzer Granodiorit
04_02UR	Geographische Grenze
04_03UR	Tektonische Grenze entlang Innerlausitzer Störung, lithologische Grenze entlang Lausitzer Grauwacke
04_04UR	Tektonische Grenze entlang Großenhainer Störung, lithologische Grenze entlang Lausitzer Grauwacke
04_05UR	Geographische Grenze
04_06UR	Tektonische Grenze entlang der Lausitzer Überschiebung und geographische Grenzen
04_08UR	Geographische Grenze
04_09UR	Geographische Grenze
04_11UR	Lithologische/tektonische Grenze entlang Großenhainer Störung und Großer Garten Störung
04_12UR	Lithologische/tektonische Grenze entlang Großenhainer Störung
04_13UR	Lithologische/tektonische Grenze entlang Großenhainer Störung
04_14UR	Lithologische/tektonische Grenze entlang Großer Garten Störung
04_15UR	Geographische Grenze

5.7 Geosynthese auf Teiluntersuchungsraumebene

Die Erarbeitung einer Geosynthese findet nach Bedarf mit unterschiedlichem räumlichen Bezug statt. Sie beginnt auf Untersuchungsraumebene und kann für spezifische Teiluntersuchungsräume in Abhängigkeit der jeweiligen Prüfschritte immer detaillierter ausgearbeitet werden. Informationen, die im Rahmen der Geosynthese für einen Teiluntersuchungsraum erarbeitet werden, sind Grundlage für die Teiluntersuchungsraum-spezifische Erstellung der qualitativen sowie quantitativen Analyse des Endlagersystems (siehe Workflow in Abbildung 62 im Kapitel 5.1).

Das folgende Kapitel ist wie folgt untergliedert:

- Charakterisierung der räumlichen Konfiguration des Wirtsgesteinsbereichs mit Barrierefunktion und des Deckgebirges
- Charakterisierung des Internbaus des Wirtsgesteinsbereichs mit Barrierefunktion
- Identifizierung der lokalen geogenen Prozesse
- Erstellen von geologischen Modellen

5.7.1 Räumliche Konfiguration der Gesteinskörper

Die räumliche Konfiguration von Gesteinskörpern ist eine wesentliche Grundlage der sicherheitsgerichteten Bewertung im Rahmen der rvSU, da sich die Lagerungsverhältnise direkt (z. B. Möglichkeit zur Ausweisung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs) sowie indirekt (z. B. thermische Verhältnisse, FEP, Entwicklungen) auf wichtige Aspekte auswirken. Die Informationen zur räumlichen Konfiguration der Gesteinskörper im Untergrund werden im Rahmen der Geosynthese zusammengetragen und genutzt, um beispielsweise die Einheiten für die Transportmodellierung in der quantitativen Analyse des Endlagersystems geowissenschaftlich vorzubereiten. Weiterhin fließen die Ergebnisse direkt in die qualitative Bewertung des sicheren Einschlusses durch die Bewertung der Indikatoren zur Anlage 2 (zu § 24 Abs. 3) StandAG ein (vgl. Kapitel 6).

Bohrungen beinhalten sehr konkrete Informationen über die Beschaffenheit des Untergrundes an einer Lokation. Sie liefern unterschiedliche Informationen, die sich am ursprünglichen Zweck der Bohrung orientieren (vgl. Kapitel 5.2). Um einen Überblick über die zeitliche Abfolge (Stratigraphie), die Lithologie sowie die Eigenschaften bestimmter Gesteinseinheiten in einem Gebiet zu erhalten, werden im Rahmen der Modellerstellung repräsentative Profile für einen Teiluntersuchungsraum erstellt – Profile deren Ziel es ist, die geologischen Gegebenheiten innerhalb eines Teiluntersuchungsraums möglichst repräsentativ zu erfassen. Zusätzlich werden Informationen aus weiteren verfügbaren Datenquellen berücksichtigt.

Die Informationen von Bohrungen können z. B. mithilfe von zweidimensionalen Profilschnitten in eine räumliche Beziehung gesetzt werden. Diese ermöglichen, zusammen mit Kartendarstellung die Interpretation von Geometrien und Rückschlüsse auf die geologische Entwicklungsgeschichte der Gesteinskörper im Untergrund.

Zur Abbildung der räumlichen Verhältnisse im Untergrund können geologische Strukturmodelle genutzt werden. Sie integrieren Informationen aus verschiedenen Datenquellen, wie beispielsweise

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

Schichtenverzeichnisse, bohrlochgeophysikalische Daten oder Informationen aus Kartierungen. Nicht in allen Fällen ist die aufwändige Erstellung von 3D-Modellen sinnvoll. Daher werden als erster Schritt im Rahmen der rvSU repräsentative 1D-Profile oder 2D-Profilschnitte entwickelt.

Jedes repräsentative Profil zeigt das Vorkommen des Wirtsgesteins sowie alle lithologischen Einheiten des Deckgebirges bis zur Geländeoberkante. Das repräsentative Profil kann entweder im Idealfall einer realen Bohrung entsprechen (Abbildung 91) oder besteht aus einer synthetischen Abfolge, deren stratigraphische Abfolge beispielsweise aus mehreren Bohrungen abgeleitet wird. In Gebieten, in denen keine konkreten Mächtigkeitsinformationen aus Bohrungen vorliegen, kann z. B. auf Literaturwerte zurückgegriffen werden (Angaben in den Erläuterungen zu geologischen Karten, Normalprofile etc.). Abweichungen und Besonderheiten, die in dem Gebiet auftreten, werden festgehalten und diskutiert.

Das repräsentative Profil enthält unter anderem eine Unterteilung in Modelleinheiten, die als Basis für die weiteren Modellierungen des Stofftransportes im Rahmen der Analyse des Endlagersystems dienen (Abbildung 91). Für alle im repräsentativen Profil vorkommenden Modelleinheiten werden die für die Analyse des Endlagersystems relevanten Parameter im sogenannten Parameterkatalog (siehe Kapitel 5.7.6) zusammengestellt.

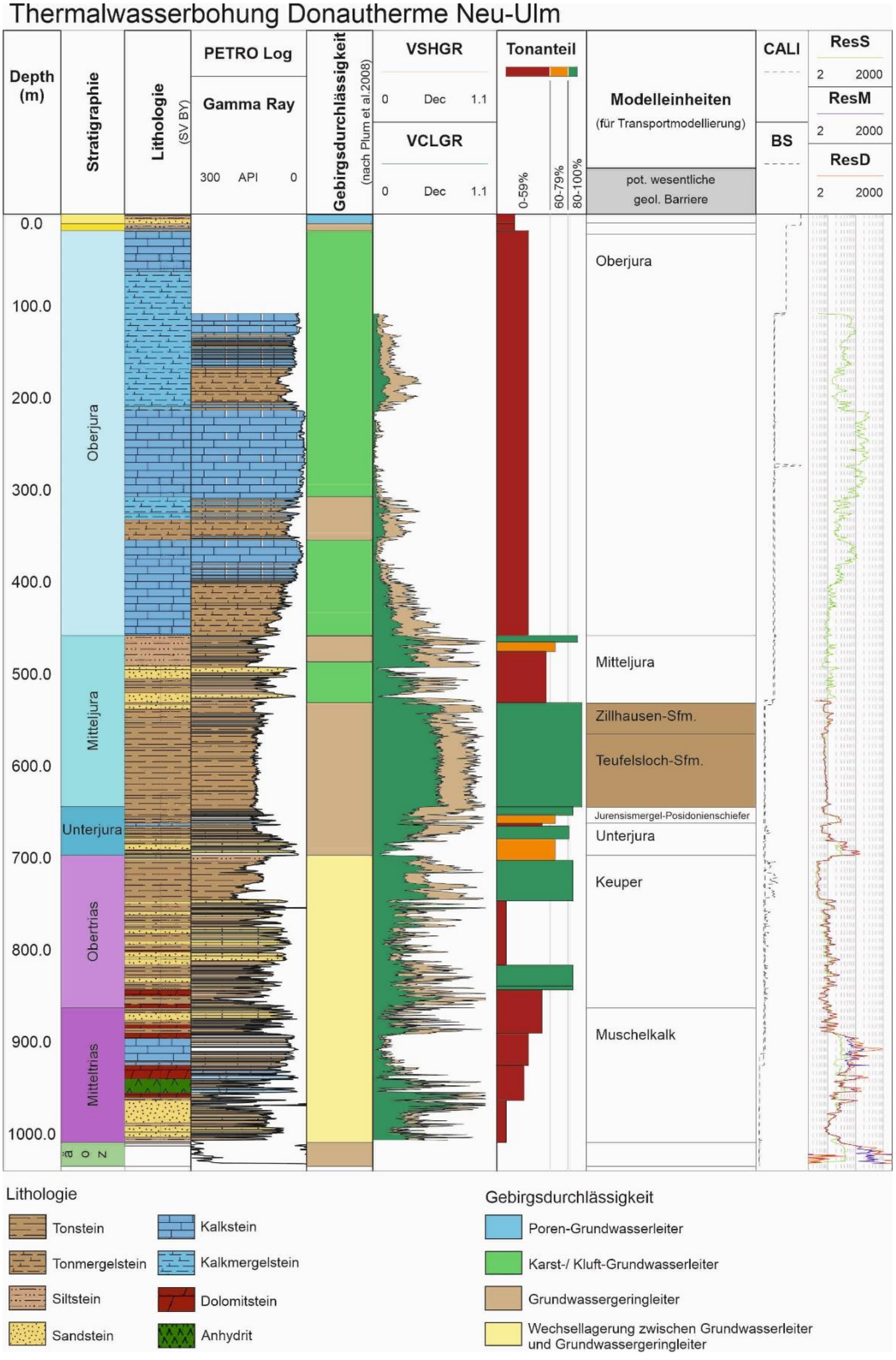


Abbildung 91: Ein Beispiel für ein repräsentatives Profil des Teiluntersuchungsraums 01_07UR, welches ermöglicht, den Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion (Opalinuston-Formation) zu identifizieren.

Im Profil dargestellt sind, neben dem Lithologieprofil aus dem Schichtenverzeichnis der Bohrung und den üblichen bohrlochgeophysikalischen Messungen, das aus den vorhandenen Logs interpretierte Lithologieprofil (PETRO Log) und die über das Gamma-Ray-Log bestimmten Tonanteile (VSHGR – Tonminerale plus silikatisches Feinkorn, VCLGR – Tonmineralanteil).

5.7.1.1 Beschreibung der geologischen Barrieren des Endlagersystems für die Erstellung des vorläufigen Sicherheitskonzeptes und der vorläufigen Auslegung des Endlagers für Teiluntersuchungsräume

Für die im vorläufigen Sicherheitskonzept (§ 6 Abs. 1 EndlSiUntV) und in der vorläufigen Endlagerauslegung (§ 6 Abs. 4 EndlSiUntV) vorgesehene Beschreibung der geologischen Barrieren, insbesondere der grundlegende Eigenschaften und der räumliche Erstreckung des Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion, wird für jeden Teiluntersuchungsraum die stratigraphische Abfolge mithilfe repräsentativer Profile dargestellt (vgl. Abbildung 91). Für einen Teiluntersuchungsraum kann es notwendig sein, mehrere Profile für eine räumliche Differenzierung darzustellen. Aus diesen Profilen sowie den zugehörigen Beschreibungen kann der Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion, dessen grundlegende Eigenschaften sowie die Beschreibung der weiteren geologischen Barrieren des Deck- und Nebengebirges des Endlagersystems abgeleitet werden. Die räumliche Erstreckung (Geometrie sowie Mächtigkeit) der Abfolge, insbesondere des Wirtsgesteinsbereichs mit Barrierefunktion im Untergrund, wird kartographisch, mit Profilschnitten oder mit geologischen 3D-Modellen dargestellt. Temperaturen im Untergrund können aus Temperatur-Logs interpretiert und mit Angaben in Datenbanken wie dem Geothermischen Informationssystem (GeotIS) (Agemar et al. 2012; Agemar et al. 2014a; Agemar et al. 2014b) abgeglichen werden.

Anhand von drei Anwendungsbeispielen wird die räumliche Konfiguration (Geometrie) der Gesteinskörper im Untergrund in Teiluntersuchungsräumen beschrieben. So werden im Folgenden je ein Bespiel für die Wirtsgesteine Tongestein (GzME „Opalinuston“, Beispiel 47), Steinsalz „in steiler Lagerung“ (GzME „Salzstock Bahlburg“, Beispiel 48) und kristallines Wirtsgestein (GzME „Saxothuringikum“, Beispiel 49) vorgestellt.

Beispiel 47: Anwendungsbeispiel Teiluntersuchungsraum 01_07UR im GzME „Opalinuston“ (01_00UR)

Anwendungsbeispiel GzME „Opalinuston“ (01_00UR)

Der Teiluntersuchungsraum 01_07UR im GzME „Opalinuston“ wird durch sieben Bohrungen beschrieben. Zwei Bohrungen befinden sich im Teiluntersuchungsraum 01_07UR und fünf in einer Distanz von etwa 1 km um den Teiluntersuchungsraum 01_07UR. Diese Bohrungen sind KB 102/85 Bad Überkingen, Tiefbohrung 1/69 Bad Ditzenbach, B71/79 Josefs-Therme Bad Überkingen, TB Donautherme Neu-Ulm, Laupertshausen 1, Urach 3/1978 Geothermiebohrung und Alemannia 2/1994 Gomadingen, die den nördlichen, zentralen, westlichen und südlichen Teil des Teiluntersuchungsraums 01_07UR charakterisieren und die räumliche Heterogenität des Untergrundes in diesem Untersuchungsraum widerspiegeln. Aus diesen sieben Bohrungen können fünf repräsentative Profile erstellt werden, die den Teiluntersuchungsraum charakterisieren (Abbildung 92).

Die Teufelsloch-Subformation sowie die Zillhausen-Subformation der Opalinuston-Formation des Mittleren Jura stellen den Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion dar, der den einschlusswirksamen Gebirgsbereich aufnehmen soll (Abbildung 91).

Die räumliche Darstellung im 3D-Modell sowie Karten der Tiefenlage und Mächtigkeit der Opalinuston-Formation zeigen, dass die Opalinuston-Formation in Richtung Südosten einfällt und die Tiefenlage von Nordwest nach Südost kontinuierlich zunimmt (Abbildung 93; siehe Kapitel 5.7.2), sodass der Top der Opalinuston-Formation in Tiefen zwischen 100 m und 1 463 m u. GOK variiert. Die Mächtigkeit der Abfolgen im Teiluntersuchungsraum 01_07UR betragen zwischen 100 m und 159 m. Die Mächtigkeit nimmt von Nordwesten nach Südosten ab (Kapitel 5.7.2).

Anwendungsbeispiel GzME „Opalinuston“ (01_00UR)

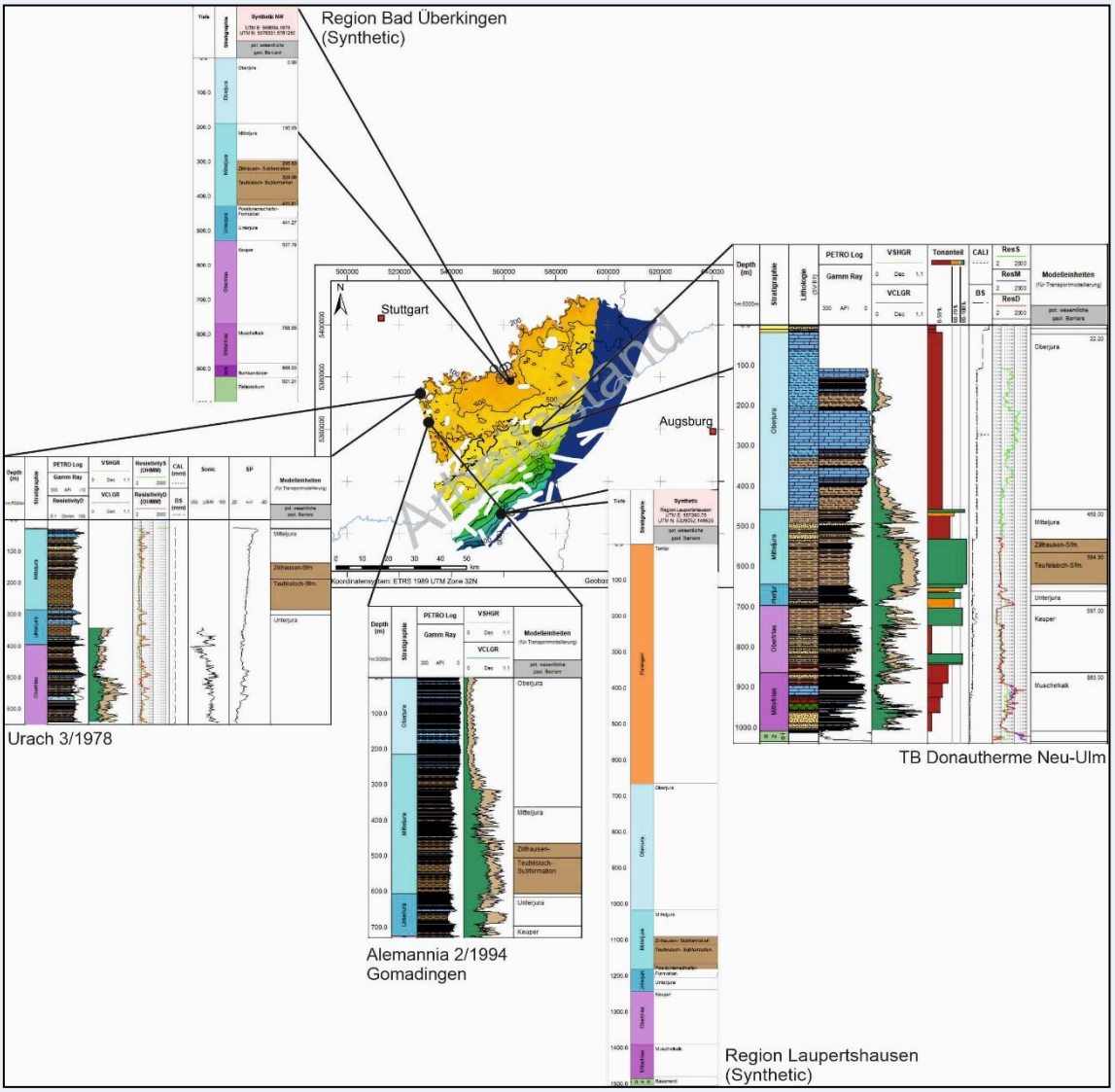


Abbildung 92: Für den Teiluntersuchungsraum 01_07UR sind fünf repräsentative Profile gezeigt, die den Aufbau des Untergrundes in verschiedenen Regionen widerspiegeln.
In diesen Regionen variieren Tiefenlage, Mächtigkeit und der Aufbau des Deckgebirges der Opalinuston-Formation deutlich. Für repräsentative Profile, die auf Grundlage von Bohrungen außerhalb des Teiluntersuchungsraum erstellt wurden, sind die Modelleinheiten und deren Tiefenlage für synthetische Bohrungen an Lokationen innerhalb des Teiluntersuchungsraum gezeigt.

Anwendungsbeispiel GzME „Opalinuston“ (01_00UR)

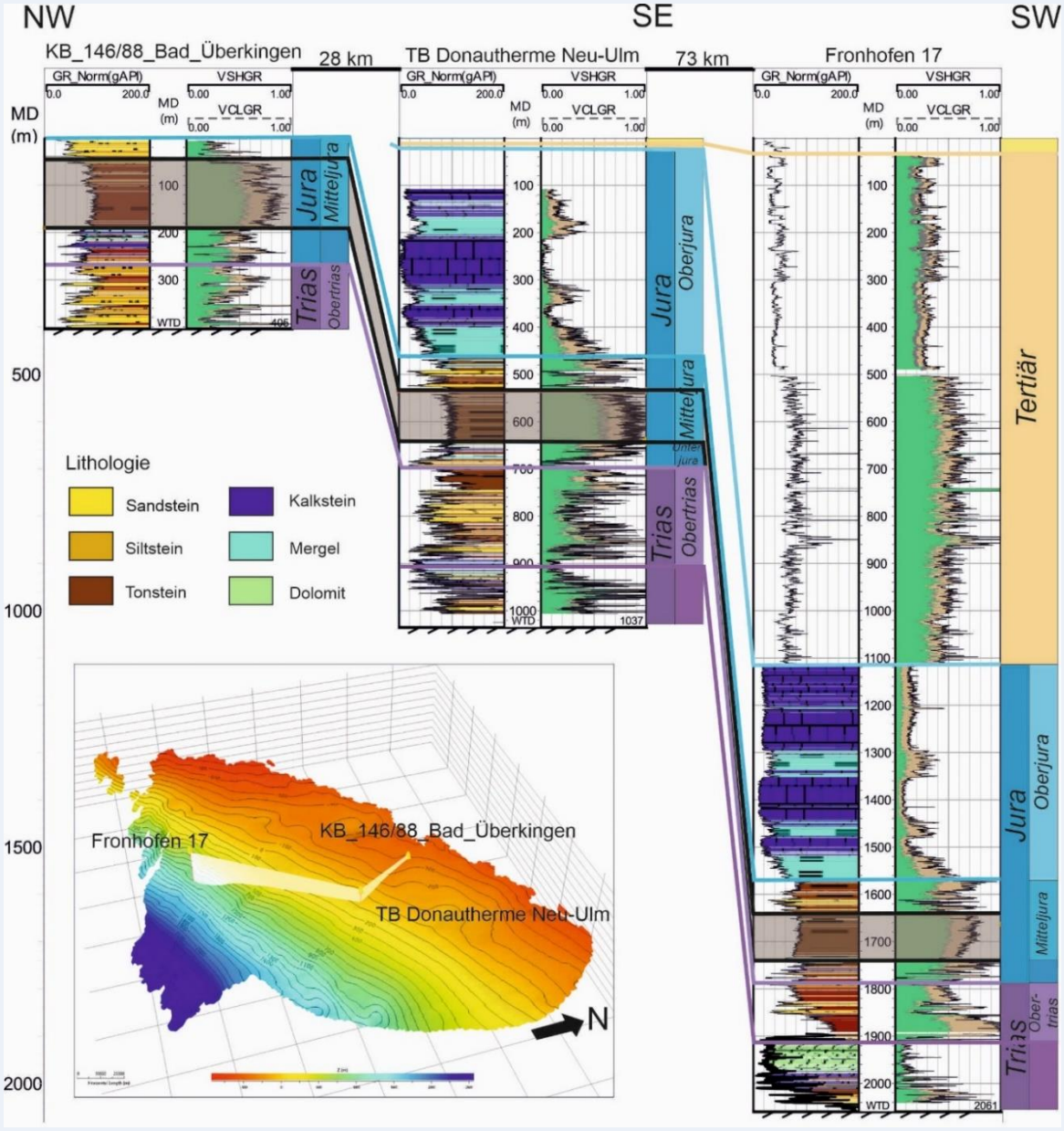


Abbildung 93: Tiefenlage der Opalinuston-Formation auf einem NW-SE-SW-Schnitt von der Schwäbischen Alb bis ins Molassebecken. Die Opalinuston-Formation ist in der Korrelation braun markiert.

Beispiel 48 Anwendungsbeispiel GzME „Salzstock Bahlburg“ (02_00UR)

Anwendungsbeispiel GzME „Salzstock Bahlburg“ (02_00UR)

Der Untersuchungsraum des GzME „Salzstock Bahlburg“ wird durch zwei Profilschnitte entlang von Bohrungen mit dazugehöriger Korrelation der Deckgebirgseinheiten (Abbildung 95, Abbildung 96) beschrieben. Ergänzend dazu wird eine senkrecht zum Streichen der Struktur verlaufende seismische Linie sowie ein Profilschnitt am selben Ort aus dem geologischen 3D-Modell (Abbildung 97) zur Charakterisierung des Untersuchungsraumes herangezogen. Zusätzlich wurde für den Zentralbereich der Salzstruktur ein repräsentatives Profil erstellt (Abbildung 94). Eine Gesamtübersicht zur Salzstruktur Bahlburg gibt ein Nord-Süd-Schnitt aus dem geologischen 3D-Modell (Abbildung 98).

Auf Basis vorhandener Daten (Bohrungen, Seismik, geologisches 3D-Modell etc.) zum Salzstock und Deckgebirge, in Kombination mit einem generellen Prozessverständnis zur Salzstockgenese, wurde ein synthetisches Profil im Zentralbereich des Teilgebietes erstellt (Abbildung 94 und Abbildung 98). Neben den Deckgebirgseinheiten wird die benötigte Salzschwebe von 300 m und Bereiche von mächtigem Steinsalz abgebildet, in denen es potenziell möglich wäre einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich auszuweisen. Das Zechstein-Salinar stellt den Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion dar, in dem ein einschlusswirksamer Gebirgsbereich ausgewiesen werden kann. Die Abfolge des Zechstein wird von jüngeren Schichten des Quartär, Tertiär und der Oberkreide überdeckt, die sowohl erosions- (v. a. Oberkreide) als auch grundwasserhemmende (v. a. Tertiär) Eigenschaften aufweisen.

Anwendungsbeispiel GzME „Salzstock Bahlburg“ (02_00UR)

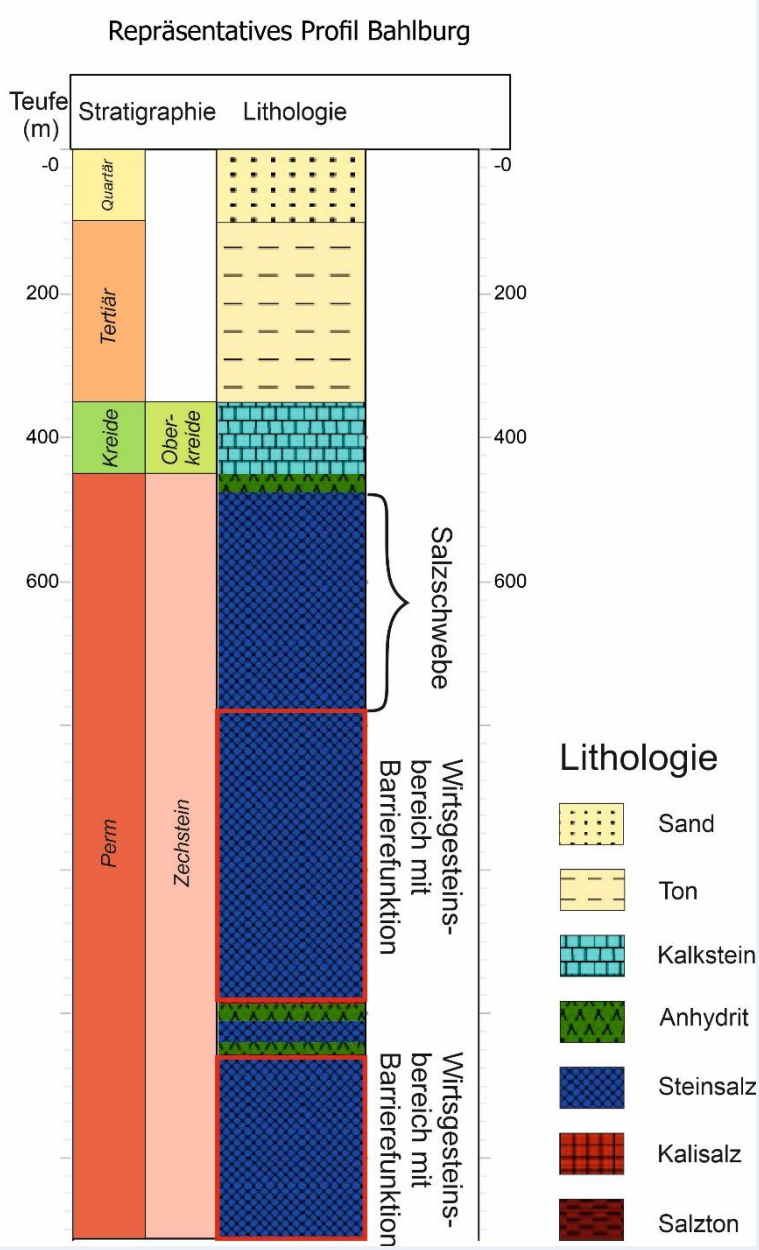


Abbildung 94: Synthetisches, repräsentatives Bohrprofil im Zentralbereich der Salzstruktur Bahlburg.
Teufenwerte sind ab Zechstein abgeschätzt.

Das Schichtenverzeichnis der dargestellten Bohrung Bahlburg 1 (Abbildung 95 und Abbildung 96) zeigt beispielhaft Bereiche mit Steinsalzmächtigkeit von mehr als 100 m, die der Staßfurt-Formation zuzuordnen sind. Die Schichten wurden mit einem Einfallen von ca. 70° eingemessen. Die Bohrung durchteuft mit zunehmender Tiefe auch Einheiten der Leine-Folge

Anwendungsbeispiel GzME „Salzstock Bahlburg“ (02_00UR)

und zeigt eine für Salzstrukturen typische kleinräumige Verfaltung im Randbereich der Salzstruktur. Das steile Einfallen der Schichten muss bei der Interpretation der Mächtigkeit berücksichtigt werden. Werte die nicht senkrecht zur Schichtfläche gemessen werden, werden als scheinbare Mächtigkeit bezeichnet und sind in Abhängigkeit von der räumlichen Orientierung einer Schicht und der Lage der Bohrung, zu hoch oder zu niedrig. Bohrungsinformationen aus anderen Bereichen des Norddeutschen Beckens haben Mächtigkeiten des Steinsalzes der Staßfurt-Formation von bis zu 600 m nachgewiesen (Balzer et al. 2020). Aufgrund der beckenzentralen Lage des GzME kann angenommen werden, dass sich die in der Bohrung Bahlburg 1 nachgewiesenen Mächtigkeiten der Steinsalzabfolgen lateral fortsetzen. Abgeleitet aus der Lage der Bohrung kann dies als Anzeiger für ein großes Potenzial an reinem Steinsalz im Zentralbereich des Salzstockes herangezogen werden.

Die Abbildung 95 und Abbildung 96 zeigen die Korrelation der Deckgebirgseinheiten. Vorhandene zusätzliche geologischen Barrieren im Deckgebirge, wie z. B. die Tonformationen im Tertiär, können mit ihrer Mächtigkeit und Ausprägung abgeschätzt und in den Profilen dargestellt werden. Die Profile charakterisieren auch die Sedimentabfolgen des Nebengebirges außerhalb des Salzstocks Bahlburg, um ein vollständiges geologisches Bild zu zeigen. Die Gesteinsabfolgen innerhalb der Salzstruktur, welche durch Bohrungen erfasst werden, sind nicht repräsentativ für das gesamte Teilgebiet, da hier die im Detail unbekannte Verfaltung der geologischen Einheiten nur eingeschränkt eine räumliche Übertragung von Bohrungsinformationen zulassen. Dennoch sind sie ein wichtiger Hinweis für die konkreten geologischen Verhältnisse an der erbohrten Lokation.

Anwendungsbeispiel GzME „Salzstock Bahlburg“ (02_00UR)

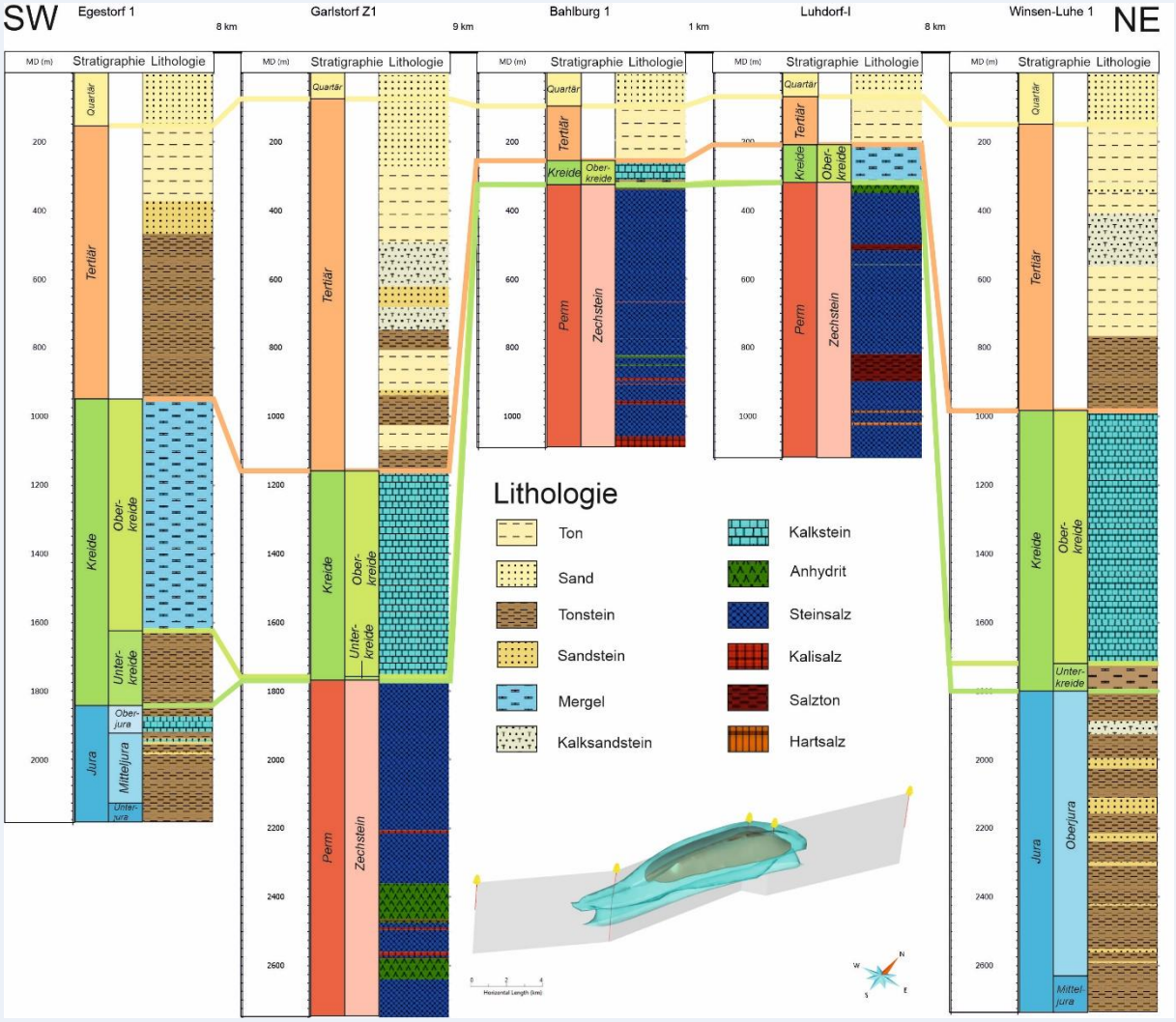


Abbildung 95: Bohrungskorrelation der Deckgebirgseinheiten in einem SW-NE verlaufenden Profil über den Salzstock Bahlburg. Bohrungslokationen, die Salzstruktur Bahlburg und das enthaltene Teilgebiet sind in einem Übersichtsschnitt aus dem geologischen 3D-Modell visualisiert.

Anwendungsbeispiel GzME „Salzstock Bahlburg“ (02_00UR)

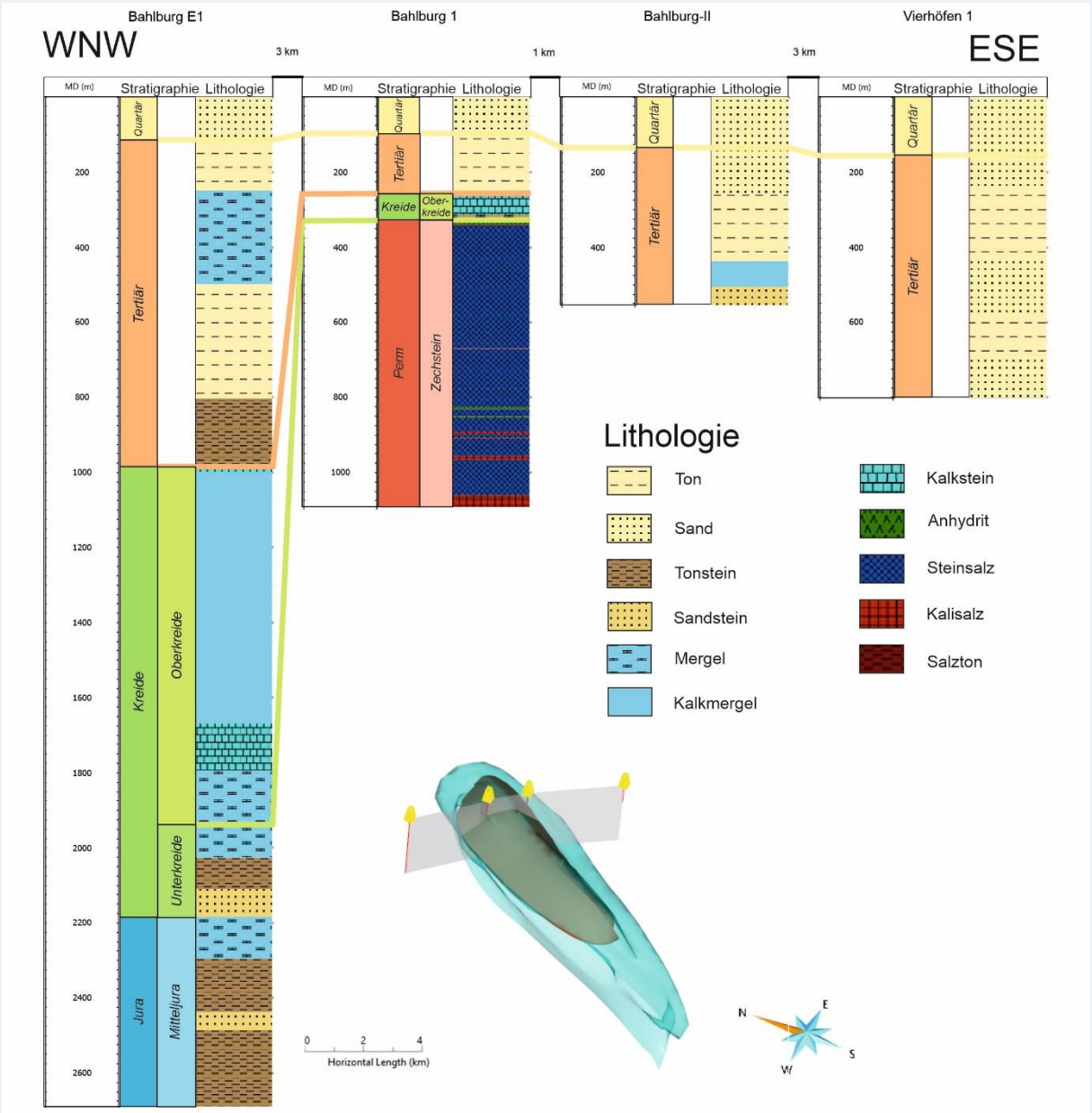


Abbildung 96: Bohrungskorrelation der Deckgebirgseinheiten in einem WNW-ESE verlaufenden Profil über den Salzstock Bahlburg. Bohrungslokationen, die Salzstruktur Bahlburg (türkis) und das enthaltene Teilgebiet (dunkelgrün) sind unten im Bild in einem Übersichtsschnitt aus dem geologischen 3D-Modell visualisiert.

Anwendungsbeispiel GzME „Salzstock Bahlburg“ (02_00UR)

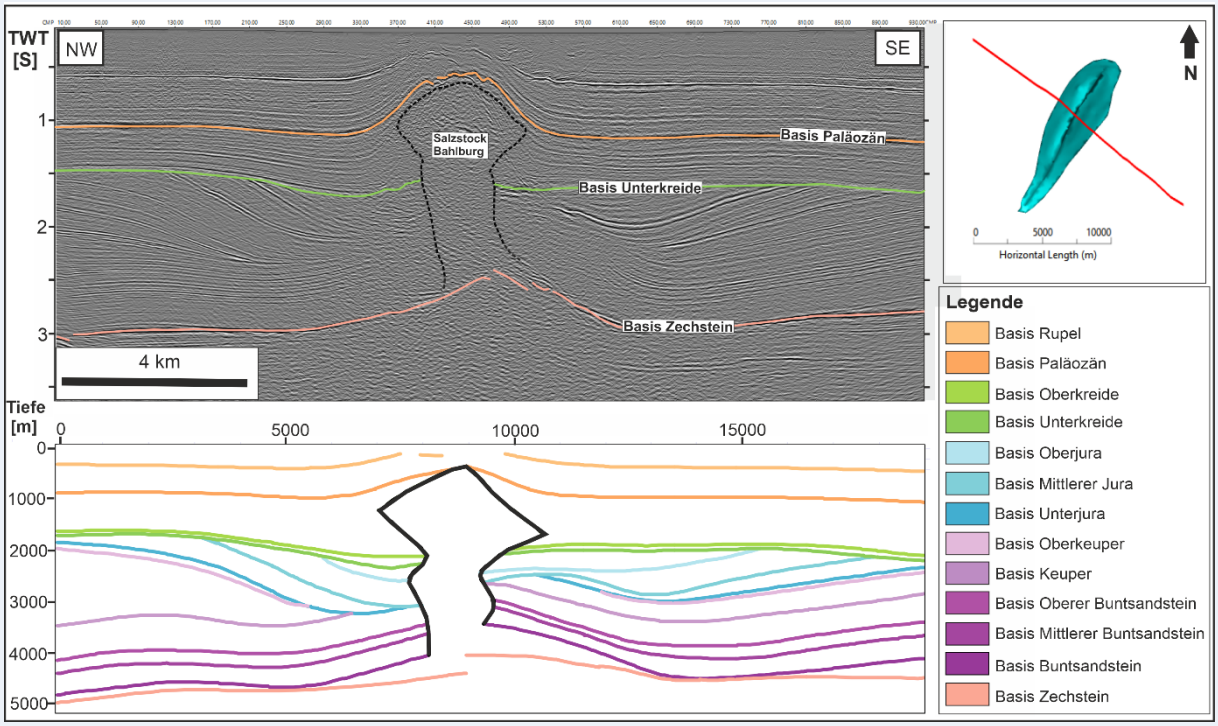


Abbildung 97: NW-SE gerichtetes seismisches Profil in Zeit [Zwei-Wege Laufzeit, TWT] (oben) und ein lagegleicher Profilschnitt (unten) aus dem geologischen 3D-Modell (BGR et al. 2021) über dem GzME „Salzstock Bahlburg“. Die Lage der Profile ist durch die rote Linie oben rechts gekennzeichnet.

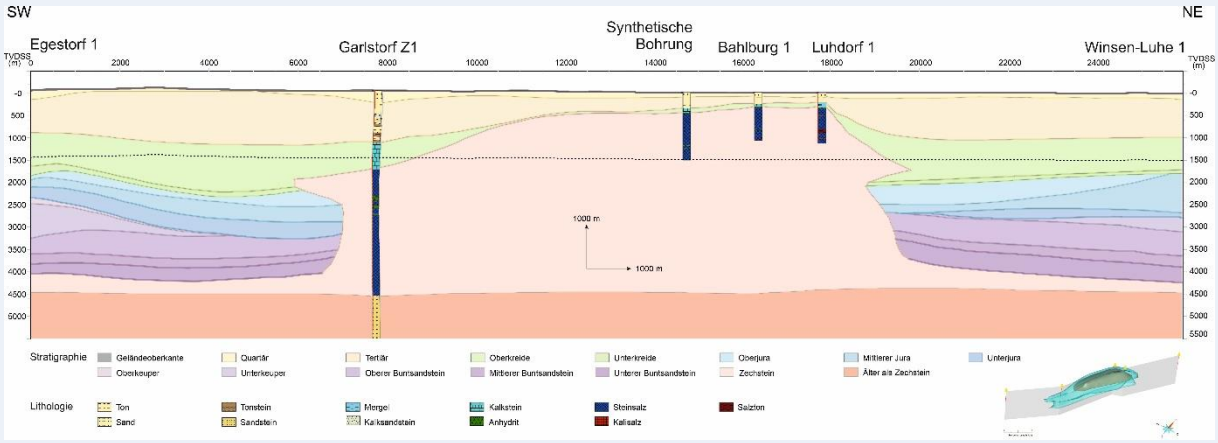


Abbildung 98: Profilschnitt (SW-NE) entlang von fünf Bohrungen aus dem geologischen 3D-Modell der Salzstruktur Bahlburg, ergänzt durch eine synthetische Bohrung im Zentralbereich der Salzstruktur

Beispiel 49: Räumliche Konfiguration der Gesteinskörper im Untergrund – Anwendungsbeispiel Teiluntersuchungsraum 04_11UR im GzME „Saxothuringikum“ (009_00TG)

Räumliche Konfiguration der Gesteinskörper im Untergrund – Beispiel Teiluntersuchungsraum 04_11UR im GzME „Saxothuringikum“ (009_00TG)

Der Teiluntersuchungsraum 04_11UR_009_00TG_194_00IG_K_g_SO GzME „Saxothuringikum“ (009_00TG) kann durch insgesamt 46 Bohrungen beschrieben werden, die direkt kristalline Wirtsgesteine erbohrt haben oder in unmittelbarer Nähe liegen. Variszischen Plutonite (Granite, Granodiorite und Monzonite) des Meißener Plutons dominieren in diesemTeiluntersuchungsraum; es treten jedoch vereinzelt tektonisch beanspruchte hochgradig regionalmetamorphe Gesteine (Amphibolitfazies) auf (Abbildung 99). Die verschiedenen kristallinen Wirtsgesteinsformationen wurden in der Geosynthese anhand von Schichtenverzeichnissen aus Bohrungen, 3D-Modellen und geowissenschaftlicher Literatur charakterisiert. Zur Illustration dieser Auswertung des Wirtsgesteinsbereichs mit Barrierefunktion werden zwei repräsentative Bohrprofile, ein lithostratigraphisches Profil und ein Profilschnitt eines 3D-Modells gezeigt. Im zentralen nördlichen Teil des Teiluntersuchungsraums 04_11UR stellt Bohrung B...99....1972 (320,4 m u. GOK MD) und im zentralen südlichen Teil die Bohrung B.1811….1986 (695,0 m u. GOK MD) ein repräsentatives Profil dar. Die Schichtenverzeichnisse der beiden Bohrungen liefern den größten Informationsgehalt, wobei Bohrung B.1811….1986 die größte Teufe im Teiluntersuchungsraum 04_11UR erreicht. Für ein lithostratigraphisches Profil der hochgradig regionalmetamorphen Gesteine im Teiluntersuchungsraum 04_11UR wurden die Beschreibungen aus Frischbutter (1979) herangezogen. Diese repräsentativen Profile liefern eine detaillierte Beschreibung von Lithologie, Strukturen, und Alterationen von kristallinen Wirtsgesteinseinheiten (Abbildung 100). Der Profilschnitt aus einem vorläufigen strukturgeologischen 3D-Modell des Meißener Plutons und der Nebengesteine verdeutlicht die räumliche Verteilung der unterschiedlichen kristallinen Wirtsgesteine im Teiluntersuchungsraum 04_11UR (Abbildung 101).

Als Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion werden im Teiluntersuchungsraum 04_11UR die kristallinen Wirtsgesteine entsprechend der Wirtsgesteinsdefinition (s. Anhang 6) angesehen. Alle kristallinen Wirtsgesteinseinheiten im Teiluntersuchungsraum 04_11UR stehen entweder direkt an der Oberfläche an oder liegen unter einer geringmächtigen känozoischen bzw. mächtigeren kretazischen Sedimentbedeckung. Lediglich im Bereich des Briesnitzer Beckens erreichen permische Konglomerate Mächtigkeiten von ca. 650 m und überdecken kristalline Wirtsgesteine. Die Mächtigkeit des Wirtsgesteinsbereiches mit Barrierefunktion im Teiluntersuchungsraum 04_11UR beträgt 850 m bis 1 500 m zwischen 0 m und 1 500 m u. GOK.

Räumliche Konfiguration der Gesteinskörper im Untergrund – Beispiel Teiluntersuchungsraum 04_11UR im GzME „Saxothuringikum“ (009_00TG)

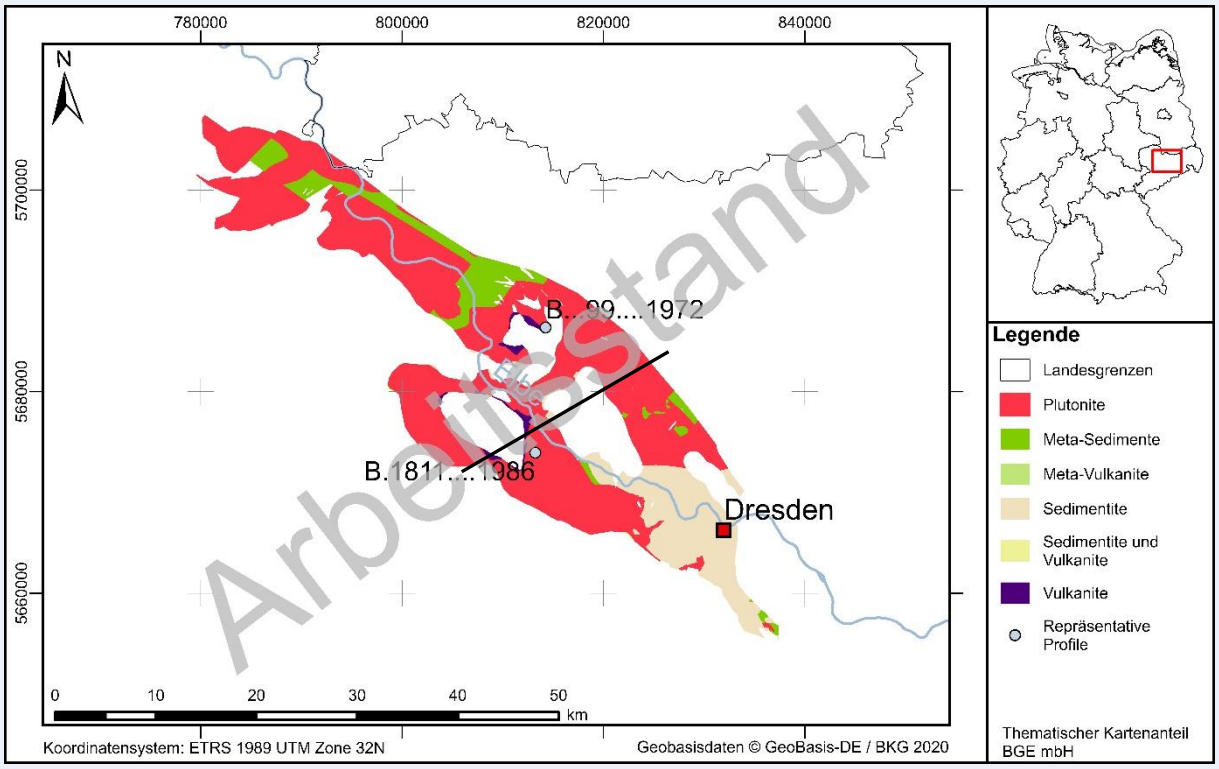


Abbildung 99: *Variszische und cadomische kristalline Wirtsgesteine und Nebengesteine sowie Lage der repräsentativen Profile im Teiluntersuchungsraum 04_11UR (nach GK100 LJK, LfULG).*
Die Lage des repräsentativen synthetischen Profils der Regionalmetamorphite (Frischbutter 1979) wird durch die Flächen der Meta-Sedimentite wiedergegeben, die schwarze Linie markiert die Lage des Profilschnitts (Abbildung 101).

Räumliche Konfiguration der Gesteinskörper im Untergrund – Beispiel Teiluntersuchungsraum 04_11UR im GzME „Saxothuringikum“ (009_00TG)

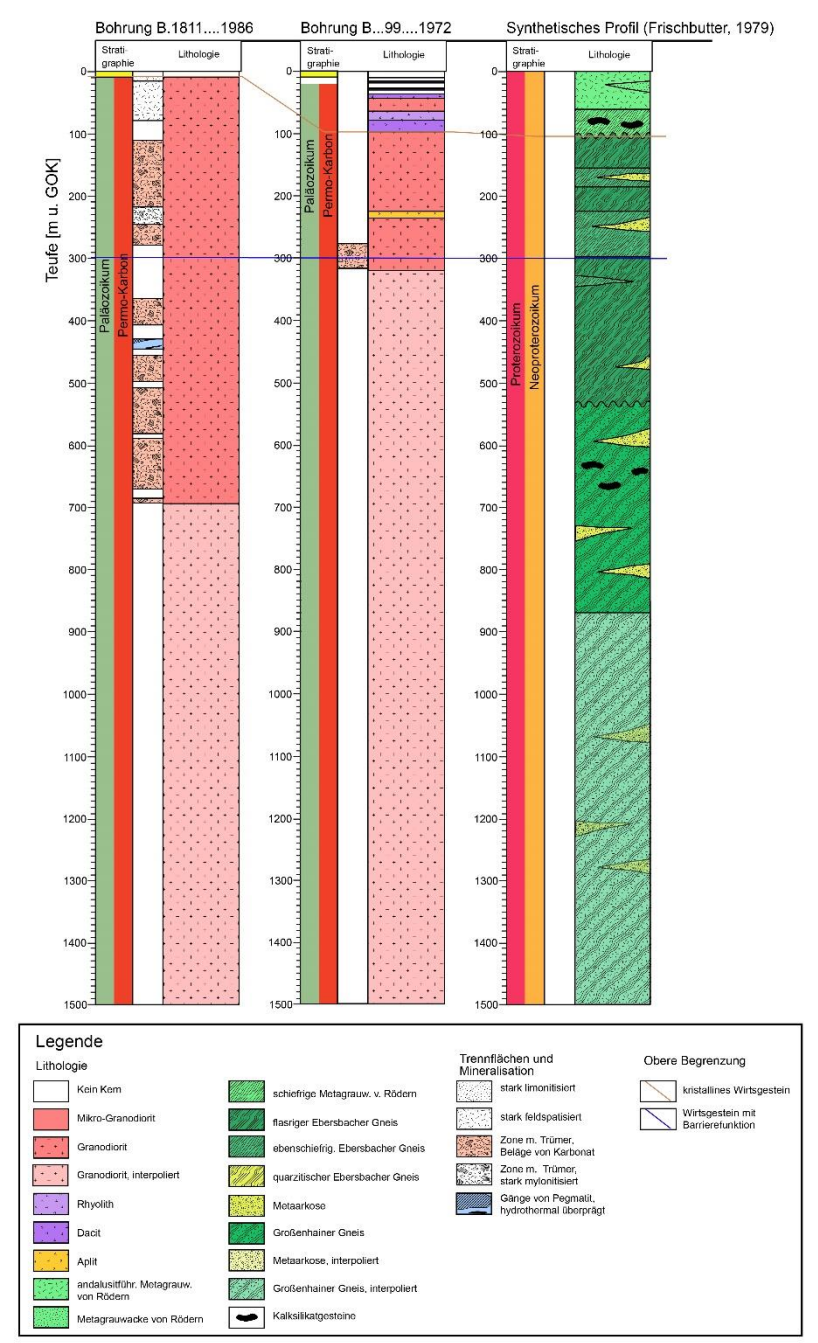


Abbildung 100: Repräsentative Profile im Teiluntersuchungsraum 04_11UR. Für das synthetische Profil im nordöstlichen Bereich des Teiluntersuchungsraums 04_11UR (Paragneise/Meta-Sedimente) wurden die Erläuterungen aus Frischbutter (1979) verwendet; die obere Begrenzung des Wirtsgesteinsbereichs mit Barrierefunktion liegt bei 300 m u. GOK.

Geschäftszeichen: SG02303/97-2/2-2022#10 – Objekt-ID: 919256 – Stand: 28.03.2022

Räumliche Konfiguration der Gesteinskörper im Untergrund – Beispiel Teiluntersuchungsraum 04_11UR im GzME „Saxothuringikum“ (009_00TG)

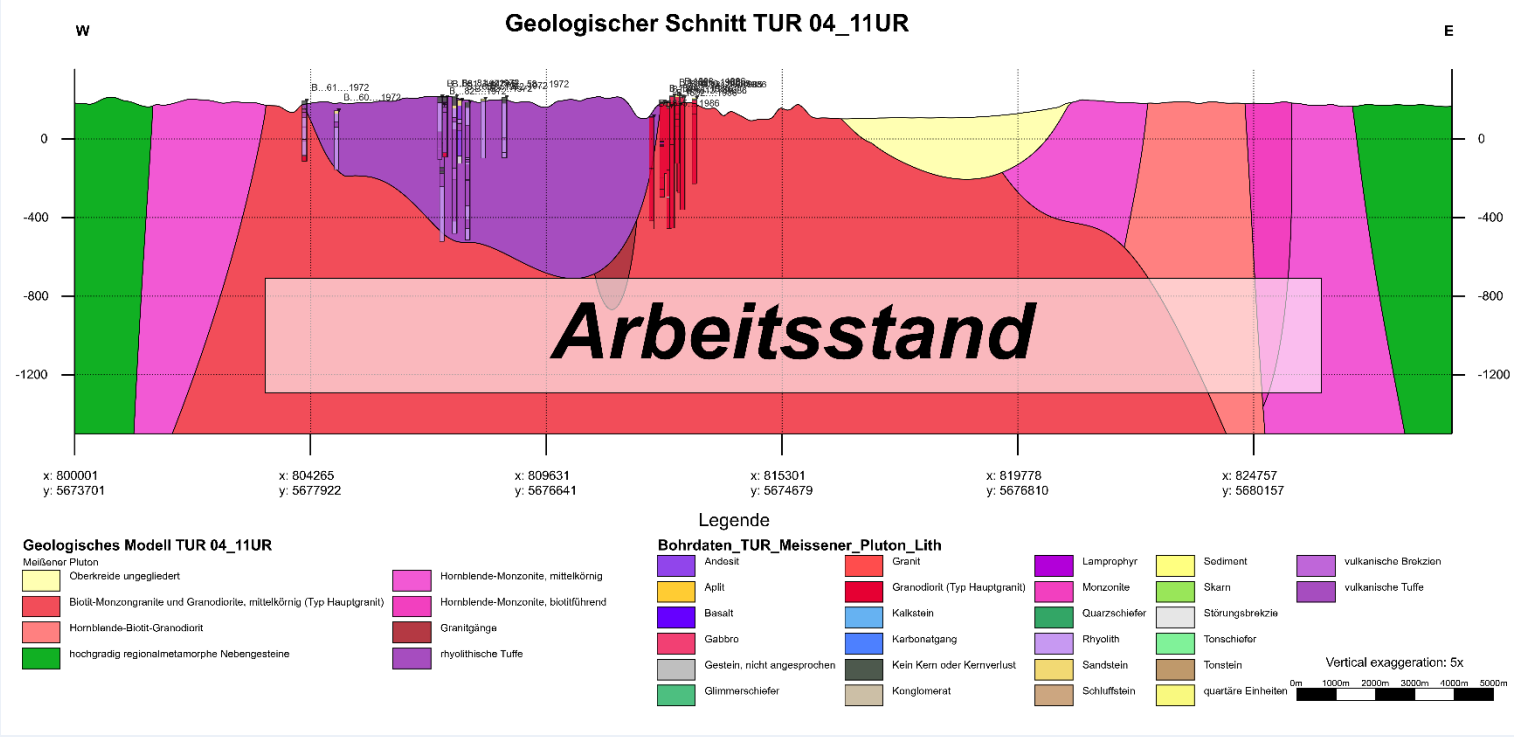


Abbildung 101: Geologischer Schnitt durch den Teiluntersuchungsraum 04_11UR („Meißener Pluton“), Lage siehe Abbildung 99.
Vorläufiges strukturgeologisches 3D-Modell beruht auf Kartendaten der GK100 LJK und Bohrungsdaten; der Teiluntersuchungsraum 04_11UR wird durch die Großenhainer Störung im NE und die Meißen-Westlausitzer Störung im SW begrenzt.

5.7.2 Kriterium zur Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper (Anlage 2 (zu § 24 Abs. 3) StandAG)

Die Bearbeitung des „Kriteriums zur Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper“ gemäß Anlage 2 (zu § 24 Abs. 3) StandAG dient der qualitativen Analyse des sicheren Einschlusses (Kapitel 6). Die Bewertung des Kriteriums geht zu großen Teilen aus den Arbeiten, die in der Teiluntersuchungsraum-spezifischen Ausarbeitung der Geosynthese stattfinden, hervor. Deshalb wird zur besseren Nachvollziehbarkeit das Vorgehen genauer erläutert, ohne formell zwischen der Geosynthese und der Bewertung, die im Rahmen der Analyse des Endlagersystems stattfindet, zu unterscheiden. Im Kapitel 5.7.2.1 folgen Anwendungsbeispiele aus den GzME.

Das „Kriterium zur Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper“ umfasst die bewertungsrelevante Eigenschaft „Barrierewirksamkeit“ mit zwei Indikatoren und die bewertungsrelevanten Eigenschaften „Robustheit und Sicherheitsreserven“ sowie „Volumen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ mit jeweils einem Indikator. Im Fall des Wirtsgesteins Tongestein wird zusätzlich noch der „Indikator „Potenzialbringer“ berücksichtigt (siehe Tabelle 35). Sofern die räumliche Ausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs undefiniert ist, bezieht sich die Anwendung der Indikatoren zunächst auf den Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion.

Tabelle 35: Auszug aus Anlage 2 (zu § 24 Abs. 3) StandAG

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße beziehungsweise Indikator des Kriteriums	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig
Barrierewirksamkeit	Barrierenmächtigkeit [m]	> 150	100 – 150	50 – 100
	Grad der Umschließung des Einlagerungsbereichs durch einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich	vollständig	unvollständig, kleinere Fehlstellen in unkritischer Position	unvollständig, größere Fehlstellen in kritischer Position
Robustheit und Sicherheitsreserven	Teufe der oberen Begrenzung des erforderlichen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs [m unter Geländeoberfläche]	> 500	300 – 500	
Volumen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs	flächenhafte Ausdehnung bei gegebener Mächtigkeit (Vielfaches des Mindestflächenbedarfs)	>> 2-fach	etwa 2-fach	<< 2-fach

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße beziehungsweise Indikator des Kriteriums	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig
Indikator „Potenzialbringer“ bei Tonstein Anschluss von wasserleitenden Schichten in unmittelbarer Nähe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs / Wirtsgesteinkörpers an ein hohes hydraulisches Potenzial verursachendes Gebiet	Vorhandensein von Gesteinsschichten mit hydraulischen Eigenschaften und hydraulischem Potenzial, die die Induzierung beziehungsweise Verstärkung der Grundwasserbewegung im einschlusswirksamen Gebirgsbereich ermöglichen können	Keine Grundwasserleiter als mögliche Potenzialbringer in unmittelbarer Nachbarschaft zum Wirtsgestein / einschlusswirksamen Gebirgsbereich vorhanden		Grundwasserleiter in Nachbarschaft zum Wirtsgestein / einschlusswirksamen Gebirgsbereich vorhanden

Die bewertungsrelevante Eigenschaft „Barrierewirksamkeit“ wird durch die Indikatoren „Barrierenmächtigkeit [m]“ und „Grad der Umschließung des Einlagerungsbereichs durch einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich“ beschrieben. Nach Alfarra et al. (2020b, S. 143) wird unter der Barrierenmächtigkeit in den Fällen, in denen der Einlagerungsbereich innerhalb des Barrieregesteins liegt (Konfigurationstyp A nach AkEnd 2002), der kleinste Abstand zwischen der mittleren Teufenlage des Einlagerungsbereiches und dem Rand des Barrieregesteins verstanden. Dabei wird diejenige Positionierung des Einlagerungsbereichs im Barrieregestein unterstellt, die diese Barrierenmächtigkeit maximiert (Alfarra et al. 2020b, S. 143). Dementsprechend beträgt die Gesamtmächtigkeit eines Barrieregesteins (in diesem Fall die Mächtigkeit des Wirtsgesteinsbereiches mit Barrierefunktion) das Doppelte von dessen so definierter Barrierenmächtigkeit. Der Indikator „Grad der Umschließung des Einlagerungsbereichs durch den einschlusswirksamen Gebirgsbereich“ wurde im Schritt 1 der Phase I in jedem Teilgebiet als günstig bewertet. Dieser Annahme liegt ein vollständig vom einschlusswirksamen Gebirgsbereich umschlossener Einlagerungsbereich zugrunde (Endlagersystem Typ 1). Alternative Konfigurationstypen (z. B. Typ Bb bzw. „überlagernder einschlusswirksamer Gebirgsbereich“ gemäß AkEnd 2002) erfüllen nicht die Anforderungen an den sicheren Einschluss gemäß § 4 Abs. 4 EndlSiAnfV (Details hierzu siehe Kapitel 4.1.3.2). Mit zunehmendem Detailgrad der Standortsuche ist gegebenenfalls die Identifizierung von „Fehlstellen“, d. h. lokale abweichende hydraulische Eigenschaften der Gesteinstypen im einschlusswirksamen Gebrigsbereich, möglich, welche in unkritischer Position zu einer bedingt günstigen und in kritischer Position zu einer weniger günstigen Bewertung führen (Mönig et al. 2020b).

Die bewertungsrelevante Eigenschaft „Robustheit und Sicherheitsreserven“ wird durch den Indikator „Teufe der oberen Begrenzung des erforderlichen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs [m unter Geländeoberfläche]“ beschrieben (Anlage 2 (zu § 24 Abs. 3) StandAG). Durch die Erfüllung der Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ von 300 m u. GOK

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

nach § 23 Abs. 5 Nr. 3 StandAG ist für jedes Gebiet die Wertungsgruppe „bedingt günstig“ erfüllt. Die Bewertung des Indikators erfolgt dementsprechend mit „günstig“ oder „bedingt günstig“.

Die bewertungsrelevante Eigenschaft „Volumen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ wird durch den Indikator „flächenhafte Ausdehnung bei gegebener Mächtigkeit (Vielfaches des Mindestflächenbedarfs)“ beschrieben. Die Bewertung der flächenhaften Ausdehnung ergibt sich aus dem Verhältnis von horizontaler Querschnittsfläche des Barrieregesteins zu der Fläche des Endlagers (Alfarra et al. 2020b, S. 144). Als Mindestflächenbedarf wird dabei in erster Näherung der zur Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ zu § 23 Abs. 5 Nr. 4 StandAG in der Begründung des Gesetzentwurfes aus dem Jahr 2017 (BT-Drs. 18/11398, Seite 71) angegebener Flächenbedarf verstanden. Im Verlaufe der rvSU erfolgen Teiluntersuchungsraum-spezifische Prognosen bzw. Berechnungen des Mindestflächenbedarfs gemäß § 6 Abs. 4 EndlSiUntV und § 7 Abs. 6 Nr. 3 Buchst. d) EndlSiUntV (siehe Kapitel 4.2.8), welche eine detailliertere Anwendung des Indikators möglich machen.

Die bewertungsrelevante Eigenschaft „Indikator „Potenzialbringer“ bei Tonstein – Anschluss von wasserleitenden Schichten in unmittelbarer Nähe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs/Wirtsgesteinskörpers an ein hohes hydraulisches Potenzial verursachendes Gebiet“ wird durch den Indikator „Vorhandensein von Gesteinsschichten mit hydraulischen Eigenschaften und hydraulischem Potenzial, die die Induzierung beziehungsweise Verstärkung der Grundwasserbewegung im einschlusswirksamen Gebirgsbereich ermöglichen können“ beschrieben. Nach Alfarra et al. (2020b, S. 144) ist dieser Indikator eine qualitative Bewertung für Tongestein, ob wasserleitende Schichten in unmittelbarer Nähe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs bzw. des Wirtsgesteinskörpers existieren, die zum einschlusswirksamen Gebirgsbereich eine hohe Potenzialdifferenz aufweisen oder aufbauen können. Für die Beschreibung der räumlichen Verteilung von Potenzialbringern im Verhältnis zum Wirtsgesteinskörper werden in Anlage 2 (zu § 24 Abs. 3) StandAG drei verschiedene Begriffe verwendet: „in unmittelbarer Nähe“, „in unmittelbarer Nachbarschaft“ und „in Nachbarschaft“. Die verwendeten Begriffe sind identisch zu verstehen. Für eine Bewertung sind überschlägige Abschätzungen (z. B. anhand generischer Modellrechnungen) erforderlich, um die Relevanz von Potenzialbringern in der vorliegenden Konfiguration für das Endlagersystem bewerten zu können. Das Vorgehen wird aktuell entwickelt weshalb eine detaillierte methodische Beschreibung zur Bewertung des Indikators „Potenzialbringer bei Tonstein“ des Kriteriums zur „Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper (Anlage 2 (zu § 24 Abs. 3) StandAG)“ zurzeit noch nicht vorliegt.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

5.7.2.1 Beispiele zur Ausarbeitung und Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper (Anlage 2 (zu § 24 Abs. 3) StandAG)

Die Konfiguration der Gesteinskörper wird über die räumlichen Charakteristika (Mächtigkeit, Umschließung, Tiefenlage und Ausdehnung) des Wirtsgesteinsbereichs mit Barrierefunktion sowie im Falle des Wirtsgesteins Tongestein über das hydraulische Potenzial der barrierewirksamen Gesteine bewertet.

Als Anwendungsbeispiele werden im Folgenden das GzME „Opalinuston“ (Beispiel 50) für das Wirtsgestein Tongestein, das GzME „Salzstock Bahlburg“ (Beispiel 51) für das Wirtsgestein „Steinsalz in steiler Lagerung“, das GzME „Thüringer Becken“ (Beispiel 52) für das Wirtsgestein „Steinsalz in stratiformer Lagerung“ sowie das GzME „Saxothuringikum“ (Beispiel 53) für das kristalline Wirtsgestein vorgestellt.

Beispiel 50: Anwendungsbeispiel im GzME „Opalinuston“ (01_00UR)

Anwendungsbeispiel Teiluntersuchungsraum 01_07UR im GzME „Opalinuston“

Die geowissenschaftlichen Arbeiten als Grundlage für die Bewertung der Anlage 2 (zu § 24 Abs. 3) StandAG werden für das GzME 01_00UR am Beispiel des Teiluntersuchungsraums 01_07UR gezeigt (vgl. Kapitel 5.6.1). Dieser Teiluntersuchungsraum hat eine flächenhafte Ausdehnung von 3 078 km² und befindet sich auf der Schwäbischen Alb und in Teilen des Molassebeckens in den Bundesländern Baden-Württemberg und Bayern. Der Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion wird durch die Opalinuston-Formation (bestehend aus Teufelsloch-Subformation und Zillhausen-Subformation) der stratigraphischen Einheit Mittlerer Jura gebildet. Die jurassischen Ablagerungen fallen flach nach Südosten ein und werden im Süden durch mächtige Abfolgen des Molassebeckens überlagert.

Die Bewertung der Einzelindikatoren des Kriteriums zur Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper (Anlage 2 (zu § 24 Abs 3) StandAG) ist in Tabelle 36 zusammengefasst. Die Ausarbeitung, die zu Bewertungen der Einzelindikatoren führt, wird im Folgenden gezeigt.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

Anwendungsbeispiel Teiluntersuchungsraum 01_07UR im GzME „Opalinuston“

Tabelle 36: Übersicht über die Bewertung der Eigenschaften bzw. Indikatoren der Anlage 2 (zu § 24 Abs. 3) StandAG für 01_07UR im GzME „Opalinuston“

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße beziehungsweise Indikator des Kriteriums	Bewertung 01_07UR
Barrierewirksamkeit	Barrierenmächtigkeit [m]	Weniger günstig
	Grad der Umschließung des Einlagerungsbereichs durch einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich	günstig
Robustheit und Sicherheitsreserven	Teufe der oberen Begrenzung des erforderlichen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs [m unter Geländeoberfläche]	Flächendifferenziert Im Norden „bedingt günstig“, im Süden „günstig“
Volumen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs	flächenhafte Ausdehnung bei gegebener Mächtigkeit (Vielfaches des Mindestflächenbedarfs)	günstig
Indikator „Potenzialbringer“ bei Tonstein Anschluss von wasserleitenden Schichten in unmittelbarer Nähe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs/ Wirtsgesteinkörpers an ein hohes hydraulisches Potenzial verursachendes Gebiet	Vorhandensein von Gesteinsschichten mit hydraulischen Eigenschaften und hydraulischem Potenzial, die die Induzierung beziehungsweise Verstärkung der Grundwasserbewegung im einschlusswirksamen Gebirgsbereich ermöglichen können	Bewertung liegt noch nicht vor

Indikator 2.1a Barrierenmächtigkeit

Die Mächtigkeiten der Abfolgen der Opalinuston-Formation im Teiluntersuchungsraum 01_07UR betragen zwischen 100 m und 159 m. Die Mächtigkeit nimmt von Nordwesten nach Südosten hin ab. Die 100 m Isolinie bildet dabei auch die östliche Begrenzung desTeiluntersuchungsraums. Am höchsten ist die Mächtigkeit mit 159 m im nordwestlichen Bereich des Teiluntersuchungsraums 01_07UR (Abbildung 102). Die 120-m- und 140-m-Isolinien ziehen

Anwendungsbeispiel Teiluntersuchungsraum 01_07UR im GzME „Opalinuston“

sich weitestgehend in einer NNE-SSW-Richtung durch den Teiluntersuchungsraum (Abbildung 102). Insgesamt hat die Opalinuston-Formation im gesamten Teiluntersuchungsraum 01_07UR eine „weniger günstige“ Barrieremächtigkeit.

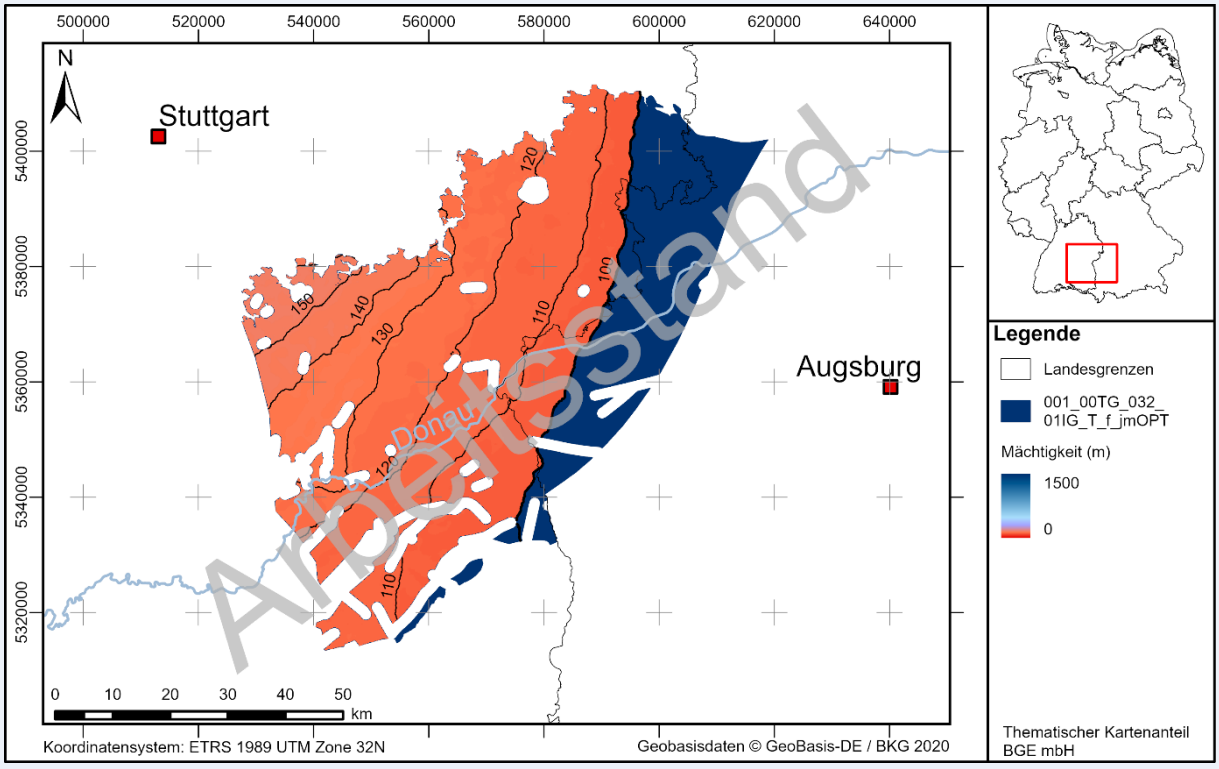


Abbildung 102: Mächtigkeit der Opalinuston-Formation im Teiluntersuchungsraum 01_07UR.
Die Mächtigkeiten variieren zwischen 100 m und 159 m.

Indikator 2.1b Grad der Umschließung

Wie in Kapitel 5.7.2 beschrieben wird ein vollständig durch einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich umschlossener Einlagerungsbereich mit „günstig“ bewertet. Derzeit sind keine diskreten Fehlstellen im Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion bekannt. Die Bewertung für den Teiluntersuchungsraum 01_07UR ist damit „günstig“.

Indikator 2.2 Tiefenlage der oberen Begrenzung

Die Abfolgen der Teufelsloch-Subformation und Zillhausen-Subformation sind im Teiluntersuchungsraum 01_07UR in Richtung Südosten geneigt, sodass die Tiefenlage von Nordwest nach Südost kontinuierlich zunimmt (Abbildung 103). Die Tiefenlage des Tops der Teufelsloch-Subformation variiert zwischen 100 m und 1 463 m u. GOK (Abbildung 103). Die Bewertung dieses Indikators für den Teiluntersuchungsraum 01_07UR erfolgt daher flächendifferen-

Anwendungsbeispiel Teiluntersuchungsraum 01_07UR im GzME „Opalinuston“

ziert. Im Norden des Teiluntersuchungsraums ist die Bewertung aufgrund der Tiefenlage zwischen 300 m und 500 m u. GOK „bedingt günstig“. Im südlichen Bereich ist die Bewertung aufgrund der Tiefenlage zwischen 500 m und 1 463 m u. GOK „günstig“.

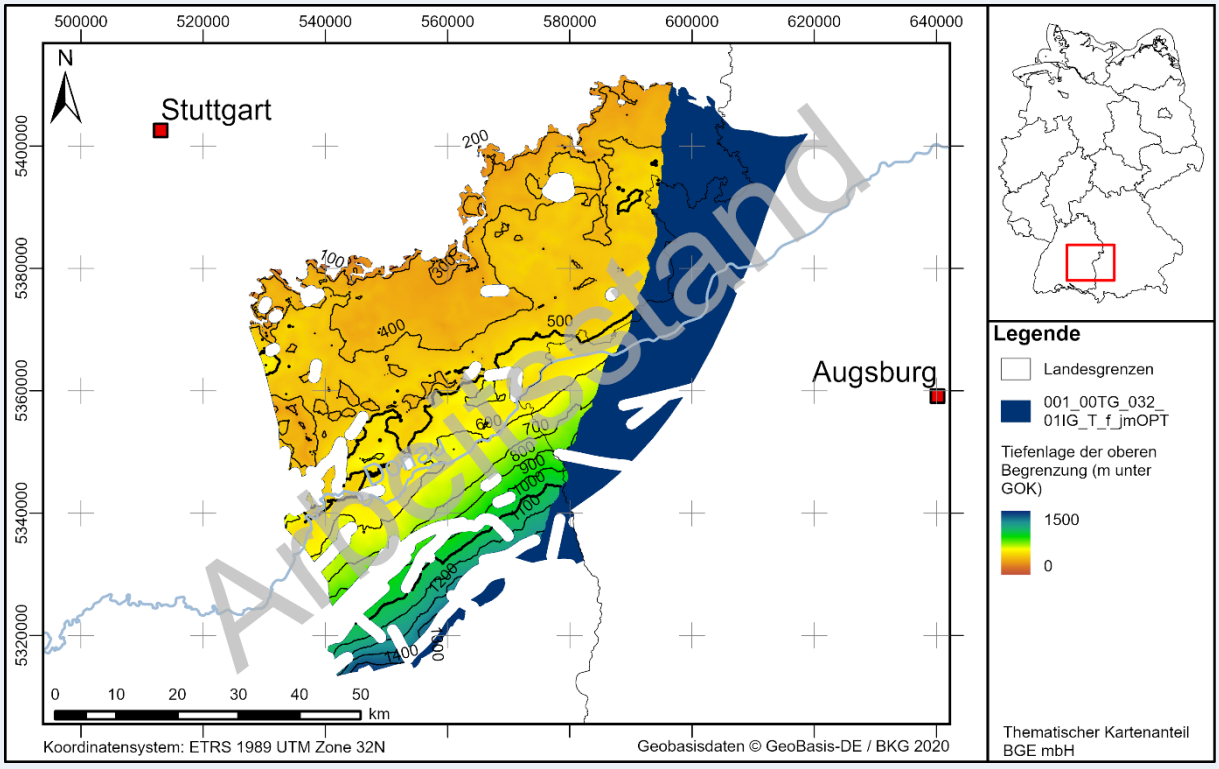


Abbildung 103: Tiefenlage der oberen Begrenzung der Opalinuston-Formation im Teiluntersuchungsraum 01_07UR.
Die Tiefenlage der oberen Begrenzung der Opalinuston-Formation variiert zwischen 100 m und 1 463 m u. GOK.

Indikator 2.3 Flächenhafte Ausdehnung

Die Bewertung der flächenhaften Ausdehnung ergibt sich aus dem Verhältnis von horizontaler Querschnittsfläche des Barrieregesteins zu der Fläche des Endlagers (Alfarra et al. 2020b, S. 144). Der „etwa 2-fache Flächenbedarf“ wird als Spannbreite des doppelten bis dreifachen Flächenbedarfes interpretiert. Als Mindestflächenbedarf wird dabei der zur Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ zu § 23 Abs. 5 Nr. 4 StandAG in der Begründung des Gesetzentwurfes aus dem Jahr 2017 (BT-Drs. 18/11398, S. 71) angegebene Flächenbedarf für Tongestein von 10 km² verstanden. Mit einer Gesamtgröße von 3 078 km² ist die Bewertung für den Teiluntersuchungsraum 01_07UR daher „günstig“.

Anwendungsbeispiel Teiluntersuchungsraum 01_07UR im GzME „Opalinuston“

Indikator 2.4 Potenzialbringer bei Tonstein

Der Teiluntersuchungsraum 01_07UR ist hauptsächlich zwei hydrogeologischen Räumen zuzuordnen: der Schwäbischen/Fränkischen Alb und dem Süddeutschen Molassebecken. Wichtigster Unterschied zwischen den beiden Räumen ist, dass die mesozoischen Gesteine im Bereich des Molassebeckens von tertiären Molassesedimenten bedeckt sind, während der Opalinuston auf der Schwäbischen Alb und der Fränkischen Alb nur noch von jüngeren jurassischen Gesteinen überlagert wird. Folgende hydrogeologische Einheiten wurden im Teiluntersuchungsraum 01_07UR ausgewiesen (Plum et al. 2008):

- Quartäre und jungtertiäre Deckschichten (Hy 1)
- Quartäre Beckensedimente, Moränensedimente und tiefgründig verwitterte Deckenschotter (Hy 2)
- Fluvioglaziale Kiese und Sande im Alpenvorland (Hy 4)
- Obere Meeresmolasse (Hy 8)
- Übrige Molasse (Hy 9)
- Oberjura, schwäbische Fazies (Hy 10)
- Oberjura, helvetische Fazies (Hy 12)
- Unter- und Mitteljura (Hy 13)
- Oberer Mittelkeuper und Oberkeuper (Hy 14)
- Unterkeuper und unterer Mittelkeuper (Gips- und Unterkeuper, Hy 15)
- Oberer Muschelkalk (Hy 16)
- Mittlerer Muschelkalk (Hy 17)
- Unterer Muschelkalk (Hy 18)
- Oberer Buntsandstein (Hy 19)
- Mittlerer und Unterer Buntsandstein (Hy 20)
- Paläozoikum und Kristallin (Hy 21)

In der Abfolge der Einheit Mitteljura nimmt die Opalinuston-Formation eine besondere Stellung als Grundwassergeringleiter ein und bildet außerdem die Sohlschicht für die überlagernden Grundwasservorkommen des Mitteljura (vgl. Abbildung 104). Ihre hydrogeologischen Eigenschaften sind bereits vor längerem umfassend untersucht worden (vgl. Wallrauch 1969; Hekel 1994). Jedoch werden regional die Wasserfallschichten im oberen Teil der Opalinuston-Formation als Grundwasserleiter verzeichnet (UM BW 2018, Anlage 2.4). Eine lokale Bewertung

Anwendungsbeispiel Teiluntersuchungsraum 01_07UR im GzME „Opalinuston“

über ihre Funktion als Potenzialbringer in unmittelbarer Nähe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs kann derzeit nicht vorgenommen werden.

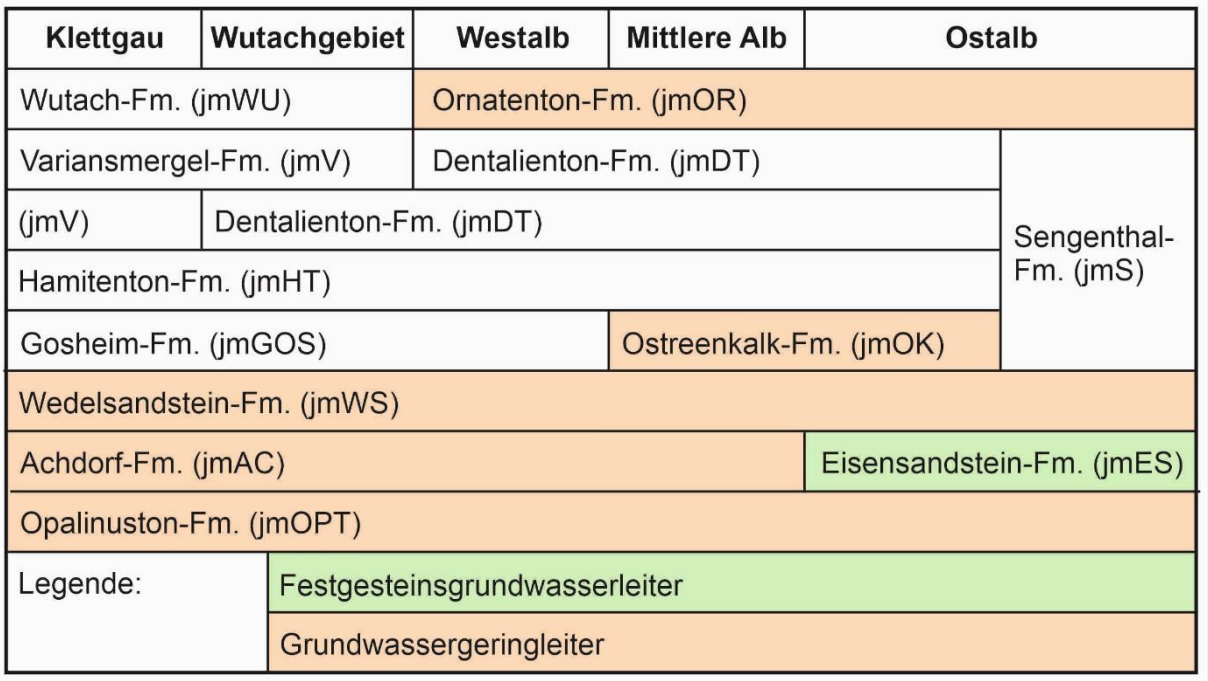


Abbildung 104: Hydrogeologische Gliederung des Mitteljura in Baden-Württemberg (LGRBwissen 2022b)

Die Eisensandstein-Formation ist im Vorland der Ostalb ein mäßig ergiebiger Kluft- und Porengrundwasserleiter (Plum et al. 2008), welche die Opalinuston-Formation direkt überlagert (Abbildung 91, Abbildung 104, Abbildung 105). Für die Eisensandstein-Formation liegt die Transmissivität bei $2 \cdot 10^{-4}$ m²/s bis $2 \cdot 10^{-3}$ m²/s und maximal bei $6 \cdot 10^{-3}$ m²/s (Plum et al. 2008). Im Raum Bad Überkingen beträgt die Transmissivität des Unteren Donzdorf-Sandsteins der Eisensandstein-Formation $2{,}4 \cdot 10^{-5}$ m²/s (Carlé et al. 1982). Die mithilfe von Bohrungsdaten interpolierte Mächtigkeitskarte der Eisensandstein-Formation zeigt, dass diese im gesamten Teiluntersuchungsraum 01_07UR verbreitet ist und Mächtigkeiten von etwa 10 m bis 50 m aufweist (Abbildung 106).

Bei Weilheim/Teck und Wiesensteig verzahnt sich die Eisensandstein-Formation mit der westlich anschließenden Achdorf-Formation (Franz & Nitsch 2009) (Abbildung 105). Die Achdorf-Formation ist ein Grundwassergeringleiter und besteht hauptsächlich aus Tonmergelsteinen mit Kalksteinbänken und wenigen geringmächtigen Sandsteinlagen (LRGBwissen 2021).

Anwendungsbeispiel Teiluntersuchungsraum 01_07UR im GzME „Opalinuston“

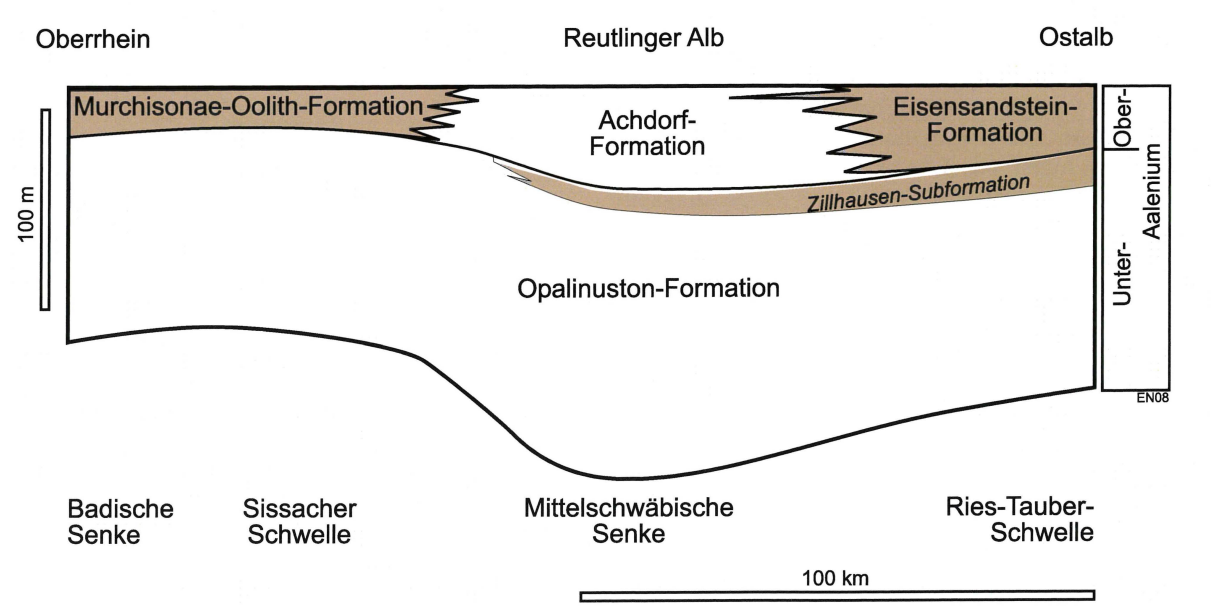


Abbildung 105: Übersicht zu den lithostratigraphischen Einheiten des Aalenium (Mittlerer Jura) in Südwestdeutschland (aus Franz & Nitsch 2009)

Die Eisensandstein-Formation kann informell in mehrere Abschnitte gegliedert werden (Franz & Nitsch 2009): Die Basis bildet der bis 8 m mächtige Untere Donzdorf-Sandstein, über dem der Untere Flözhorizont aus sandigen Eisenoolithen entwickelt ist. Darüber folgen die Personatensandsteine als lateral uneinheitliche Wechselfolge aus Tonmergelsteinen mit Sandsteinen, in die lokal weitere sandige Eisenoolithe eingeschaltet sind. Der obere Teil der Formation besteht aus dem Oberen Flözhorizont und dem Oberen Donzdorf-Sandstein. Der Obere Flözhorizont enthält die wichtigsten Erzkörper mit Mächtigkeiten von bis zu 2,2 m und einem Durchmesser von mehreren Kilometern, welche als linsenartige Körper in Tonsteine eingelagert sind (Wild 1951; Frank et al. 1975). Der Obere Donzdorf-Sandstein kann lateral wechselnd als massiver, mehrere Meter mächtiger Sandstein oder als schwach sandige Tonsteinabfolge ausgebildet sein.

Die Hangend- und Liegendgrenzen der Eisensandstein-Formation sind die Basis des Sowerbyi-Ooliths der Wedelsandstein-Formation sowie die Basis des Unteren Donzdorf-Sandsteins (Franz & Nitsch 2009).

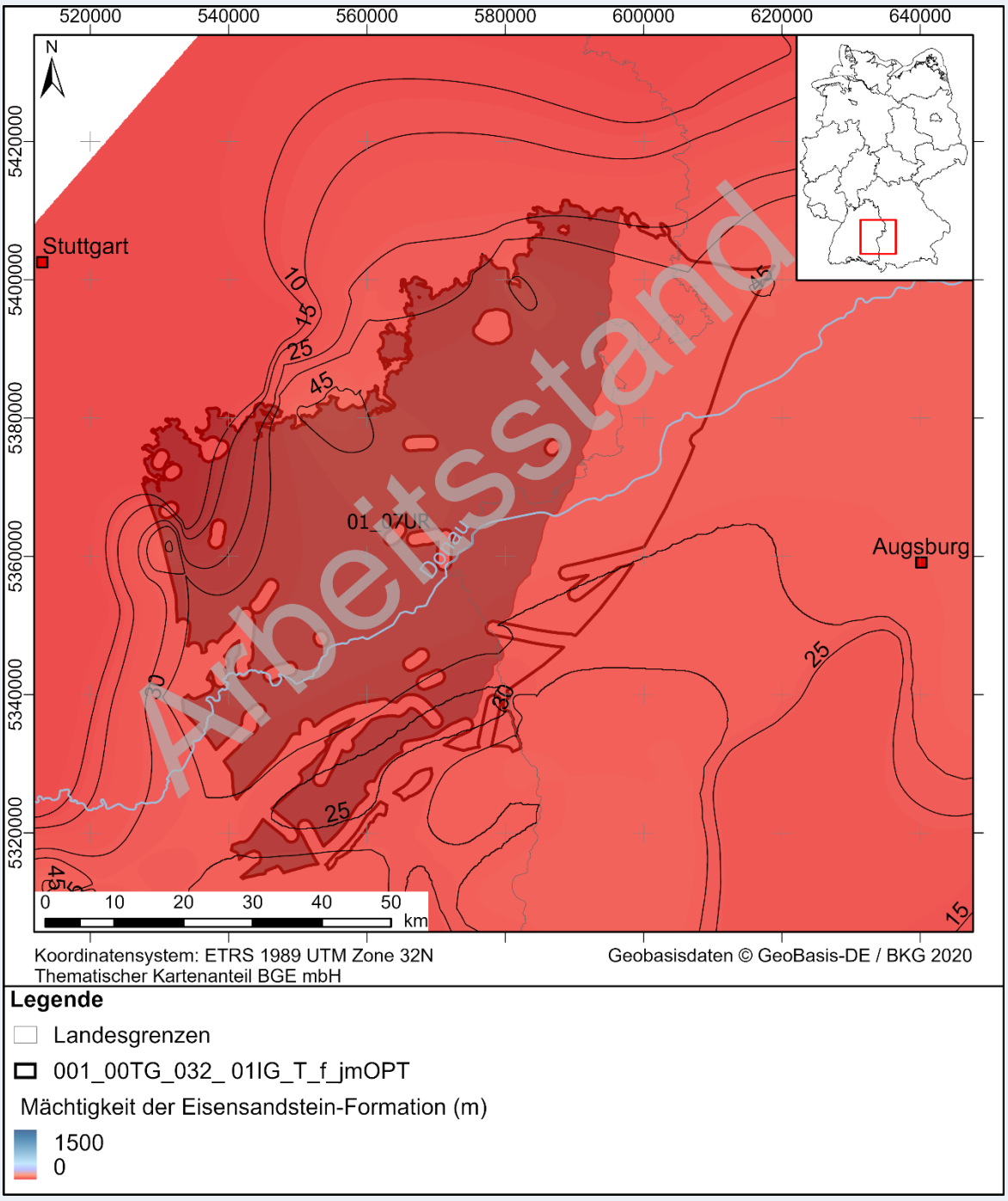
Der Großteil des Teiluntersuchungsraums 01_07UR wird von der Eisensandstein-Formation., einem mäßig ergiebigen Kluft- und Porengrundwasserleiter, überlagert. Lediglich im WNW im Raum Urach befindet sich die Opalinuston-Formation lokal in direktem Kontakt mit den tonigen Abfolgen der Achdorf-Formation Dort sind die Mächtigkeiten der Eisensandstein-Formation gering (kleiner als 10 m, Abbildung 106).

Anwendungsbeispiel Teiluntersuchungsraum 01_07UR im GzME „Opalinuston“

Für das Gebiet im Südwestdeutschen Alpenvorland und der Schwäbischen Alb, in dem sich der Teiluntersuchungsraum 01_07UR befindet, ist ein teilweise hohes hydraulisches Potenzial für die Karbonataquifere Oberjura und Muschelkalk (Stober 2013) beschrieben und kann für die sandigen Abfolgen der Eisensandstein-Formation ebenfalls angenommen werden.

Für eine Bewertung sind überschlägige Abschätzungen (z. B. anhand generischer Modellrechnungen) erforderlich, um die Relevanz von Potenzialbringern in der vorliegenden Konfiguration für das Endlagersystem bewerten zu können. Daher liegt eine Bewertung des Indikators „Potenzialbringer bei Tonstein“ des Kriteriums zur „Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper (Anlage 2 (zu § 24 Abs. 3) StandAG)“ zurzeit noch nicht vor.

Anwendungsbeispiel Teiluntersuchungsraum 01_07UR im GzME „Opalinuston“



Arbeitsstand

Abbildung 106: Mächtigkeit der Eisensandstein-Formation mit Lage des GzME „Opalinuston“ und Teiluntersuchungsraum 01_07UR.
Die Mächtigkeit wurde mit Hilfe von Bohrungsdaten und Isopachen aus dem Speicherkataster (Fehn et al. 2010) und dem Geothermieatlas (Suchi et al. 2014) interpoliert (Natürlicher Nachbar).

Beispiel 51: Anwendungsbeispiel GzME „Bahlburg“ (02_00UR)

Anwendungsbeispiel im GzME „Salzstock Bahlburg“ (02_00UR)

Für das GzME „Salzstock Bahlburg“ werden die ausgewiesenen Flächen des Teilgebiets 035_00TG verwendet. Im Folgenden wird die Situation im GzME „Salzstock Bahlburg“ bezüglich der jeweiligen Indikatoren dargestellt. Es gilt zu beachten, dass die Bewertung überprüft werden muss, sobald nähere Erkenntnisse zum Internbau der Salzstruktur ermittelt werden konnten. Für das aktuelle Beispiel gilt für die Bewertung vereinfacht die Annahme, dass die Salzstruktur vollständig aus dem Wirtsgestein Steinsalz aufgebaut ist.

Die Bewertung der Einzelindikatoren des Kriteriums zur Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper (Anlage 2 (zu § 24 Abs. 3) StandAG) ist in Tabelle 37 zusammengefasst. Die Ausarbeitung der Einzelindikatorenbewertung wird im Folgenden gezeigt.

Tabelle 37: Übersicht über die Bewertung der einzelnen Indikatoren der Anlage 2 (zu § 24 Abs. 3) StandAG des GzME „Salzstock Bahlburg“

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße beziehungsweise Indikator des Kriteriums	Bewertung 02_00UR
Barrierewirksamkeit	Barrierenmächtigkeit [m]	Flächendifferenziert: günstig, bedingt günstig oder weniger günstig
	Grad der Umschließung des Einlagerungsbereichs durch einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich	günstig
Robustheit und Sicherheitsreserven	Teufe der oberen Begrenzung des erforderlichen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs [m unter Geländeoberfläche]	günstig
Volumen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs	flächenhafte Ausdehnung bei gegebener Mächtigkeit (Vielfaches des Mindestflächenbedarfs)	günstig

Indikator 2.1a Barrierenmächtigkeit

Das GzME „Salzstock Bahlburg“ hat eine maximale Mächtigkeit von 860 m im Zentralbereich der Salzstruktur. Zu den Rändern der Salzstruktur sinkt die Barrieremächtigkeit bis auf 100 m radial ab. Die Verteilung wird in Abbildung 107 dargestellt. Für alle Mächtigkeitsangaben gilt, dass hier bereits die geforderten 300 m Salzschwebe eingehalten sind. Der Bereich mit mehr als 300 m Mächtigkeit (entspricht der Wertungsgruppe „günstig“; mit einer Barrieremächtigkeit

Anwendungsbeispiel im GzME „Salzstock Bahlburg“ (02_00UR)

von 150 m nach oben wie nach unten) ist mit 13 km² deutlich größer als der geforderte Mindestflächenbedarf von 3 km² und damit liegt eine günstige Bewertung vor.

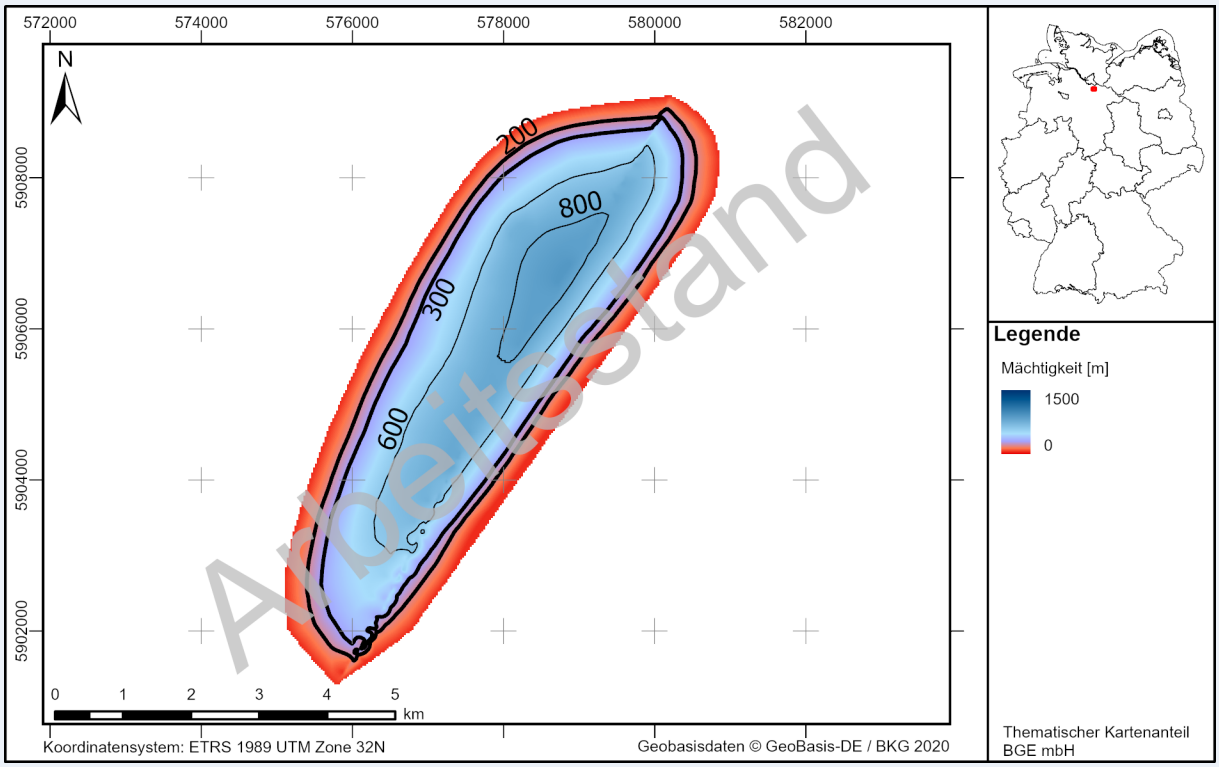


Abbildung 107: Darstellung der Mächtigkeit des GzME „Salzstock Bahlburg“. Die in § 23 StandAG geforderte Salzschwebe von 300 m ist berücksichtigt. Dicke Isolinien zeigen Schwellenwerte der Wertungsgruppen des Indikators 1.

Indikator 2.1b Grad der Umschließung

Wie in Kapitel 5.7.2 beschrieben wird ein vollständig durch einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich umschlossener Einlagerungsbereich mit „günstig“ bewertet. Derzeit sind keine diskreten Fehlstellen im Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion bekannt. Die Bewertung für das GzME „Salzstock Bahlburg“ ist damit „günstig“.

Indikator 2.2 Teufe der oberen Begrenzung

Für das Wirtsgestein Steinsalz „in steiler Lagerung“ wird als obere Begrenzung die Trennfläche zwischen der gesetzlich festgelegten 300 m Salzschwebe und dem Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion, der den einschlusswirksamen Gebirgsbereich aufnehmen kann, verstanden. Die Tiefenlage der oberen Begrenzung liegt zwischen 640 m und 1500 m u. GOK, siehe Abbildung 108. Alle Bereiche liegen tiefer als 500 m u. GOK und damit in der Wertungsgruppe „günstig“.

Anwendungsbeispiel im GzME „Salzstock Bahlburg“ (02_00UR)

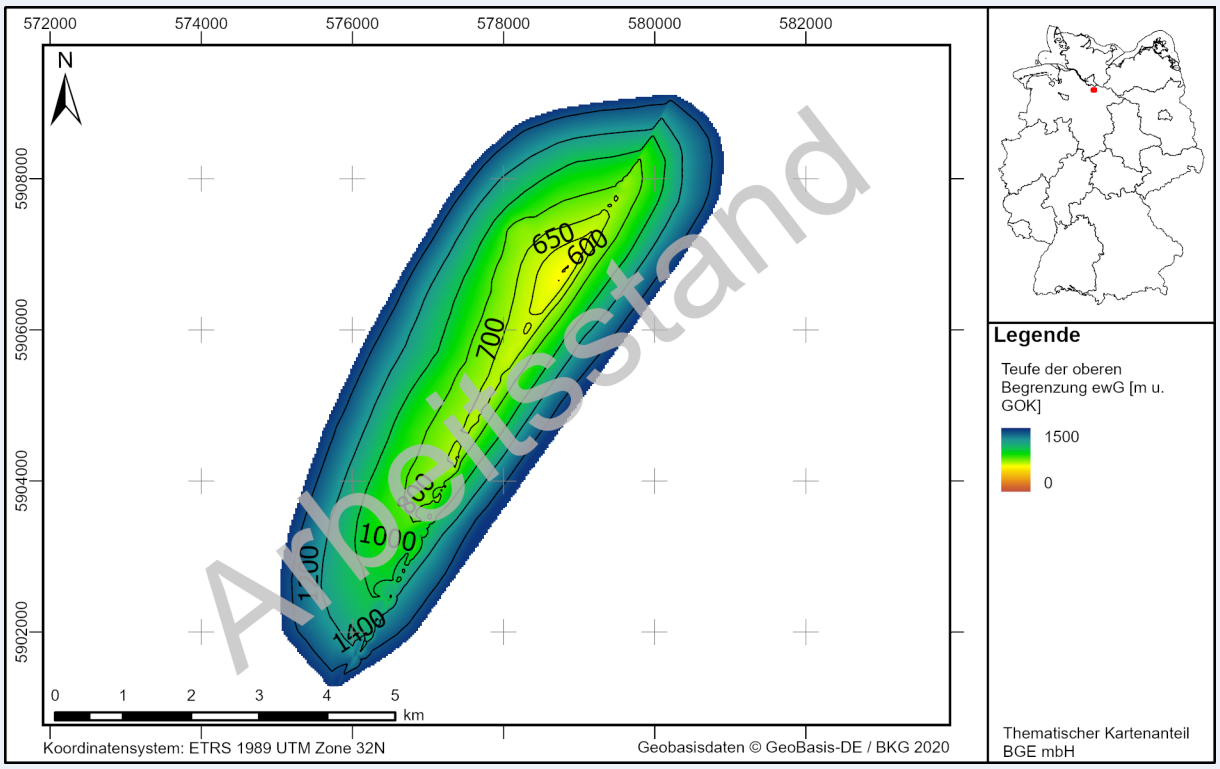


Abbildung 108: Teufenlage der oberen Begrenzung des Wirtsgesteinsbereiches mit Barrierefunktion des GzME „Salzstock Bahlburg“. Alle Werte liegen innerhalb der günstigen Wertungsgruppe.

Indikator 2.3 Flächenhafte Ausdehnung

Das GzME „Salzstock Bahlburg“ hat eine flächenhafte Ausdehnung von 19 km² und ist damit deutlich größer als der angelegte Mindestflächenbedarf von 3 km². Die Größe des GzME ist den vorausgegangenen Abbildung 107 und Abbildung 108 zu entnehmen. Abbildung 109 zeigt die Fläche des Wirtsgesteinsbereiches mit Barrierefunktion in verschiedenen Teufen. Der Indikator wird mit „günstig“ bewertet.

Sobald detaillierte Kenntnisse zum Internbau der Salzstruktur und damit zu den Mengenanteilen von Steinsalz, Kalisalzen, Anhydriten etc. vorliegen, wird die Bewertung des Indikators überprüft und gegebenenfalls angepasst.

Anwendungsbeispiel im GzME „Salzstock Bahlburg“ (02_00UR)

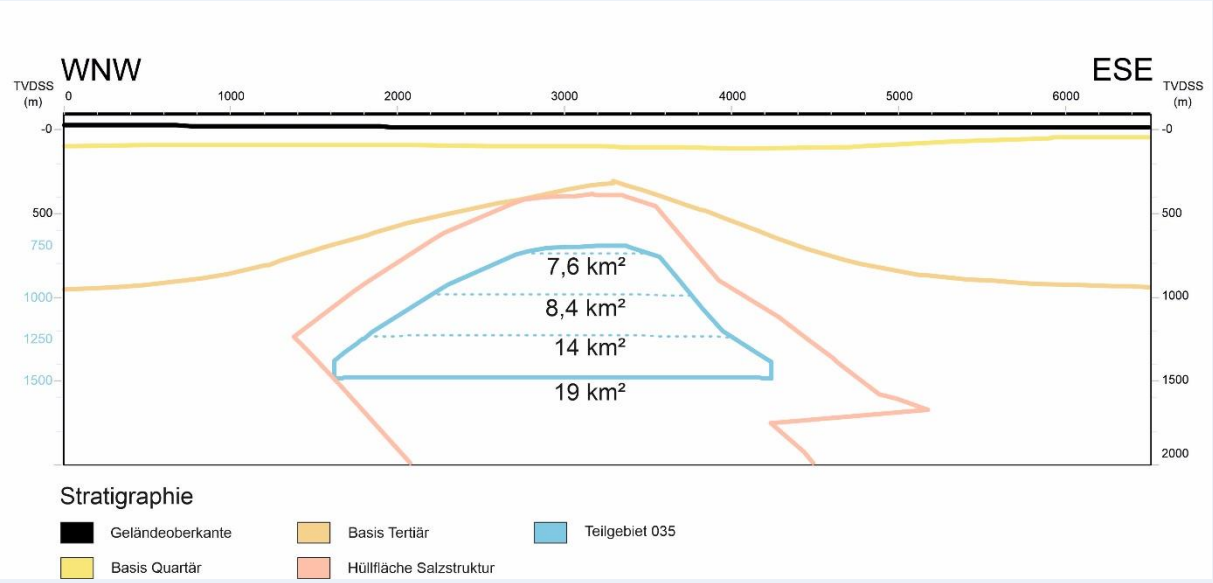


Abbildung 109: Schematische Darstellung der teufenabhängigen Flächenausdehnung des Teilgebietes in der Salzstruktur Bahlburg. Die Modellflächen enstammen dem TUNB-Modell (BGR et al. 2021), Basis Quartär sowie Salzstruktur aus GTA3D (Bombien et al. 2012).

Im Zuge der Datenauswertung konnten Abweichungen zwischen Informationen aus den zur Verfügung stehenden geologischen 3D-Modellen und den Bohrungsdaten festgestellt werden. Dieser Umstand führt nicht automatisch zu einer z. T. aufwändigen Anpassung des 3D-Modells. Es wird geprüft, ob die Abweichungen so signifikant sind, dass sie zu einer Änderung der Wertungsgruppen führen würden. In jedem Fall werden die Abweichungen sytematisch aufgeführt (vgl. Tabelle 38) und die Lokationen dargestellt (Abbildung 110). Jedoch wurden die hier aufgeführten Änderungen in den in Abbildung 98 gezeigten Profilschnitt eingearbeitet.

Anwendungsbeispiel im GzME „Salzstock Bahlburg“ (02_00UR)

Tabelle 38: Übersicht zu festgestellten Abweichungen der salzstrukturumhüllenden Fläche zwischen Bohrungsinformationen und den vorhandenen 3D-Modellen, durch Ungewissheiten in der Hutgesteinsmächtigkeit oder Ungenauigkeiten in den verwendeten Modelle.
Keine Abweichung führt zur Änderung der Wertungsgruppe. Positive Abweichungen zwischen Bohrung und Modell bedeuten, dass die Bohrung die Fläche tiefer erfasst als im Modell dargestellt.

Kürzel	Bohrungsname	Hutgesteins-mächtigkeit [m]	Abweichung zwischen Bohrung und Modell [m]	
			TUNB	GTA3D
A	Luhdorf 1	33	-164	-173
B	Bahlburg 1	16,5	-237	-200
C	Roydorf 2	25	-9	-122
D	Bahlburg BAH 1	/	54	111
E	Garlstorf Z1	0	16	37

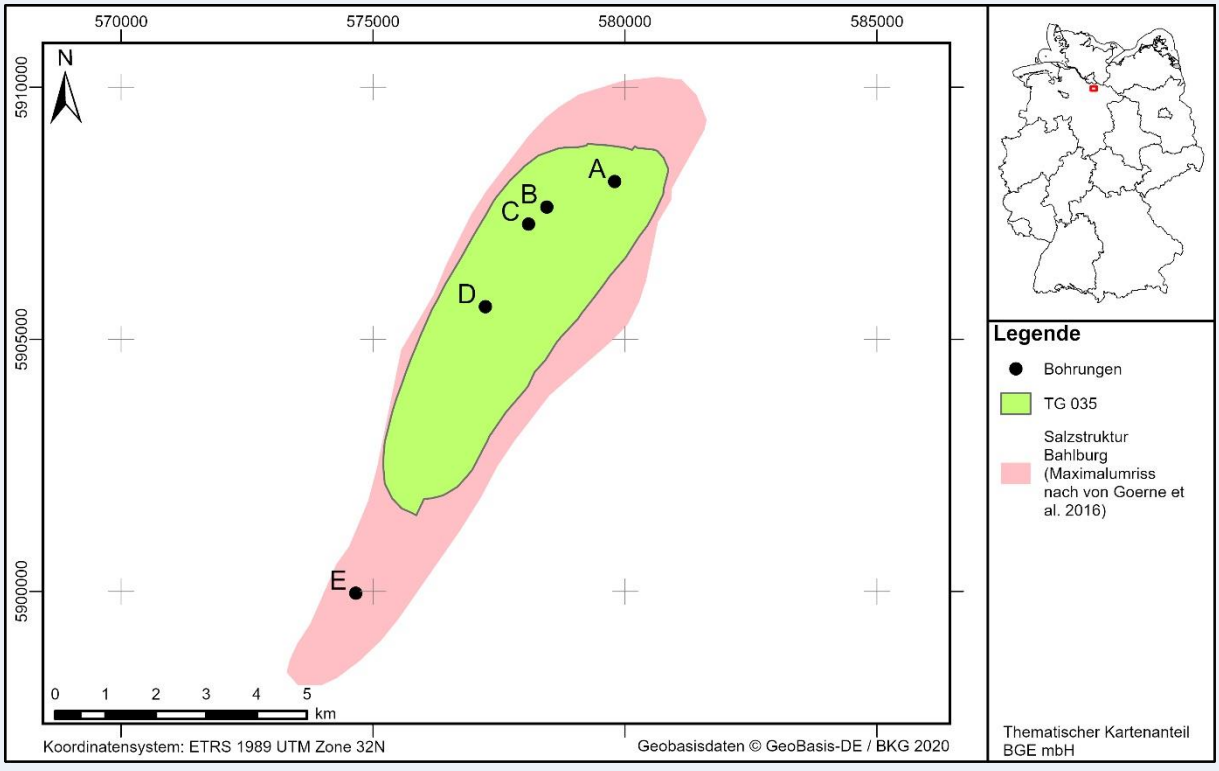


Abbildung 110: Bohrlokationen des GzME „ Salzstock Bahlburg“, an denen Abweichungen zwischen Bohrungsdaten und Modelldaten festgestellt wurden

Beispiel 52: Anwendungsbeispiel GzME „Thüringer Becken“ (03_00UR)

Anwendungsbeispiel Teiluntersuchungsraum 03_21UR im GzME „Thüringer Becken“ (03_00UR)

Die geowissenschaftlichen Arbeiten, als Grundlage für die Bewertung der Anlage 2 (zu § 24 Abs. 3) StandAG, werden für das GzME „Thüringer Becken“ am Beispiel des Teiluntersuchungsraums 03_21UR gezeigt (vgl. Kapitel 5.6.1). Dieser Teiluntersuchungsraum hat eine flächenhafte Ausdehnung von 705 km² und befindet sich im nordöstlichen bis zentralen Teil des Thüringer Beckens im Bereich der Thüringischen Senke in den Bundesländern Thüringen und Sachsen-Anhalt. Das Staßfurt-Steinsalz aus der stratigraphischen Einheit Zechstein stellt im Teiluntersuchungsraum 03_21UR den Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion dar, der den einschlusswirksamen Gebirgsbereich aufnehmen kann. Die Bewertung der Einzelindikatoren des Kriteriums zur Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper (Anlage 2 (zu § 24 Abs. 3) StandAG) ist in Tabelle 39 zusammengefasst. Die Ausarbeitung, die zu Bewertungen der Einzelindikatoren führt, wird im Folgenden gezeigt.

Anwendungsbeispiel Teiluntersuchungsraum 03_21UR im GzME „Thüringer Becken“ (03_00UR)

Tabelle 39: Übersicht über die Bewertung der einzelnen Indikatoren der Anlage 2 (zu § 24 Abs. 3) StandAG des Teiluntersuchungsraums 03_21UR im GzME „Thüringer Becken“

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße beziehungsweise Indikator des Kriteriums	Bewertung 03_21UR
Barrierewirksamkeit	Barrierenmächtigkeit [m]	Flächendifferenziert: günstig, bedingt günstig oder weniger günstig
	Grad der Umschließung des Einlagerungsbereichs durch einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich	günstig
Robustheit und Sicherheitsreserven	Teufe der oberen Begrenzung des erforderlichen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs [m unter Geländeoberfläche]	günstig
Volumen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs	flächenhafte Ausdehnung bei gegebener Mächtigkeit (Vielfaches des Mindestflächenbedarfs)	günstig
Indikator „Potenzialbringer“ bei Tonstein Anschluss von wasserleitenden Schichten in unmittelbarer Nähe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs / Wirtsgesteinkörpers an ein hohes hydraulisches Potenzial verursachendes Gebiet	Vorhandensein von Gesteinsschichten mit hydraulischen Eigenschaften und hydraulischem Potenzial, die die Induzierung beziehungsweise Verstärkung der Grundwasserbewegung im einschlusswirksamen Gebirgsbereich ermöglichen können	Keine Anwendung

Indikator 2.1a Barrierenmächtigkeit

Die Mächtigkeit des Staßfurt-Steinsalzes im Teiluntersuchungsraum 03_21UR reicht von 100 m bis deutlich über 300 m und nimmt von Nordosten nach Südwesten hin ab. Die 100-m-Isolinie bildet dabei die nordwestliche und südliche Begrenzung des Teiluntersuchungsraums. Am höchsten ist die Mächtigkeit mit über 500 m im nordöstlichen bis zentralen Bereich des Teiluntersuchungsraums 03_21UR (Abbildung 111). Der Bereich zwischen der 100-m- und 200-m-Isolinie weist eine „weniger günstige“ und der Bereich zwischen der 200-m- und 300-m-Isolinie eine „bedingt günstige“ Barrierenmächtigkeit auf. Ab der 300-m-Isolinie liegt eine

Anwendungsbeispiel Teiluntersuchungsraum 03_21UR im GzME „Thüringer Becken“ (03_00UR)

„günstige“ Barrierenmächtigkeit vor. Beim Teiluntersuchungsraum 03_21UR findet somit eine flächendifferenzierte Bewertung des Indikators statt.

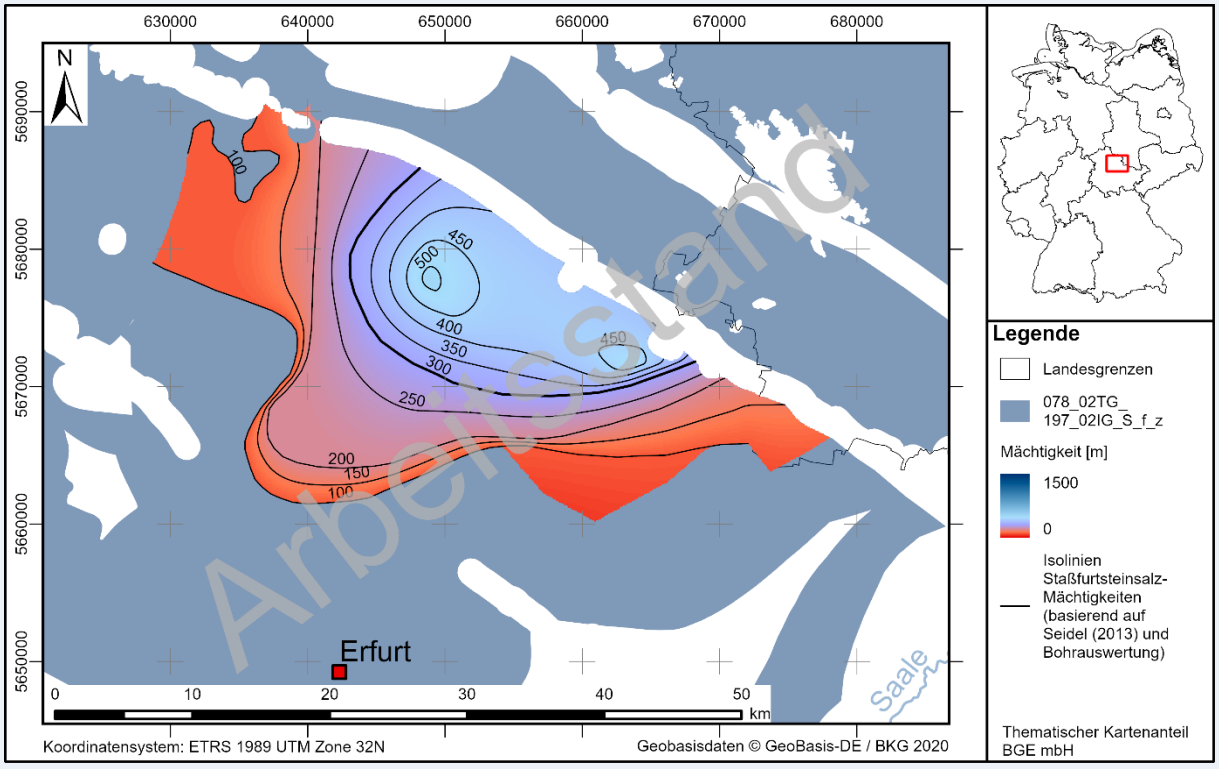


Abbildung 111: Mächtigkeit des Staßfurt-Steinsalzes im Teiluntersuchungsraum 03_21UR. Die Isolinien basieren auf der Mächtigkeitskarte des Staßfurt-Steinsalzes von Seidel (2013) und der Auswertung von einigen Bohrungen.

Indikator 2.1b Grad der Umschließung

Wie in Kapitel 5.7.2 beschrieben wird ein vollständig durch einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich umschlossener Einlagerungsbereich mit „günstig“ bewertet. Derzeit sind keine diskreten Fehlstellen im Wirtsgesteinsbereich mit Bearrierefunktion bekannt. Die Bewertung für den Teiluntersuchungsraum 03_21UR ist damit „günstig“.

Indikator 2.2 Tiefenlage der oberen Begrenzung

Die Tiefen des Tops des Staßfurt-Steinsalzes variieren, bezogen auf die Größe des Teiluntersuchungsraums, nur in geringem Maße. Diese liegen zumeist im Bereich zwischen 1 000 m und 1 250 m. Die geringsten Tiefen befinden sich im Nordwesten des Teiluntersuchungsraums, wo die Bohrung Kal Hachelbich 3/1989 die Tiefe des Tops des Staßfurt-Steinsalzes mit rund 870 m angibt. Im zentralen Bereich des Teiluntersuchungsraums weist die Bohrung E Weißensee 1/1969 eine Tiefenlage des Steinsalzes von 1 205 m auf, während im südöstlichen

Anwendungsbeispiel Teiluntersuchungsraum 03_21UR im GzME „Thüringer Becken“ (03_00UR)

Bereich die Bohrung Kal Sprötau 6/1974 rund 1 230 m zeigt (Abbildung 112). Der gesamte Teiluntersuchungsraum 03_21UR weist eine „günstige“ Tiefenlage auf.

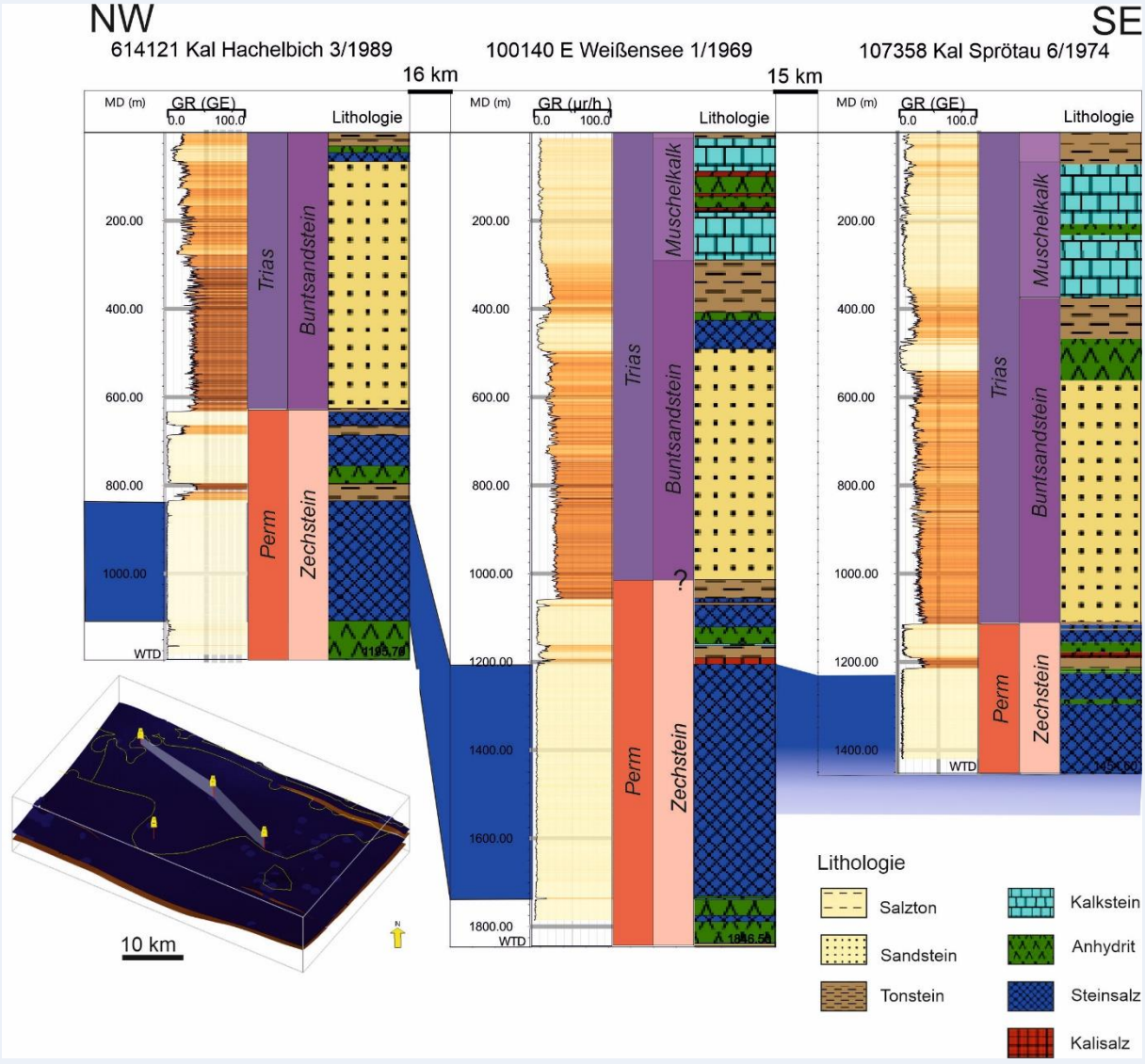


Abbildung 112: Darstellung der Tiefenlage des Staßfurt-Steinsalzes im Teiluntersuchungsraum 03_21UR in Form repräsentativer Profile auf einem NW-SE-Schnitt. Der blau markierte Bereich stellt das Wirtsgestein mit Barrierefunktion dar (Staßfurt-Steinsalz).

Indikator 2.3 Flächenhafte Ausdehnung

Der Teiluntersuchungsraum 03_21UR hat eine flächenhafte Ausdehnung von 705 km² mit einer Mindestmächtigkeit von 100 m Steinsalz aus der Staßfurt-Formation und ist somit deutlich

Anwendungsbeispiel Teiluntersuchungsraum 03_21UR im GzME „Thüringer Becken“ (03_00UR)

größer als der Mindestflächenbedarf von 3 km² im Steinsalz in flacher Lagerung. Damit weist der Teiluntersuchungsraum 03_21UR eine „günstige“ flächenhafte Ausdehnung auf.

Indikator 2.4 Potenzialbringer bei Tonstein

Dieser Indikator wird beim Wirtsgestein Steinsalz in stratiformer Lagerung nicht angewendet.

Beispiel 53: Anwendungsbeispiel Teiluntersuchungsraum 04_11UR im GzME „Saxothuringikum“ (009_00TG)

Anwendungsbeispiel Teiluntersuchungsraum 04_11UR im GzME „Saxothuringikum“ (009_00TG)

Der Teiluntersuchungsraum 04_11UR umfasst eine Fläche von 806 km² und liegt im östlichen Bereich des Gebiets zur Methodenentwicklung. Als kristalline Wirtsgesteine treten Plutonite und hochgradig regionalmetamorphe Gesteine auf. Diese kristallinen Wirtsgesteine erreichen Mächtigkeiten von mehreren Kilometern oder werden ihrerseits von kristallinen Wirtsgesteinen großer Mächtigkeit unterlagert (Behr et al. 1994). Diese kristallinen Wirtsgesteine stehen im Teiluntersuchungsraum meist direkt an der Geländeoberfläche an oder werden im südlichen Bereich von bis zu 650 m mächtigen Sedimentgesteinen überdeckt. Der Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion wird durch kristalline Wirtsgesteine gebildet.

Tabelle 40: Übersicht der Bewertungen der einzelnen Indikatoren der Anlage 2 (zu § 24 Abs. 3) StandAG des Teiluntersuchungsraums 04_11UR im GzME „Saxothuringikum"

Indikator Nr.	Indikator	Bewertung TUR 04_11UR
2.1a	Barrierenmächtigkeit	günstig
2.1b	Grad der Umschließung	noch nicht bewertet
2.2	Teufe der oberen Begrenzung	günstig
2.3	Flächenhafte Ausdehnung	günstig
2.4	Potenzialbringer bei Tonstein	keine Anwendung

Indikator 2.1a Barrierenmächtigkeit

In weiten Bereichen der Teiluntersuchungsraum 04_11UR stehen kristalline Wirtsgesteine direkt an der Geländeoberfläche oder unter geringmächtiger känozoischer Bedeckung an. Der südliche Teil des Teiluntersuchungsraums wird durch eine 300 m bis 650 m mächtigen Überdeckung durch permische bis kreidezeitliche Sedimentgesteine bestimmt. Somit ergeben sich

Anwendungsbeispiel Teiluntersuchungsraum 04_11UR im GzME „Saxothuringikum“ (009_00TG)

für den Teiluntersuchungsraum 04_11UR Barrierenmächtigkeiten zwischen 1 200 m und 850 m für einen Tiefenbereich zwischen 300 m und 1 500 m u. GOK. Die Bewertung des Indikators „Barrierenmächtigkeit“ der Anlage 2 (zu § 24 Abs. 3) StandAG fällt für den Teiluntersuchungsraum 04_11UR „günstig“ aus.

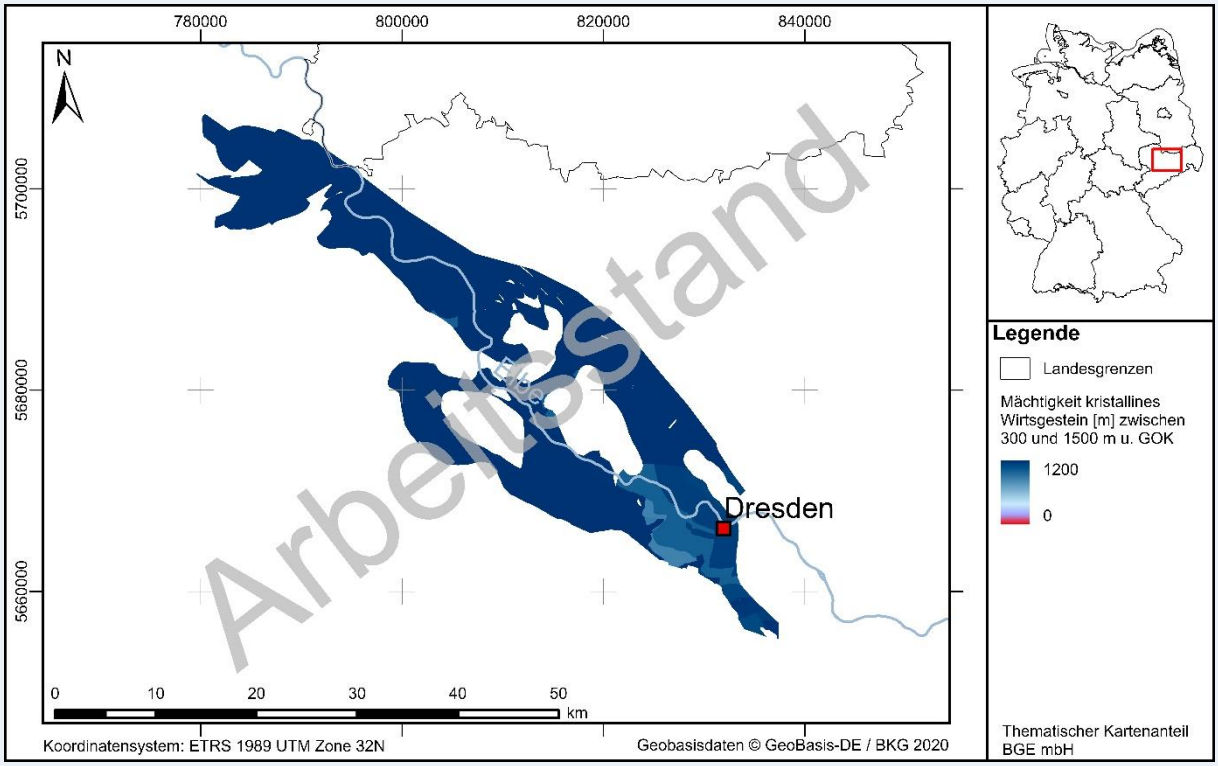


Abbildung 113: Schematische Darstellung der Mächtigkeiten kristalliner Wirtsgesteinseinheiten im Teiluntersuchungsraum 04_11UR des GzME „Saxothuringikum“

Indikator 2.1b Grad der Umschließung

Der Indikator 2.1b „Grad der Umschließung“ ist noch nicht final bewertet.

Indikator 2.2 Teufenlage der oberen Begrenzung

In weiten Teilen des Teiluntersuchungsraums 04_11UR steht kristallines Wirtsgestein oberflächlich an oder wird von geringmächtigen känozoischen Sedimentabfolgen überdeckt. Südlich der Dresdner Elbtalweitung überlagern mächtige kreidezeitliche Sedimentgesteine (z. B. B..218….1966), sowie örtlich permische sedimentäre und vulkanische Abfolgen (z. B. Bohrung B..270….1966) die kristallinen Gesteinsformationen. Im Zentrum des Teiluntersuchungsraums 04_11UR bildeten sich spätmagmatische Bereiche mit Vulkaniten. Im südlichen Bereich der Vulkanite ist die obere Begrenzung der kristallinen Wirtsgesteine im Liegenden durch 10 Bohrungen gut definiert (maximal ca. 280 m mächtige Vulkanite, belegt durch Bohrung B…51….1972). Die Vulkanite im nördlichen Bereich erreichen rund 100 m Mächtigkeit (belegt durch Bohrung B…99….1972). Eine schematische Tiefenverteilung der Oberfläche der

Anwendungsbeispiel Teiluntersuchungsraum 04_11UR im GzME „Saxothuringikum“ (009_00TG)

kristallinen Wirtsgesteine ist in Abbildung 114 dargestellt. Der gesamte Teiluntersuchungsraum 04_11UR weist eine „günstige“ Teufenlage der oberen Begrenzung auf.

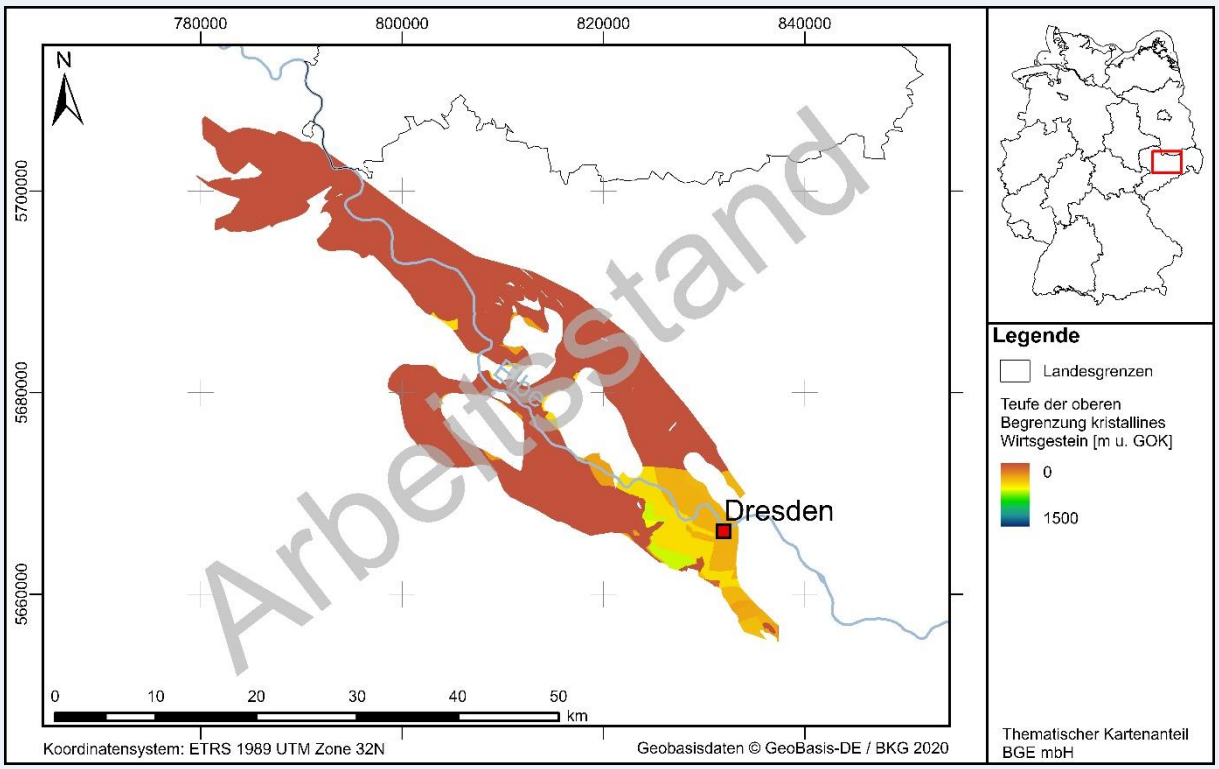


Abbildung 114: Schematische Darstellung der Teufenlage der oberen Begrenzung der kristallinen Wirtsgesteine im Teiluntersuchungsraum 04_11UR

Indikator 2.3 Flächenhafte Ausdehnung

Der Teiluntersuchungsraum 04_11UR erfüllt mit einer zusammenhängenden Fläche von 806 km² den zweifachen Mindestflächenbedarf der geologischen Barriere gemäß Anlage 2, Indikator 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG und kann daher als „günstig“ bewertet werden. Als Mindestflächenbedarf wird dabei der zur Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ zu § 23 Abs. 5 Nr. 4 StandAG (BT-Drs. 18/11398, S. 71) angegebene Flächenbedarf für kristallines Wirtsgestein von 6 km² verstanden.

Indikator 2.4 Potenzialbringer bei Tonstein

Dieser Indikator wird bei kristallinem Wirtsgestein nicht angewendet.

5.7.3 Charakterisierung des Internbaus des Wirtsgesteinsbereiches mit Barrierefunktion

Das Ziel der Charakterisierung ist es, den Internbau (die Homogenität oder Heterogenität) des Wirtsgesteinsbereiches mit Barrierefunktion zu bewerten. Zu dessen Charakterisierung werden hauptsächlich Bohrungsinformationen, Informationen aus Aufschlussbeschreibungen, wissenschaftliche Literatur und geologische Karten verwendet.

Die Charakterisierung des Wirtsgesteinsbereichs mit Barrierefunktion ist die Grundlage für die Bearbeitung der räumlichen Charakterisierbarkeit des Endlagersystems (§ 7 Abs. 6 Nr. 3 Buchst. a) EndlSiUntV). Dieser wird in Anlehnung an die beinahe wortgleiche Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG in der qualitativen Analyse des sicheren Einschlusses bewertet (siehe Kapitel 6). Das Kriterium zur Bewertung der räumlichen Charakterisierbarkeit Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG stellt somit die Bewertungsgrundlage dar (siehe Kapitel 6). Die Analyse der räumlichen Charakterisierbarkeit soll, wenn nötig, flächendifferenziert erfolgen. Dies bedeutet, dass, sofern es die Sachlage zulässt, die Bewertung innerhalb eines Teiluntersuchungsraum differenziert im Raum erfolgt.

5.7.4 Kriterium zur Bewertung der räumlichen Charakterisierbarkeit Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG

Die Bewertung des Kriteriums geht zu großen Teilen aus den Arbeiten hervor, die in der Teiluntersuchungsraum-spezifischen Ausarbeitung der Geosynthese stattfinden. Deshalb wird zur besseren Nachvollziehbarkeit das Vorgehen im Folgenden ganzheitlich erläutert, ohne formell zwischen der Geosynthese und der Bewertung, die im Rahmen der Analyse des Endlagersystems stattfindet, zu unterscheiden. Dadurch ist es möglich, das Vorgehen allumfassend von der allgemeinen Theorie, den wirtsgesteinsspezifischen Besonderheiten, der praktischen Ausarbeitung in den GzME und der Bewertung nachvollziehen zu können.

Mit der Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG wird die Ermittelbarkeit der relevanten Gesteinstypen und ihrer Eigenschaften sowie die Übertragbarkeit dieser Eigenschaften in Bezug auf die geologischen Barrieren, die direkt oder indirekt den sicheren Einschluss der hochradioaktiven Abfälle gewährleisten sollen, bewertet. Hierzu werden die bewertungsrelevanten Eigenschaften „Ermittelbarkeit der Gesteinstypen und ihrer charakteristischen Eigenschaften im vorgesehenen Endlagerbereich, insbesondere im vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereich“ mit drei Indikatoren und „Übertragbarkeit der Eigenschaften im vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereich“ mit einem Indikator herangezogen (Tabelle 41). Die Ermittelbarkeit ist unabhängig vom aktuellen Erkundungsgrad und der Datenlage in einem Gebiet. Sie basiert auf der geologischen Komplexität des betrachteten Gebietes (Kapitel 5.1.2.1).

Die Indikatoren „Variationsbreite der Eigenschaften“, „Räumliche Verteilung der Gesteinstypen“ und „Ausmaß der tektonischen Überprägung“ sind insbesondere auf den einschlusswirksamen Gebirgsbereich und darüber hinaus auf den Endlagerbereich anzuwenden. Der Indikator „Gesteinsausbildung“ gilt nur für den einschlusswirksamen Gebirgsbereich. Die Bewertung der Indikatoren „Variationsbreite der Eigenschaften“, „Räumliche Verteilung der Gesteinstypen“ bezieht sich im Schritt 2 der Phase I auf den Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion und nicht auf weitere Barrieren im Deckgebirge, da sich die Bewertung „insbesondere auf den vorgesehenen

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

einschlusswirksamen Gebirgsbereich“ bezieht (Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG, vgl. BGE 2020a). Die Möglichkeit zur Ausweisung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs wird in der quantitativen Analyse des Endlagersystems bearbeitet (siehe Kapitel6), wodurch in der qualitativen Analyse des sicheren Einschlusses die Indikatoren zunächst auf den Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion angewendet wird.

Die Indikatoren zur „Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)“, „Räumliche Verteilung der Gesteinstypen“ und „Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen“ stellen hierarchische Einheiten dreier unterschiedlicher Maßstäbe dar (vom kleinen zum großen Maßstab).

Bewertungsgrundlagen sind im wesentlichen lithologische Beschreibungen des Wirtsgesteins anhand von Schichtenverzeichnissen aus Bohrungen in und um dieTeiluntersuchungsräume, die Erstellung und laterale Korrelation von repräsentativen Profilen, welche die räumliche Heterogenität im Teiluntersuchungsraum widerspiegeln, sowie die Auswertung bohrlochgeophysikalischer Messungen und anderer geophysikalischer Daten.

Die Prognose der Gesteinsfazies kann, im Falle der sedimentären Wirtsgesteine, über paläogeographische Rekonstruktionen (z. B. Karten, die den Ablagerungsraum darstellen) und über die Rekonstruktion und Definition generischer Einheiten, im Falle der kristallinen Wirtsgesteine, erfolgen.

Die Bewertung des Ausmaßes der tektonischen Überprägung wird in Schritten unterschiedlicher Maßstäbe durchgeführt. Hierfür werden tektonische Großräume mit einer gemeinsamen tektonischen Entwicklungsgeschichte, überregionale und regionale Störungszonen sowie die diffuse tektonische Überprägung betrachtet, die eine tektonischen Zergliederung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs erwarten lässt. Im Folgenden wird die aktualisierte Methode zu den vier Indikatoren beschrieben und anhand von wirtsgesteinsspezifischen Beispielen illustriert.

Tabelle 41: Auszug aus Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße beziehungs-weise Indikator des Kriteriums	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	ungünstig
Ermittelbarkeit der Gesteinstypen und ihrer charakteristischen Eigenschaften im vorgesehenen Endlagerbereich, insbesondere im vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereich	Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbe-reich	gering	deutlich, aber bekannt bzw. zuverlässig erhebbar	erheblich und/oder nicht zuverlässig erhebbar
	Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbe-reich und ihrer Eigenschaften	gleichmäßig	kontinuierliche, bekannte räumliche Veränderungen	diskontinuierliche, nicht ausreichend genau vorhersagbare räumliche Veränderungen
	Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit	weitgehend ungestört (Störungen im Abstand > 3 km vom Rand des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs), flache Lagerung	wenig gestört (weitständige Störungen, Abstand 100 m bis 3 km vom Rand des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs), Flexuren	Gestört (engständig zerblockt, Abstand < 100 m), gefaltet
Übertragbarkeit der Eigenschaften im vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereich	Gesteinsausbildung (Gesteins-fazies)	Fazies regional einheitlich	Fazies nach bekanntem Muster wechselnd	Fazies nach nicht bekanntem Muster wechselnd

5.7.4.1 Indikator 3.1a „Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich“

Der Indikator „Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich“ bewertet die Ermittelbarkeit der Spannbreite der für die Abwägung relevanten Eigenschaften im vorgesehenen Endlagerbereich“ (Alfarra et al. 2020b, S. 146). Nach AkEnd (2002) sind Gebiete, in denen die Gesteine und deren Eigenschaften großräumig einheitlich oder sehr ähnlich ausgebildet sind, positiv

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

einzuordnen. Für den Indikator erfolgt die Bewertung der Gebiete anhand der in Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG angegebenen Wertungsgruppen, wie in Tabelle 41 aufgeführt.

Die Eigenschaften der Gesteinstypen – wie Wärmeleitfähigkeit, Gesteinsdurchlässigkeit sowie elastische Eigenschaften und die Festigkeit – werden maßgeblich von der mineralogischen Zusammensetzung und der Textur des Gesteins bestimmt. Zementation und Kompaktion wirken sich ebenfalls auf die Eigenschaften der Gesteine aus. Zu den spezifischen Eigenschaften liegen derzeit meist keine ortsspezifischen, detaillierten Daten für die endlagerrelevanten Gesteinsabfolgen aus den Teiluntersuchungsräumen vor. Daher wird für die Bewertung der Variationsbreite der Eigenschaften in diesem Schritt des Verfahrens meist auf petrographische Beschreibungen der vorhandenen Gesteinstypen in den Schichtenverzeichnissen der Bohrungen zurückgegriffen. Kommt innerhalb der geologischen Barriere eine große Anzahl an Gesteinstypen vor, wird dies mit einer großen Variationsbreite der Eigenschaften gleichgesetzt. Bei der Bewertung des Indikators wird demnach das Vorhandensein verschiedener Gesteinstypen/Lithologien sowie die dadurch vorhandenen Grenzflächen als Proxy für die Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen genutzt. Abfolgen, die weitestgehend aus einem Gesteinstyp bestehen sind mit „günstig“ zu bewerten. Bestehen Abfolgen aus mehreren Gesteinstypen bzw. Wechsellagerung, kann man davon ausgehen, dass sie eine erhebliche Variationsbreite der Eigenschaften aufweisen. Diese Abfolgen sind „bedingt günstig“ zu bewerten, wenn die Variationsbreite der Eigenschaften deutlich ist, aber bekannt bzw. zuverlässig erhebbar und „ungünstig, wenn sich deren Eigenschaften nicht zuverlässig erheben lassen und die Variationsbreite erheblich ist. Beipielanwendungen zu dieser Bewertung sind in Kapitel 5.7.4.2 dargestellt.

Die Bewertung erfolgt anhand der Auswertung von Bohrungsdaten (Schichtenverzeichnisse, Bohrlochgeophysikalische Daten), die anhand von repräsentativen Profilen für jeden Teiluntersuchungsraum visualisiert werden (siehe Kapitel 5.7.1). Für die objektive Bewertung der Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen ist die Festlegung eines Betrachtungsmaßstabes (Skala) notwendig. Die Bewertung des Indikators bezieht sich insbesondere auf den vorhergesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereich. Gemäß § 23 Abs. 5 Nr. 2 StandAG muss der Gebirgsbereich, der den einschlusswirksamen Gebirgsbereich aufnehmen soll, mindestens 100 m mächtig sein. Als Betrachtungsmaßstab für die Bewertung (Skala) wird demnach ein Gebirgsbereich von mindestens 100 m Mächtigkeit festgelegt. Zusätzlich über den vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereich hinaus kann auch eine Bewertung des Endlagerbereichs stattfinden. In diesen Fällen erstreckt sich der Betrachtungsmaßstab über den Wirtsgesteinsbereich mit Barriereeigenschaften hinaus und kann weitere überlagernde geologische Schichten im Deckgebirge beinhalten, soweit sie zur Sicherheit des Endlagers beitragen.

In erster Näherung erfolgt die Bewertung der Variationsbreite der Eigenschaften anhand der vorgefundenen Gesteinstypen im Betrachtungsmaßstab (siehe Beispielanwendungen in Tabelle 42). Eine qualitative Bewertung der Abfolgen mit geringer Variationsbreite der Gesteinstypen kann gegebenenfalls anhand von vorhandenen bohrlochgeophysikalischen Datensätzen erfolgen. Der Wechsel von Lithologien bzw. Gesteinstypen und die dadurch vorhandenen Grenzflächen stellen tendenziell eine stärkere Heterogenität sowie Variationsbreite der Eigenschaften dar und werden im Rahmen

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

der Indikatorbewertung berücksichtigt. Zur Eingrenzung eines Teiluntersuchungsraums können mehrere Referenzprofile mit jeweils eigenständiger Bewertung des Indikators verwendet werden.

Tabelle 42: Wertungsgruppen des Indikators Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich und Beispielanwendungen der drei Wirtsgesteine

	Wertungsgruppe		
	günstig	bedingt günstig	ungünstig
Allgemeine Beispielanwendung	Ein Gesteinstyp im Betrachtungsmaßstab und dessen Eigenschaften sind bekannt bzw. zuverlässig erhebbar	Mehrere Gesteinstypen bzw. Wechsellagerung im Betrachtungsmaßstab (deutliche Variationsbreite der Eigenschaften) und die Eigenschaften der Gesteinstypen sind bekannt bzw. zuverlässig erhebbar	Mehrere Gesteinstypen bzw. Wechsellagerung im Betrachtungsmaßstab (erhebliche Variationsbreite der Eigenschaften) und/oder die Eigenschaften der Gesteinstypen sind nicht zuverlässig erhebbar
Beispielanwendung Tongestein	Ein Gesteinstyp (max. mit geringen Einschaltungen)	Zwei Gesteinstypen mit deutlicher Variationsbreite der Eigenschaften	Drei oder mehr Gesteinstypen mit erheblicher Variationsbreite der Eigenschaften
Beispielanwendung Steinsalz in stratiformer und steiler Lagerung (Anhang 6)	Gesteinstyp Steinsalz (max. 5 % Verunreinigungen in Form anderer Petrographien, z. B. Anhydrit) ohne Nebenkomponenten	Gesteinstyp Steinsalz mit weiteren Nebenkomponenten und deutlicher Variationsbreite der Eigenschaften	Gesteinstyp Steinsalz mit weiteren Nebenkomponenten und erheblicher Variationsbreite der Eigenschaften
Kristallin	Kristalline Wirtsgesteinstypen mit geringer Variationsbreite der Eigenschaften; keine signifkanten Änderungen durch spät- oder postmagmatische Prozesse oder retrograde Metamorphoseprozesse zu erwarten	Erhöhung der Variationsbreite der Eigenschaften in einem potenziellen Endlagerbereich durch spätmagmatische Prozesse bei Plutoniten; oder retrograde Mineralumbildungen bei hochgradig regionalmetamorphen Gesteinen Variationsbreite deutlich, aber bekannt beziehungsweise zuverlässig erhebbar	Erhöhung der Variationsbreite der Eigenschaften in einem potenziellen Endlagerbereich durch postmagmatische oder vulkanische Prozesse bei Plutoniten; oder deutliche retrograde Mineralumbildungen und Deformation bei hochgradig regionalmetamorphen Gesteinen; Variationsbreite der Eigenschaften erheblich, und/oder nicht zuverlässig erhebbar

5.7.4.2 Beispiele zu Indikator 3.1a „Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich“

Die Vorgehensweise bei der Bewertung des Indikators „Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich“ hinsichtlich der Spannbreite bzw. Ermittelbarkeit der für die Abwägung relevanten Eigenschaften im vorgesehenen Endlagerbereich wird im Folgenden anhand der Anwendungsbeispiele GzME „Opalinuston“ (Beispiel 54) für das Wirtsgestein Tongestein, GzME „Thüringer Becken“ (Beispiel 55) für das Wirtsgestein Steinsalz flach und das GzME „Saxothuringikum“ (Beispiel 56) für das kristalline Wirtsgestein illustriert.

Beispiel 54: Bearbeitung des Indikators 3.1a „Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich“ im GzME „Opalinuston“ (01_07UR)

Anwendungsbeispiel im Teiluntersuchungsraum 01_07UR im GzME „Opalinuston“ (01_00UR) - Bearbeitung des Indikators 3.1a

Die geowissenschaftlichen Arbeiten als Grundlage für die Bewertung des Indikators 3.1a der Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG werden für das GzME „Opalinuston“ am Beispiel des Teiluntersuchungsraums 01_07UR gezeigt. Dieser Teiluntersuchungsraum wird in den Kapiteln 5.6.1 und 5.7.2, ausführlich beschrieben.

Die Bewertung des Indikators 3.1a **„Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich“** des Kriteriums zur Bewertung der „Ermittelbarkeit der relevanten Gesteinstypen und ihrer Eigenschaften im vorgesehenen Endlagerbereich, insbesondere im vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereich“ (Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG), ist in Tabelle 43 zusammengefasst. Die Ausarbeitung, die zur Bewertung des Indikators führt, wird im Folgenden gezeigt.

Tabelle 43: Übersicht über die Bewertung des Indikators 3.1a „Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich“ der Eigenschaft „Ermittelbarkeit der relevanten Gesteinstypen und ihrer Eigenschaften im vorgesehenen Endlagerbereich, insbesondere im vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereich“ der Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG für 01_07UR im GzME „Opalinuston“

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße beziehungsweise Indikator des Kriteriums	Bewertung
Ermittelbarkeit der relevanten Gesteinstypen und ihrer Eigenschaften im vorgesehenen Endlagerbereich, insbesondere im vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereich	Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich	Flächendifferenziert: günstig oder bedingt günstig

Anwendungsbeispiel im Teiluntersuchungsraum 01_07UR im GzME „Opalinuston“ (01_00UR) - Bearbeitung des Indikators 3.1a

Die Klassifikation von klastischen Sedimentgesteinen und die entsprechende Benennung von Gesteinstypen spiegelt grundlegende Unterschiede der Korngröße (Sand-Silt-Ton), aber auch der mineralogischen Zusammensetzung, wider. Gesteinstypen sind die in den Schichtenverzeichnissen dokumentierten lithologischen Einheiten, z. B. Tonstein, Tonmergelstein, Kalkstein. Diese charakteristischen Gesteinstypen weisen sehr unterschiedliche petrophysikalische Eigenschaften auf (Čermák et al. 1982; Schön 1983; Schön 2015), wobei die Hauptgesteinstypen in ihren Eigenschaften wesentliche, z. T. extreme Unterschiede zeigen (vgl. auch die Supplements zu Bär et al. 2020). Daher kann eine große Anzahl an Gesteinstypen in der Abfolge mit einer großen Variationsbreite der Eigenschaften gleichgesetzt werden und bei der Bewertung des Indikators das Vorhandensein verschiedener Gesteinstypen/Lithologien sowie die dadurch vorhandenen Grenzflächen als Proxy für Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen genutzt werden. Mittels der Auswertungen von Bohrlochmessungen ist es möglich, Tongehalte der Gesteinstypen sowie andere Gesteinseigenschaften zu ermitteln.

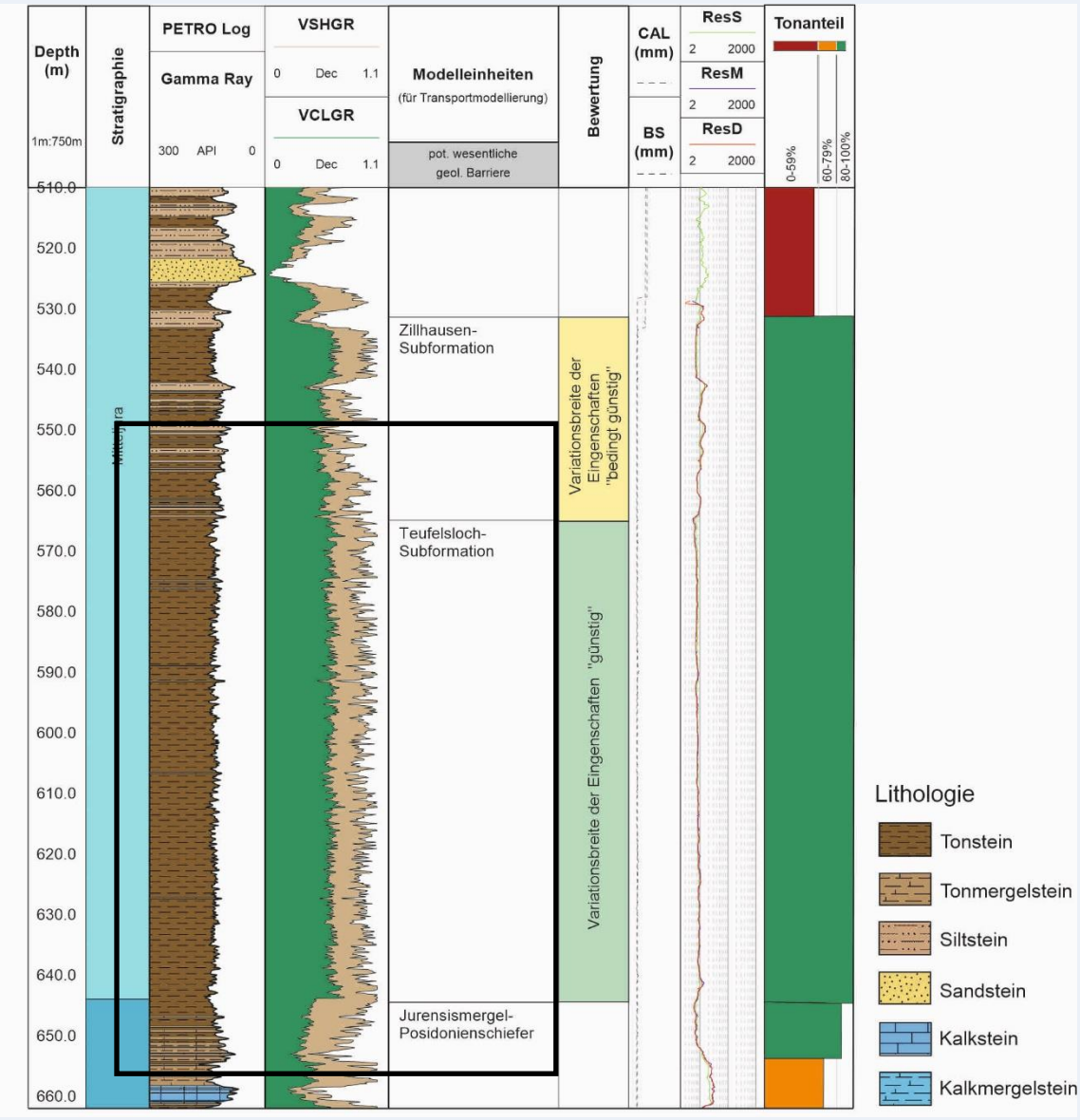
Da derzeit keine ortsspezifischen, detaillierten Daten zur Variationsbreite der Eingenschaften der Gesteinstypen aus den Teiluntersuchungsräumen vorliegen, werden für die Bewertung der Variationsbreite der Eigenschaften in diesem Schritt des Verfahrens auf petrographische Beschreibungen der vorhandenen Gesteinstypen in den Schichtenverzeichnissen der Bohrungen zurückgegriffen, die die Abfolge der Teufelsloch-Subformation und Zillhausen-Subformation lithologisch charakterisieren (Abbildung 115). Dabei wird die Anzahl und die Art der Gesteinstypen in einem Bereich einer Wertungsgruppe zugeordnet (Tabelle 44). Das Vorkommen lediglich eines Gesteinstyps in einer Abfolge wird dabei mit „günstig“ bewertet. Die Bewertung orientiert sich primär an der lithologischen Beschreibung im Schichtenverzeichnis. Der Tonanteil kommt zum Tragen, wenn es sich lediglich um Gesteinstypen handelt, die der Wirtsgestein-Definition für Tongestein (BGE 2020j) und Anhang 6 entsprechen. Die Bewertung der Variationsbreite der Gesteinstypen und deren Eigenschaften wird auf die günstigste Abfolge mit einer Mächtigkeit von mindestens 100 m angewendet.

Tabelle 44: Darstellung der Wertungsgruppen mit zugehörigen lithologischen Beschreibungen im Schichtenverzeichnis, Tonanteilen in Prozent nach Hoth et al. (2007) und Beispielanwendungen

Lithologische Beschreibung im SV	Tonanteil (nach Hoth et al. 2007)	Wertung	Beispielanwendung
Ein Gesteinstyp	80 % oder mehr	Günstig	Tonstein (schluffig, feinsandig)
Zwei Gesteinstypen	60 % bis 79 %	Bedingt günstig	Tonstein und Siltstein
Mindestens drei Gesteinstypen oder Wechsellagerung	0 %bis 59 %	Ungünstig	Tonmergelstein, Kalkstein, Mergelstein

Anwendungsbeispiel im Teiluntersuchungsraum 01_07UR im GzME „Opalinuston“ (01_00UR) - Bearbeitung des Indikators 3.1a

Für die Bewertung des Indikators 3.1a „Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich“ wird die Opalinuston-Formation in zwei wesentliche Abfolgen untergliedert, die Teufelsloch- und die Zillhausen-Subformation. Die Teufelsloch-Subformation ist durch eine sehr homogene Abfolge von dunkelgrauem bis schwarzgrauem, teilweise schwach feinsandigem Tonstein charakterisiert. Für die Teufelsloch-Subformation kann nach den lithologischen Beschreibungen und den verfügbaren geophysikalischen Bohrlochmessungen eine sehr geringe Variationsbreite der Eigenschaften angenommen werden. Diese geringe Variationsbreite der Gesteinseigenschaften spiegelt sich auch in der Zusammenstellung der Parameter (Kapitel 5.7.6) wider.



Anwendungsbeispiel im Teiluntersuchungsraum 01_07UR im GzME „Opalinuston“ (01_00UR) - Bearbeitung des Indikators 3.1a

Abbildung 115: Beispielhafte Darstellung eines Auszugs aus dem repräsentativen Profil der TB Donautherme Neu-Ulm im Opalinuston. Die Teufelsloch-Subformation markiert eine Abfolge mit einem Gesteinstyp und nur sehr geringen Variationen im Gamma-Ray-Log. In der Zillhausen-Subformation können deutliche Variationen der Gesteinstypen mit Hilfe der vorhandenen geophysikalischen Bohrlochmessungen identifiziert werden. Für die einzelnen Subformationen ergibt sich daher eine unterschiedliche Bewertung der Variationsbreite der Eigenschaften. Da insgesamt keine 100 m mit günstiger Bewertung vorliegen (siehe schwarzer Umriss), ist die Bewertung der Variationsbreite der Eigenschaften für die TB Donautherme Neu-Ulm als „bedingt günstig“ einzuordnen.

Die Zillhausen-Subformation besteht aus feinsandigen Tonsteinen bis Tonmergelsteinen mit Kalksandstein- und sandigen Kalksteinbänken im oberen Teil (Franz & Nitsch 2009). Die Zillhausen-Subformation ist im gesamten Teiluntersuchungsraum durch Wechsel von Tonsteinen und siltigen Ablagerungen gekennzeichnet.

In Bereichen des Teiluntersuchungsraums 01_07UR, in denen die Teufelsloch-Subformation eine Mächtigkeit von 100 m aufweist, kann somit im Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion die Variationsbreite der auftretenden Gesteinstypen mit „gering“ beschrieben werden. Dort jedoch, wo die Teufelsloch-Subformation keine Mächtigkeit von 100 m erreicht und die Zillhausen-Subformation mit einer siltigen Abfolge an der Basis beginnt, wird die Variationsbreite der Eigenschaften als „deutlich“ angenommen und es erfolgt für diese Bereiche eine „bedingt günstige“ Bewertung. Insgesamt kann der nordwestliche, westliche und südliche Teil des Teiluntersuchungsraums 01_07UR mit „günstig“ bewertet werden (Abbildung 116). Der nordöstliche und östliche Teil des Teiluntersuchungsraums 01_07UR muss mit „bedingt günstig“ bewertet werden.

Anwendungsbeispiel im Teiluntersuchungsraum 01_07UR im GzME „Opalinuston“ (01_00UR) - Bearbeitung des Indikators 3.1a

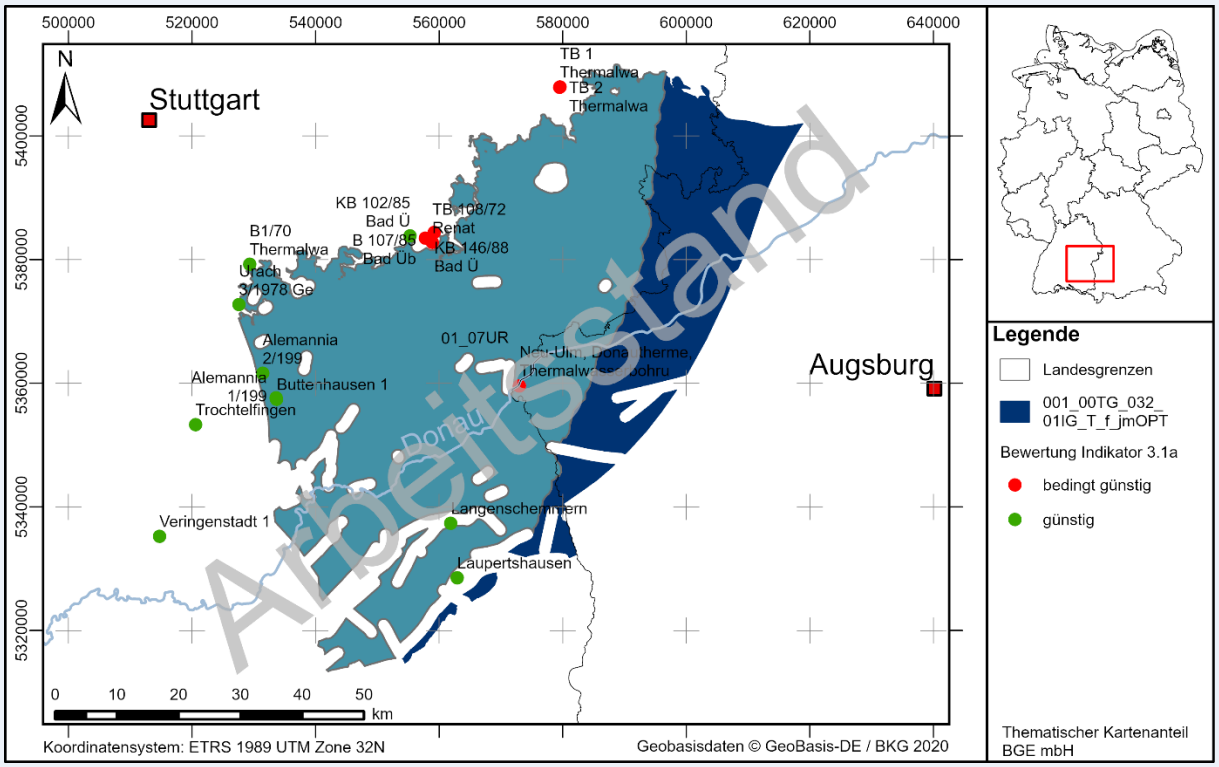


Abbildung 116: Bewertung des Indikators 3.1a „Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich“ im Teiluntersuchungsraum 01_07UR anhand relevanter Bohrungen.
Die türkisfarbene Fläche kennzeichnet den Teiluntersuchungsraum 01_07UR.

Beispiel 55: Bearbeitung des Indikators 3.1a „Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich im GzME „Thüringer Becken“ (03_00UR)

Anwendungsbeispiel im GzME „Thüringer Becken“ (03_00UR) – Bearbeitung des Indikators 3.1a

Die geowissenschaftlichen Arbeiten als Grundlage für die Bewertung des Indikators 3.1a **„Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich“** des Kriteriums zur Bewertung der „Ermittelbarkeit der relevanten Gesteinstypen und ihrer Eigenschaften im vorgesehenen Endlagerbereich, insbesondere im vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereich“ (Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG) werden für das GzME „Thüringer Becken“ am Beispiel des Teiluntersuchungsraums 03_21UR gezeigt. Dieser Teiluntersuchungsraum wird in den Kapiteln 5.6.1 und 5.7.2 ausführlich beschrieben.

Anwendungsbeispiel im GzME „Thüringer Becken“ (03_00UR) – Bearbeitung des Indikators 3.1a

Die Bewertung des Indikators 3.1a ist in Tabelle 45 zusammengefasst. Die Ausarbeitung, die zur Bewertung des Indikators führt, wird im Folgenden gezeigt.

Tabelle 45: Übersicht über die Bewertung des Indikators 3.1a „Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich“ für den Teiluntersuchungsraum 03_21UR im GzME „Thüringer Becken“

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße beziehungsweise Indikator des Kriteriums	Bewertung
Ermittelbarkeit der relevanten Gesteinstypen und ihrer Eigenschaften im vorgesehenen Endlagerbereich, insbesondere im vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereich	Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich	Flächendifferenziert: überwiegend günstig, untergeordnet bedingt günstig, ungünstig

Die Ablagerungen des Zechstein sowie der lithologische Aufbau der Steinsalz-Formationen sind abhängig von der Ausprägung der Eindampfungszyklen. So kann es im Wirtsgestein „Steinsalz in flacher Lagerung“ sowohl zu großräumigen als auch zu kleinräumigen Wechseln in der Lithologie kommen. Die dadurch vorhandenen Grenzflächen stellen eine Heterogenität bzw. Ungewissheit bezüglich der Eigenschaften der Gesteinstypen dar. Ortsspezifische Daten aus den Teiluntersuchungsräumen, beispielsweise bezüglich mineralogischer Zusammensetzungen, Gefügeausbildungen, Texturen, Permeabilitäten oder Kriechvermögen, liegen in dieser Phase des Verfahrens nicht vor. Aufgrund dessen basiert eine Bewertung der Indikatoren 1a und 1b der Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG in diesem Schritt des Verfahrens auf lithologischen Beschreibungen der vorhandenen Gesteinstypen in den Schichtenverzeichnissen der Bohrungen sowie der Auswertung bohrlochgeophysikalischer Daten. Gesteinstypen beschreiben dabei die in den Schichtenverzeichnissen dokumentierten lithologischen Einheiten, z. B. Steinsalz, Anhydritstein, Kalisalz, Karbonat.

Die Bewertung der lithologischen Beschreibungen wird auf die Mindestmächtigkeit von 100 m angewendet, um so die jeweils günstigste Abfolge mit einer Mächtigkeit von mindestens 100 m zu identifizieren. Dabei findet eine qualitative Bewertung anhand der lithologischen Beschreibungen in den Schichtenverzeichnissen der repräsentativen Profile statt (vgl. Anhang 6). Das Vorkommen von geringmächtigen Zwischenschichten anderer Gesteinsart (z. B. Anhydrit) in einer Steinsalzschicht wird betrachtet und einer Wertungsgruppe zugeordnet (Tabelle 46). Das Vorkommen von Nebenkomponenten, z. B. Anhydrit in Steinsalz (Hauptkomponente), wird nur

Anwendungsbeispiel im GzME „Thüringer Becken“ (03_00UR) – Bearbeitung des Indikators 3.1a

dann berücksichtigt, sofern sie eine starke Heterogenität verursachen, die bespielsweise in bohrlochgeophysikalischen Daten erkennbar ist.

Tabelle 46: Darstellung der Wertungsgruppen mit zugehörigen lithologischen Beschreibungen im Schichtenverzeichnis (obere Zeile) und mit Bewertung von Nebenkomponenten anhand von bohrlochgeophysikalischen Daten (untere Zeile)

Günstig: Variationsbreite gering	**Bedingt günstig: Variationsbreite deutlich, aber bekannt beziehungsweise zuverlässig erhebbar**	**Ungünstig: Variationsbreite erheblich und/oder nicht zuverlässig erhebbar**
95 % – 100 % Steinsalz als Hauptkomponente (max. 5 % Zwischenschichten)	95 % – 100 % Steinsalz als Hauptkomponente (max. 5 % Zwischenschichten)	< 95 % Steinsalz als Hauptkomponente (> 5 % Zwischenschichten)
Keine weiteren Nebenkomponenten	Weitere **Nebenk**omponenten mit deutlicher Variationsbreite der Eigenschaften vorhanden (bezogen auf 100 m)	Weitere **Neben**komponenten mit erheblicher Variationsbreite der Eigenschaften vorhanden (bezogen auf 100 m)

Besteht das Steinsalz in dem betrachteten 100 m mächtigen Bereich aus reinem Steinsalz ohne weitere Nebenkomponenten und liegen maximal 5 % an Zwischenschichten vor, wird mit „günstig“ bewertet (Abbildung 117). Liegen vertikal differenziert unterschiedliche Bewertungen für die betrachteten 100 m der Steinsalzschicht innerhalb eines repräsentativen Profils vor, wird die ungünstigere Wertungsgruppe gewählt.

Anwendungsbeispiel im GzME „Thüringer Becken“ (03_00UR) – Bearbeitung des Indikators 3.1a

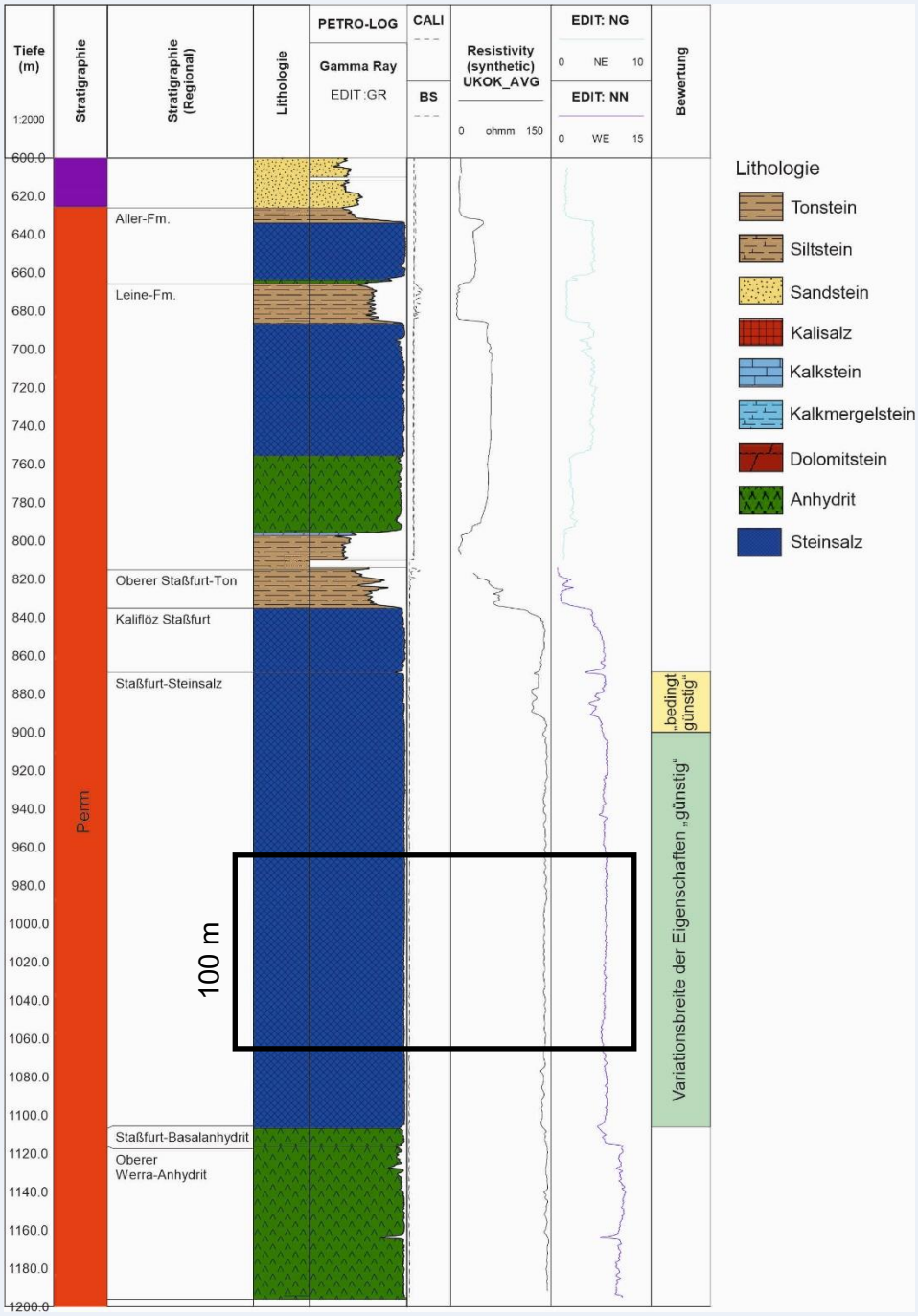


Abbildung 117: Beispielhafte Darstellung eines Auszugs aus dem repräsentativen Profil im Staßfurt-Steinsalz im Teiluntersuchungsraum 03_21UR im Thüringer Becken.
Der grün markierte Bereich definiert eine Abfolge mit reinem Steinsalz ohne weitere Nebenkomponenten und mit max. 5 % Zwischenschichten anderer

Anwendungsbeispiel im GzME „Thüringer Becken“ (03_00UR) – Bearbeitung des Indikators 3.1a

Lithologie, die mehr als 100 m (vgl. schwarzer Umriss) mächtig ist: Wertungsgruppe „günstig“.

Mithilfe von lithologischen Beschreibungen aus Schichtenverzeichnissen sowie bohrlochgeophysikalischen Datensätzen können Abfolgen innerhalb des Wirtsgesteinsbereichs mit Barrierefunktion identifiziert werden, die größere Variationen aufweisen und denen daher die Wertungsgruppe „bedingt günstig“ zugeordnet werden kann. So kann anhand der bohrlochgeophysikalischen Datensätze im Teiluntersuchungsraum 03_21UR eine geringmächtige heterogene Abfolge im oberen Bereich des Staßfurt-Steinsalzes identifiziert werden, deren Bewertung „bedingt günstig“ wäre (Abbildung 117). Da sich unterhalb dieser mit „bedingt günstig“ bewerteten Gesteinsabfolge jedoch noch über 100 m mächtige Steinsalzabfolgen mit einer „günstigen“ Bewertung befinden, ist die Lokation insgesamt mit „günstig“ zu bewerten.

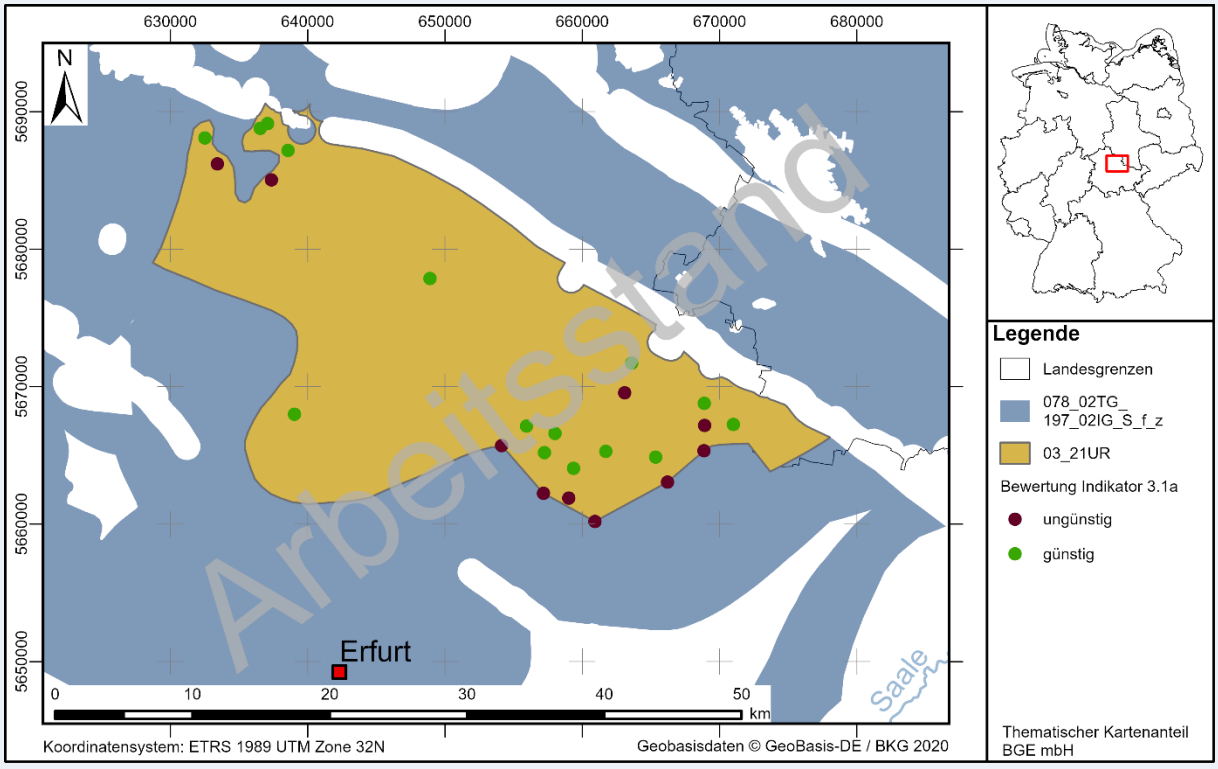


Abbildung 118: Bewertung des Indikators 3.1a „Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich“ im Teiluntersuchungsraum 03_21UR

Die meisten Profile innerhalb des Teiluntersuchungsraums 03_21UR zeigen mindestens 100 m mächtige Abfolgen mit geringer Variationsbreite und damit günstiger Bewertung (Abbildung 118). Ungünstige Wertungen gibt es v. a. bei Bohrungen, die an den Teiluntersuchungsraum-Grenzen (Eingrenzung durch die Mindestanforderung „Mächtigkeit“) liegen. Damit schließt der Bewertungsmaßstab von 100 m auch die heterogene Hangendpartie des Staßfurt-

Arbeitsstand

Anwendungsbeispiel im GzME „Thüringer Becken“ (03_00UR) – Bearbeitung des Indikators 3.1a

Steinsalz oder sogar weitere Einheiten mit ein. Weiterhin gibt es im Südosten des Teiluntersuchungsraums 03_21UR Zwischenschichten, die weitere Gesteinstypen enthalten, und über 5 % der 100 m mächtigen bewertungsrelevanten Gesteinsabfolge ausmachen können (vgl. Abbildung 125 (Kal Sprötau 6/1974) und Anhang 6). In diesen Bereichen erfolgt lokal eine „ungünstige“ Bewertung. Die lokalen Informationen werden im weiteren Verlauf der Bearbeitung zur weiteren Eingrenzung des Teiluntersuchungsraums herangezogen.

Beispiel 56: Bearbeitung des Indikators 3.1a „Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen“ im Endlagerbereich im Teiluntersuchungsraum 04_11UR des GzME „Saxothuringikum“

Anwendungsbeispiel im GzME „Saxothuringikum“ (04_00UR)

Die geowissenschaftlichen Arbeiten als Grundlage für die Bewertung des Indikators 3.1a der Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG werden für das GzME 009_00TG am Beispiel des Teiluntersuchungsraums 04_11UR gezeigt. Die Bewertung des Indikators 3.1a **„Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich“** des Kriteriums zur Bewertung der „Ermittelbarkeit der relevanten Gesteinstypen und ihrer Eigenschaften im vorgesehenen Endlagerbereich (Anlage 3 zu § 24 Abs. 3 StandAG) ist in Tabelle 47 zusammengefasst. Der Teiluntersuchungsraum 04_11UR wird im Beispiel 49 (Kapitel 5.7.1) beschrieben.

Tabelle 47: Übersicht über die Bewertung des Indikators 3.1a „Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich“ der Anlage (zu § 24 Abs. 3) StandAG des Teiluntersuchungsraums 04_11UR

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße beziehungsweise Indikator des Kriteriums	Bewertung
Ermittelbarkeit der relevanten Gesteinstypen und ihrer Eigenschaften im vorgesehenen Endlagerbereich, insbesondere im vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereich	Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich	Flächendifferenziert: günstig oder ungünstig

Da derzeit keine ortsspezifischen, detaillierten Eigenschaften und Gesteinsparameter für den Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktionaus in den Teiluntersuchungsräumen vorliegen, wird

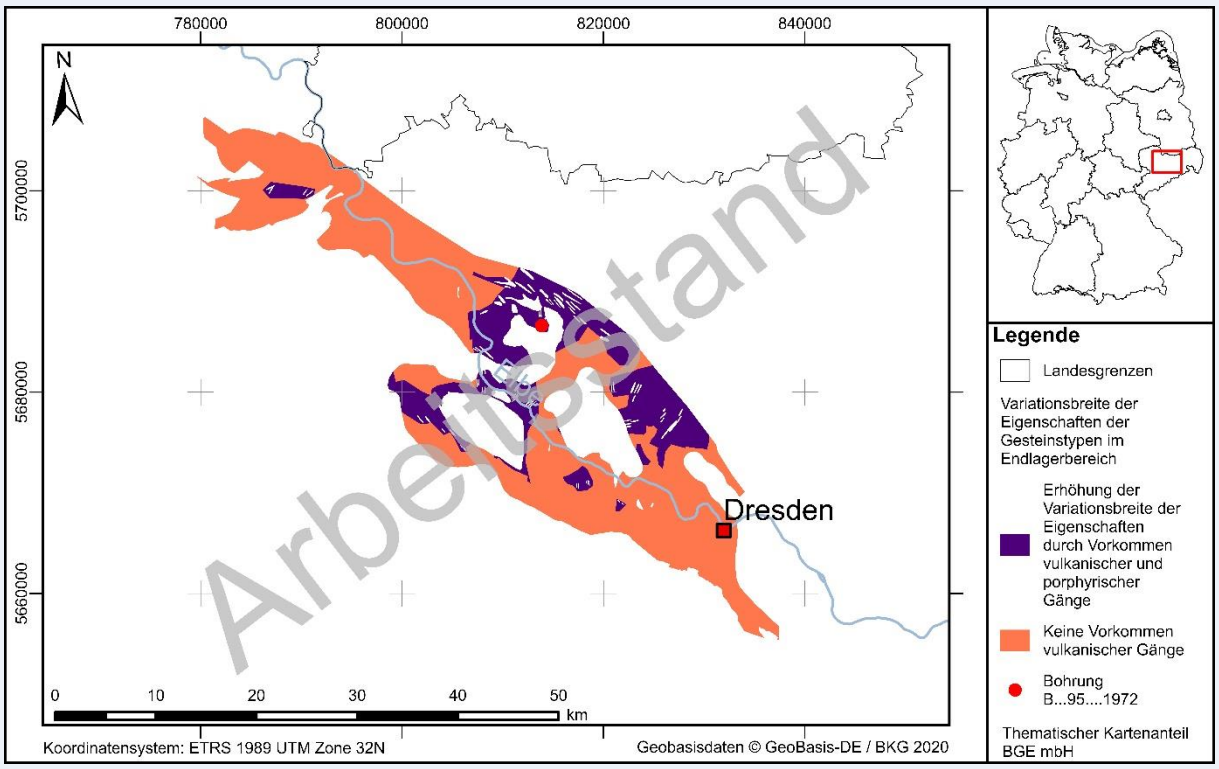
Anwendungsbeispiel im GzME „Saxothuringikum“ (04_00UR)

für die Bewertung der Variationsbreite der Eigenschaften im Schritt 2 der Phase I des Standortauswahlverfahrens auf petrographische Beschreibungen der vorhandenen Gesteinstypen in den Schichtenverzeichnissen der Bohrungen und aus der geowissenschaftlichen Literatur zurückgegriffen, die kristallinen Wirtsgesteinsformationen lithologisch charakterisieren. Die Variationsbreite der Eigenschaften wird bei kristallinen Wirtsgesteinen über geologische Proxies abgeleitet (siehe Tabelle 42). Das Verständnis der spätmagmatischen und/oder postmagmatischen Prozesse bei Plutoniten und der retrogaden Metamorphose- und/oder Deformationsprozesse bei hochgradig regionalmetamorphen Gesteinen erlauben eine qualitative Bewertung von Indikator 3.1a der Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG.

Im Bereich des Teiluntersuchungsraums 04_11UR sind nach GK100 des LfULG vulkanische Gänge und Porphyrstöcke in der Spätphase der magmatischen Aktivität, v. a. im Zentrum, weit verbreitet, die die kristallinen Wirtsgesteine des Meißener Plutons durchschlagen. Das petrographische Schichtenverzeichnis der Bohrung B…95….1972 (Abbildung 121) stammt aus dem zentralen nördlichen Teil des Teiluntersuchungsraums 04_11UR und verdeutlicht diese räumliche Konfiguration der Gesteinskörper (jüngere vulkanische Gänge z. B. aus Dacit und Rhyolith in faziell homogenem Granodiorit) gut. Die vulkanischen Gänge intrudierten in strukturelle Schwächezonen (tiefreichende Störungsysteme) im kristallinen Wirtsgestein in der Elbezone. Dieser intensive spätmagmatische Vulkanismus im Saxothuringikum bildet nicht nur vulkanische Zufuhrkanäle, sondern auch Vorkommen von Ignimbriten (Porphyre), z. B. im Meißener Eruptivkomplex, aus. Die kristallinen Wirtsgesteine im Meißener Pluton stellen dabei die Nebengesteine dieser intensiven vulkanischen Akivität dar und Bereiche um diese vulkanischen Zentren sind als Gebiete mit einer erheblichen Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstpyen anzusehen. Im Zuge der Entwicklung eines vulkanisch angetriebenen hydrothermalen Systems um vulkanische Zentren alterieren die erhitzten hydrothermalen Fluide in Zonen mit höherer Gebirgsdurchlässigkeit auch die kristallinen Wirtsgesteine im Grundgebirge und verändern ihre mineralogische und geochemische Zusammensetzung und damit auch ihre Gesteinsparameter. Die Eigenschaften der Gesteinstypen in unmittelbarer Nähe um vulkanische Einheiten sind dadurch nicht mehr zuverlässig erhebbar.

Die vulkanischen Gänge im Teiluntersuchungsraum 04_11UR wurden auf Grundlage der GK 25 Rasterkarten des LfULG (Ausschnitt siehe Abbildung 120) vektorisiert und bilden die großmaßstäbliche Kartengrundlage für die Ausweisung der Gebiete mit einer erheblichen Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen um vulkanische Einheiten (Abbildung 119).

Anwendungsbeispiel im GzME „Saxothuringikum“ (04_00UR)



Arbeitsstand

Abbildung 119: Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich durch das Vorkommen von vulkanischen Gängen im Teiluntersuchungsraum 04_11UR.
Datengrundlage für die Kartierung der vulkanischen Gänge im Teiluntersuchungsraum 04_11UR sind GK25-Rasterkarten des LfULG.

Anwendungsbeispiel im GzME „Saxothuringikum“ (04_00UR)

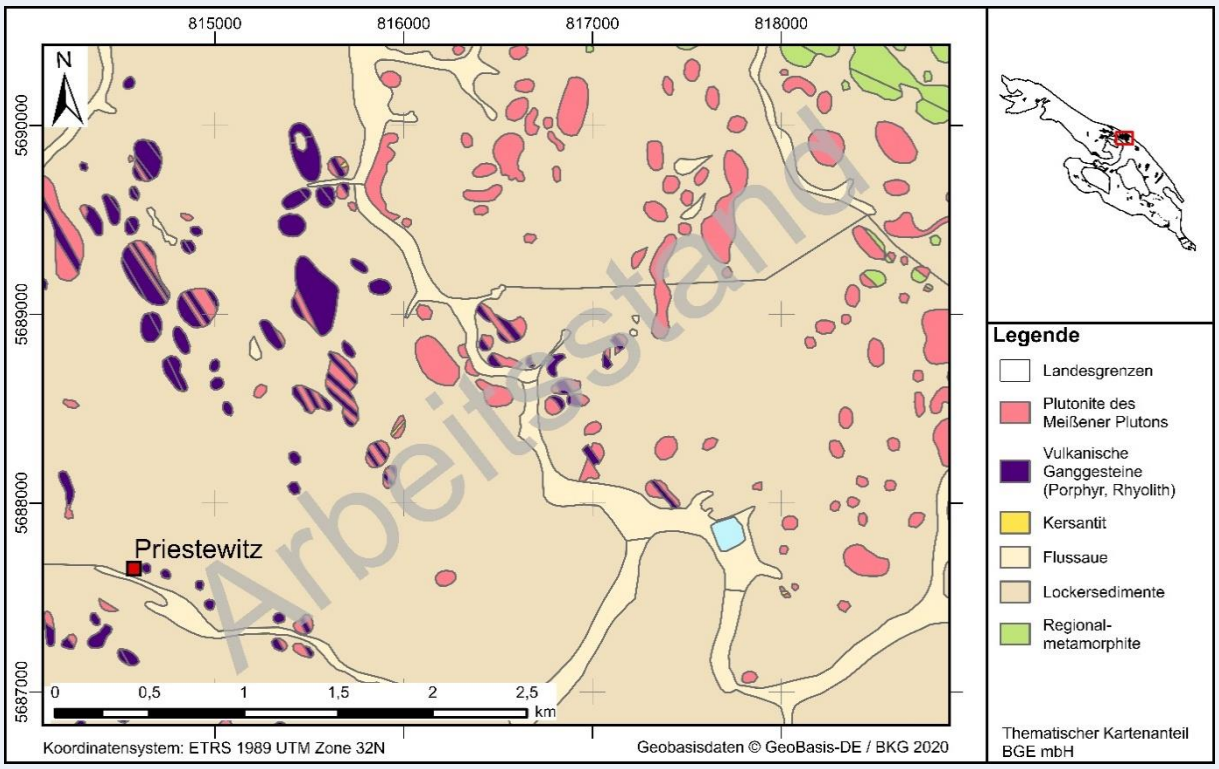


Abbildung 120: Vektorisierter Ausschnitt der GK25 des LfULG (Blatt 4747) im Raum nördlich von Priestewitz mit erkennbaren vulkanischen Ganggesteinen in kristallinen Wirtsgesteinen des Meißener Plutons

Anwendungsbeispiel im GzME „Saxothuringikum“ (04_00UR)

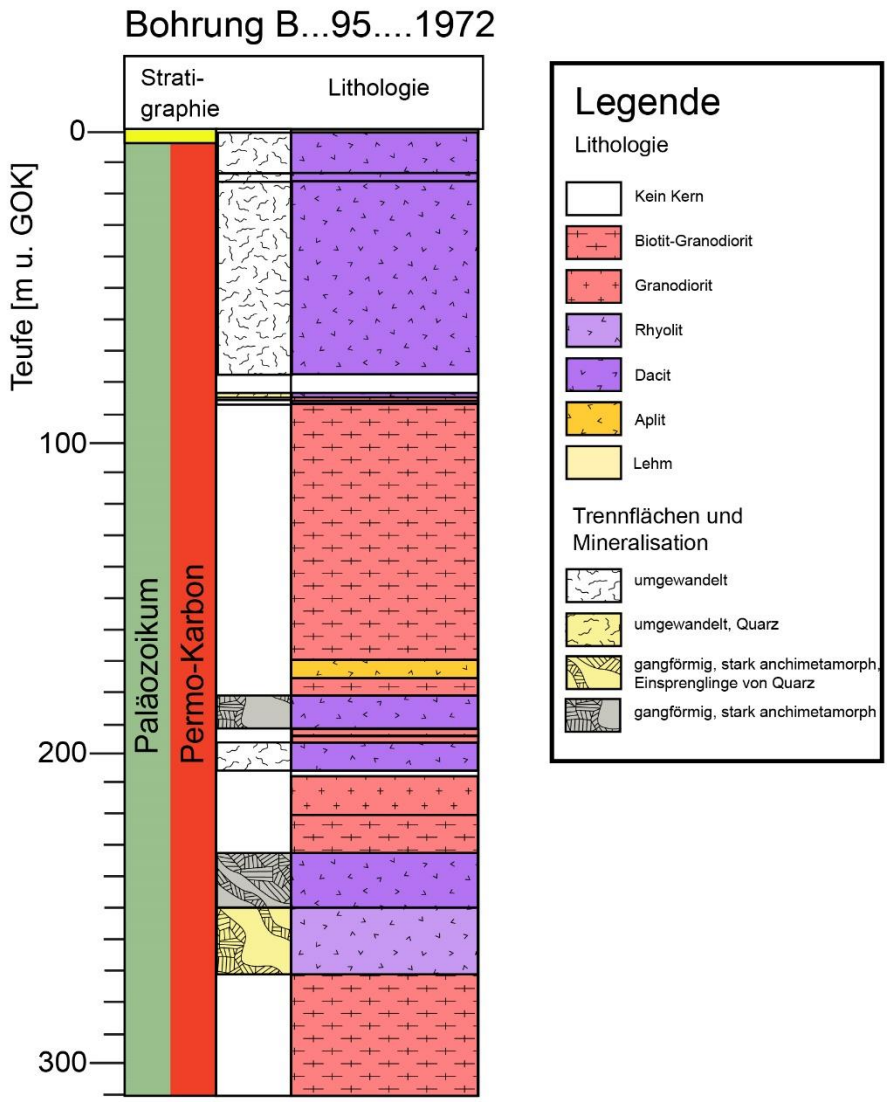


Abbildung 121: Darstellung des petrographischen Schichtenverzeichnisses von Bohrung B…95….1972; vulkanische Einheiten (Rhyolith, gangförmig und Dacit, gangförmig) durchschlagen kristallines Wirtsgestein (Biotit-Granodiorit)

Beispiel 57: Bearbeitung des Indikators 3.1a „Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen“ im Endlagerbereich im GzME „Salzstock Bahlburg“ (02_00UR)

Anwendungsbeispiel im GzME „Salzstock Bahlburg“ (02_00UR)

Die Bewertung des Indikators 3.1a **„Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich“** des Kriteriums zur Bewertung der „Ermittelbarkeit der relevanten Gesteinstypen und ihrer Eigenschaften im vorgesehenen Endlagerbereich, insbesondere im vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereich“ (Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG), ist in Tabelle 48 zusammengefasst. Die Ausarbeitung, die zur Bewertung des Indikators führt, wird im Folgenden gezeigt.

Tabelle 48: Übersicht über die Bewertung des Indikators 3.1a „Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich“ der Anlage (zu § 24 Abs. 3) StandAG des GzME „Salzstock Bahlburg“

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße beziehungsweise Indikator des Kriteriums	Bewertung
Ermittelbarkeit der relevanten Gesteinstypen und ihrer Eigenschaften im vorgesehenen Endlagerbereich, insbesondere im vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereich	Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich	Günstig

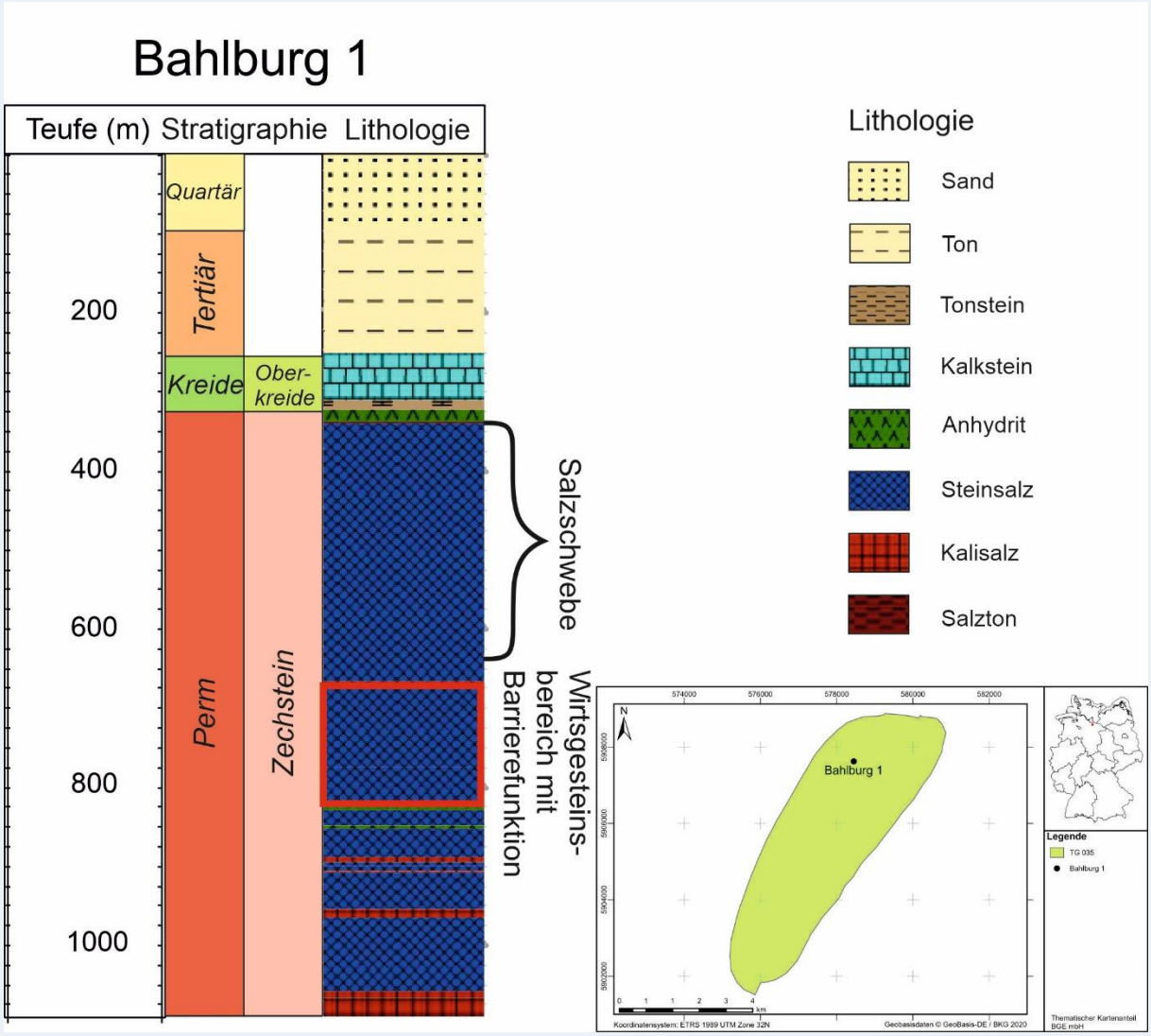
Im Zuge der Genese der Salzstrukturen werden die Steinsalzschichten mobilisiert, zunächst in Salzkissen akkumuliert und durchbrechen, ermöglicht durch tektonische Impulse und/oder Schwächung des Deckgebirges, die auflagernden Gesteinsschichten und steigen Richtung Oberfläche auf. Die Prozesse werden als Halokinese bzw. Halotektonik bezeichnet. Beim Aufstieg werden die Gesteinsabfolgen aus ihrer ursprünglichen Schichtverband gelöst und miteinander verfaltet, teilweise zerblockt und größtenteils steilgestellt. Je nach Komplexität des Internbaus ist der Gesteintyp Steinsalz mehr oder weniger intensiv mit den weiteren Gesteinstypen (Kalisalz, Anhydrit, Tonstein) im Wirtsgesteinsbereich verfaltet. Positiver Effekt der Prozesse kann die Bildung mächtiger Gesteinspakete (Steinsalz) mit weitgehend einheitlichen Gesteinseigenschaften sein. Diese Homogenbereiche sind in Abhängigkeit von der Komplexität der internen Lagerungsverhältnisse überwiegend im Zentralbereich der Salzstöcke zu finden.

Indikator 3.1a wird im Wirtsgestein Steinsalz „in steiler Lagerung“ in der Regel günstig ausfallen. Eine Bewertung erfolgt, wenn möglich, auf Basis vorhandener Daten (Gesteinsbeschrei-

Anwendungsbeispiel im GzME „Salzstock Bahlburg“ (02_00UR)

bungen in Schichtenverzeichnissen oder geophysikalische Bohrlochmessungen). Informationen aus Bohrungen dienen als Positivbeleg. Sollten 100 m Wirtsgestein nicht erbohrt worden sein, bedeutete dies nicht, dass keine entsprechenden Bereiche an anderer Stelle im Teilgebiet vorhanden sind. Das Prozessverständnis des Salzaufstiegs spricht dafür, dass diese Intervalle häufig vorhanden sein werden, auch wenn diese nicht erbohrt wurden.

Die Bohrung Bahlburg 1 (Abbildung 122) zeigt Steinsalzschichten ohne nennenswerte Nebenbestandteile von mehr als 100 m Mächtigkeit. Die randliche Lage der Bohrung Bahlburg 1 in der Salzstruktur wird durch die erbohrten Gesteinsabfolgen bestätigt (Wechsellagerung zwischen Steinsalz, Kalisalz, Anhydrit). Für die zentrale Aufstiegszone der Salzstruktur liegen keine Bohrungsinformationen vor. Es ist realistisch davon auszugehen, dass dort höhere Steinsalzmächtigkeiten erwartet werden können, weshalb der Indikator 3.1a mit „günstig“ bewertet wird.



Anwendungsbeispiel im GzME „Salzstock Bahlburg“ (02_00UR)

Abbildung 122: Bohrung Bahlburg 1 im nördlichen Randbereich des GzME „Salzstock Bahlburg“ mit Informationen zu Stratigraphie und Lithologie. Nach Abzug der 300 m gesetzlich geforderter Salzschwebe verbleiben mehr als 100 m Steinsalzintervall.

5.7.4.3 Indikator 3.1b „Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften“

Der Indikator „Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften“ bewertet die räumliche Verteilung der Gesteinstypen und ihrer für die Abwägung relevanten Eigenschaften im Endlagerbereich, insbesondere dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich. Die Gesteinstypen und ihre charakteristischen Eigenschaften sollten räumlich möglichst gleichmäßig verteilt sein (AkEnd 2002). Für den Indikator erfolgt die Bewertung der Gebiete anhand der in Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG angegebenen Wertungsgruppen, wie in Tabelle 41 aufgeführt.

Bewertungsgrundlage für den Indikator sind die repräsentativen Profile (siehe Kapitel 5.7.1) und die darin ausgewiesenen Gesteinstypen. Ein Gesteinstyp ist ein in sich überwiegend ähnlich zusammengesetztes Gestein, das durch charakteristische, lithologisch bedingte Eigenschaften definiert ist (BGE 2018a). Zur Abgrenzung der Gesteinstypen einer Abfolge werden in erster Näherung die Angaben aus den Schichtenverzeichnissen herangezogen, gegebenenfalls mit einer Präzisierung durch bohrlochgeophysikalische Messungen (Logs). Ziel ist eine Aussage zur räumlichen Verteilung der Gesteinstypen und ihrer Eigenschaften sowie der Korrelierbarkeit und deren Ungewissheiten zu treffen. Die Bewertung der räumlichen Verteilung macht eine dreidimensionale Betrachtung notwendig. Der Betrachtungsmaßstab umfasst mindestens 100 m in vertikaler Richtung und den Mindestflächenbedarf gemäß BT-Drs. 18/11398 in lateraler Richtung (für Steinsalz 3 km², für Kristallin 6 km² und für Tongestein 10 km²). Bewertungsrelevante Eigenschaften des Indikators sind u. a. lithologische Änderungen innerhalb der Wirtsgesteinsformation sowie Ausbildung und Verlauf der Trennflächen zwischen den einzelnen Gesteinstypen.

Um eine auf alle geologischen Räume übertragbare Methodik zur Bewertung der räumlichen Verteilung von Gesteinstypen und ihrer Eigenschaften im Endlagerbereich entwickeln zu können, muss zunächst die vorliegende Datenlage betrachtet werden. Zum jetzigen Zeitpunkt des Verfahrens zur Ermittlung von Standortregionen stehen nicht immer ortsbezogenen Daten zur Verfügung, dementsprechend basiert eine Bewertung auch auf Literaturangaben in Verbindung mit georeferenzierten geologischen Karten und verfügbaren Bohrdaten. Hierdurch werden mit Hilfe fachlicher Beschreibungen Wirtsgesteinsformationen aufgrund ihrer Ausprägung hinsichtlich ihrer Eigenschaften vergleichbar bewertet.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

5.7.4.4 Beispiele zur Bearbeitung des Indikators 3.1b „Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften“

Die Vorgehensweise bei der Bewertung des Indikators „Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften“ wird im Folgenden anhand der Anwendungsbeispiele GzME „Opalinuston“ (Beispiel 58) für das Wirtsgestein Tongestein, GzME „Thüringer Becken“ (

Beispiel 59) für das Wirtsgestein Steinsalz flach und GzME „Saxothuringikum“ (Beispiel 60) für das kristalline Wirtsgestein näher erläutert.

Beispiel 58: Bearbeitung des Indikators 3.1b „Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften“ im Teiluntersuchungsraum 01_07UR im GzME „Opalinuston“

Anwendungsbeispiel im GzME „Opalinuston“ (01_00UR)

Die geowissenschaftlichen Arbeiten als Grundlage für die Bewertung des Indikators 3.1b „**Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften**“ des Kriteriums zur Bewertung der „Ermittelbarkeit der relevanten Gesteinstypen und ihrer Eigenschaften im vorgesehenen Endlagerbereich, insbesondere im vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereich“ (Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG) werden für das GzME „Opalinuston“ am Beispiel des Teiluntersuchungsraums 01_07UR gezeigt. Dieser Teiluntersuchungsraum wird in den Kapiteln 5.6.1 und 5.7.2 ausführlich beschrieben.

Die Bewertung des Indikators 3.1b „Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften“ ist in Tabelle 49 zusammengefasst. Die Ausarbeitung, die zur Bewertung des Indikators führt, wird im Folgenden gezeigt.

Tabelle 49: Übersicht über die Bewertung des Indikators 3.1b „Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften“ der Anlage 3 zu § 24 StandAG für 01_07UR im GzME „Opalinuston“

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße beziehungsweise Indikator des Kriteriums	Bewertung
Ermittelbarkeit der Gesteinstypen und ihre charakteristischen Eigenschaften im vorgesehenen Endlagerbereich, insbesondere im vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereich	Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften	Flächendifferenziert: Im Bereich der Uracher Tuffschlote „ungünstig“, sonst „günstig“

Anwendungsbeispiel im GzME „Opalinuston“ (01_00UR)

Die räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Teiluntersuchungsraum soll mithilfe von Korrelationen erfolgen, um lithologische Veränderungen innerhalb der Abfolge im Raum zu bewerten. In der Abfolge der Opalinuston-Formation ist im Teiluntersuchungsraum 01_07UR zu beobachten, dass zum Hangenden, d. h. zur Zillhausen-Subformation, der Anteil an gröberklastischen Lithologien zunimmt. Die räumliche Bewertung berücksichtigt den wirtsgesteinsspezifischen Flächenbedarf für das Endlagerbergwerk (Mindestanforderung Flächenbedarf; für Tongestein 10 km²).

In Abbildung 123 ist beispielhaft eine räumliche Korrelation von Bohrungen im GzME „Opalinuston“ dargestellt. Die Teufelsloch-Subformation zeichnet sich durch eine sehr geringe lithologische räumliche Variabilität aus, was durch die vorhandenen bohrlochgeophysikalischen Daten bestätigt wird. Die Korrelation zeigt, dass in allen Profilen der Tongehalt zur Zillhausen-Subformation abnimmt, entsprechend die Lithologien grobklastischer werden. Die Zillhausen-Subformation ist im Teiluntersuchungsraum 01_07UR etwa 30 m bis 50 m mächtig und besteht aus feinsandigen Tonsteinen bis Tonmergelsteinen mit Kalksandstein- und sandigen Kalksteinbänken im oberen Teil. Das Einsetzen der Zillhausen-Subformation lässt sich an der Basis durch den Übergang zu den sehr sandarmen Schichten der Teufelsloch-Subformation abgrenzen (Abbildung 123; Franz & Nitsch 2009). Die Abfolgen der Zillhausen-Subformation werden nach Osten hin gröber und es lassen sich diskrete Lagen gröberen Materials identifizieren (Abbildung 123). Diese werden in Franz & Nitsch (2009) in vier Leithorizonte aus Sandstein- oder Kalksteinbänken unterschieden, zwischen denen schluffige bis teilweise sandige Tonsteine bis Tonmergelsteine liegen. Diese Leithorizonte werden als Wasserfallschichten, Belemnitenbrekzie, Costosumbank und Zopfplatten bezeichnet (Franz & Nitsch 2009).

Anwendungsbeispiel im GzME „Opalinuston“ (01_00UR)

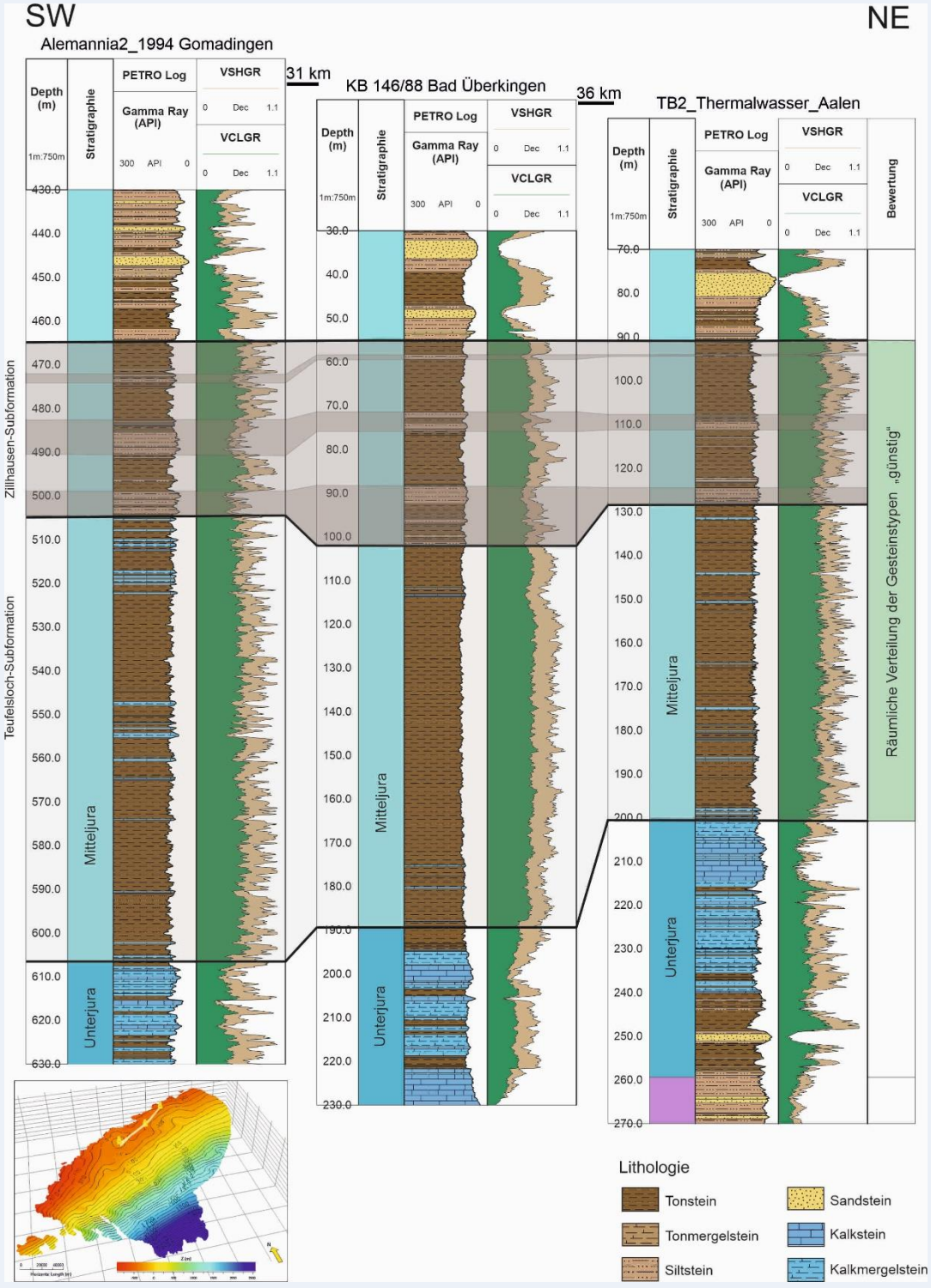


Abbildung 123: Räumliche Korrelation von Bohrungen im GzME „Opalinuston“

Anwendungsbeispiel im GzME „Opalinuston“ (01_00UR)

Zusätzlich zu den oben beschriebenen ablagerungsbedingten lithologische Änderungen, treten im Bereich des Urach Tuffschlote auf, die unter anderem in (Schreiber & Jentzsch 2021) beschrieben sind. Das miozäne Vulkanfeld des Urach befindet sich im nordwestlichen Bereich des Teiluntersuchungsraums 01_07UR (Abbildung 124). Es nimmt eine Fläche von ca. 1.600 km² ein, auf der mehr als 350 Maar-Diatrem-Vulkane kartiert wurden (Mäussnest 1974a, 1974b). Sie haben im Miozän (17 – 11 Ma vor heute, Lippolt et al. 1973; Kröchert et al. 2009) die mesozoische Schichtenfolge der Schwäbischen Alb durchschlagen. Im Bereich dieses Vorkommens kann nicht von einer günstigen räumlichen Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften ausgegangen werden, da das Auftreten dieser Schlote im Untergrund keinem regelmäßigen Muster folgt und damit als diskontinuierliche, nicht ausreichend genau vorhersagbare räumliche Veränderung im gesamten Endlagerbereich gelten muss.

Aufgrund der Vorkommen der Urach-Vulkanite im Teiluntersuchungsraum 01_07UR ist für den Indikator 3.1b eine flächendifferenzierte Bewertung vorzunehmen. Während im Bereich der Urach-Vulkanite (Abbildung 124) eine ungünstige Bewertung vorliegt, da das Vorkommen der Vulkanite keinem vorhersagbarem Muster folgt, ist der lithologische Trend in der Abfolgen innerhalb der Opalinuston-Formation im übrigen Teil des Teiluntersuchungsraums 01_07UR gleichmäßig und damit als „günstig“ zu bewerten.

Anwendungsbeispiel im GzME „Opalinuston“ (01_00UR)

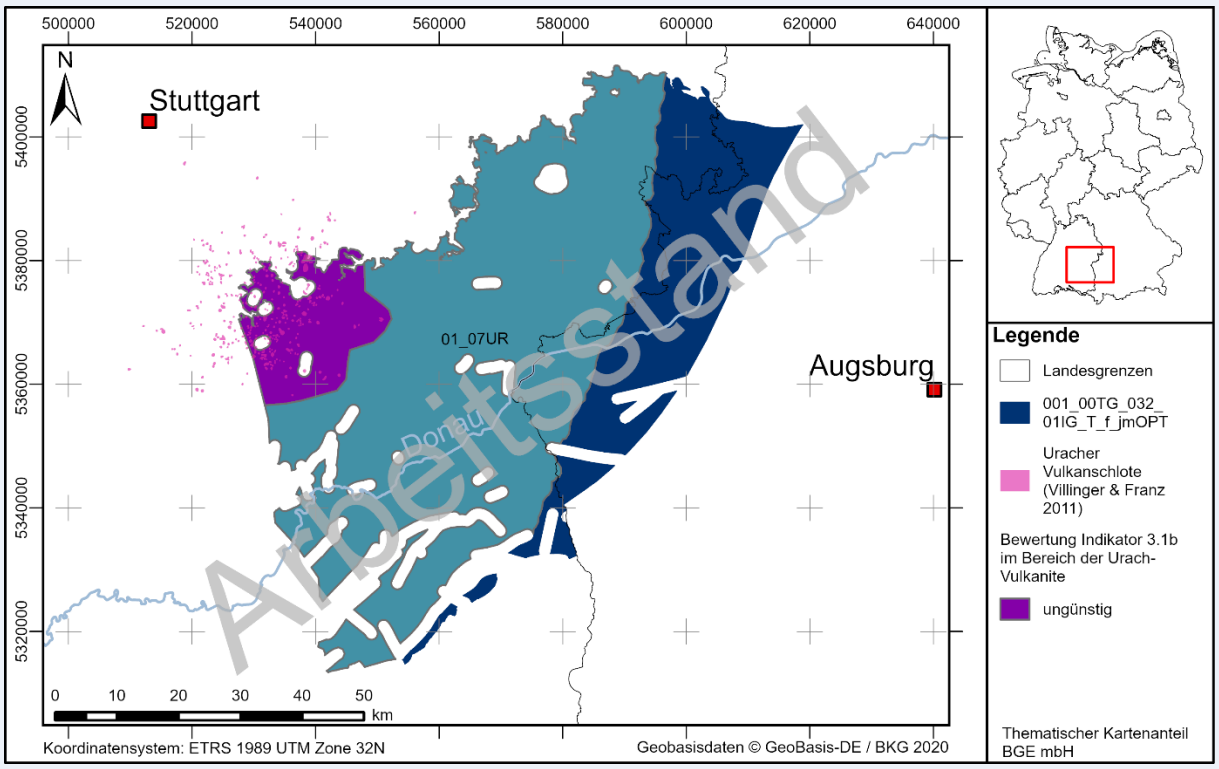


Abbildung 124: Bewertung des Indikators 3.1b „Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften“ im Teiluntersuchungsraum 01_07UR (Lage der Vulkanschlote aus Villinger & Franz 2011)

Beispiel 59: Bearbeitung des Indikators 3.1b „Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften“ im Teiluntersuchungsraum 03_21UR im GzME „Thüringer Becken“ (03_00UR)

Anwendungsbeispiel im GzME „Thüringer Becken“ (03_00UR)

Die geowissenschaftlichen Arbeiten als Grundlage für die Bewertung des Indikators 3.1b der Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG werden für das GzME „Thüringer Becken“ am Beispiel des Teiluntersuchungsraums 03_21UR gezeigt. Dieser Teiluntersuchungsraum wird in den Kapiteln 5.6.1 und 5.7.2 ausführlich beschrieben.

Die Bewertung des Indikators 3.1b „Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften“ des Kriteriums zur Bewertung der „Ermittelbarkeit der relevanten Gesteinstypen und ihrer Eigenschaften im vorgesehenen Endlagerbereich, insbesondere im vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereich“ (Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG)

Anwendungsbeispiel im GzME „Thüringer Becken“ (03_00UR)

ist in Tabelle 50 zusammengefasst. Die Ausarbeitung, die zur Bewertung des Indikators führt, wird im Folgenden gezeigt.

Tabelle 50: Übersicht über die Bewertung des Indikators 3.1b „Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften“ der Anlage 3 (zu § 24) StandAG für 03_21UR im GzME „Thüringer Becken“

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße beziehungsweise Indikator des Kriteriums	Bewertung
Ermittelbarkeit der Gesteinstypen und ihre charakteristischen Eigenschaften im vorgesehenen Endlagerbereich, insbesondere im vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereich	Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften	günstig

Steinsalz in stratiformer Lagerung im Zechstein im Thüringer Becken zeichnet sich dadurch aus, dass laterale lithologische Änderungen nicht oder nur in sehr geringem Maße auftreten. Hier kann überwiegend von einer lateralen Gleichförmigkeit im gesamten Thüringer Becken ausgegangen werden, was eine starke positive Eigenschaft des Steinsalzes in stratiformer Lagerung darstellt.

Die räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Teiluntersuchungsraum soll mithilfe von Korrelationen dargestellt werden, um lithologische Veränderungen innerhalb der Abfolge im Raum zu bewerten. In der Abfolge des Staßfurt-Steinsalzes ist im Teiluntersuchungsraum 03_21UR zu beobachten, dass eine Unterteilung des Staßfurt-Steinsalzes in eine heterogene hangende Abfolge und eine homogene liegende Abfolge des Staßfurt-Steinsalz erfolgen kann, wobei sich letztere als potenzieller einschlusswirksamer Gebirgsbereich eignet (Abbildung 125). Dies ist in allen Profilen zu beobachten, womit es keine auffälligen lithologischen Veränderungen innerhalb der Wirtsgesteinsformation im Raum gibt. Die räumliche Bewertung berücksichtigt den wirtsgesteinsspezifischen Flächenbedarf für das Endlagerbergwerk (Mindestanforderung Flächenbedarf; für Steinsalz 3 km²). Die Bewertung des Indikators 3.1b „Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften“ (Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG) ist damit für den Teiluntersuchungsraum 03_21UR mit „günstig“ zu bewerten.

Anwendungsbeispiel im GzME „Thüringer Becken“ (03_00UR)

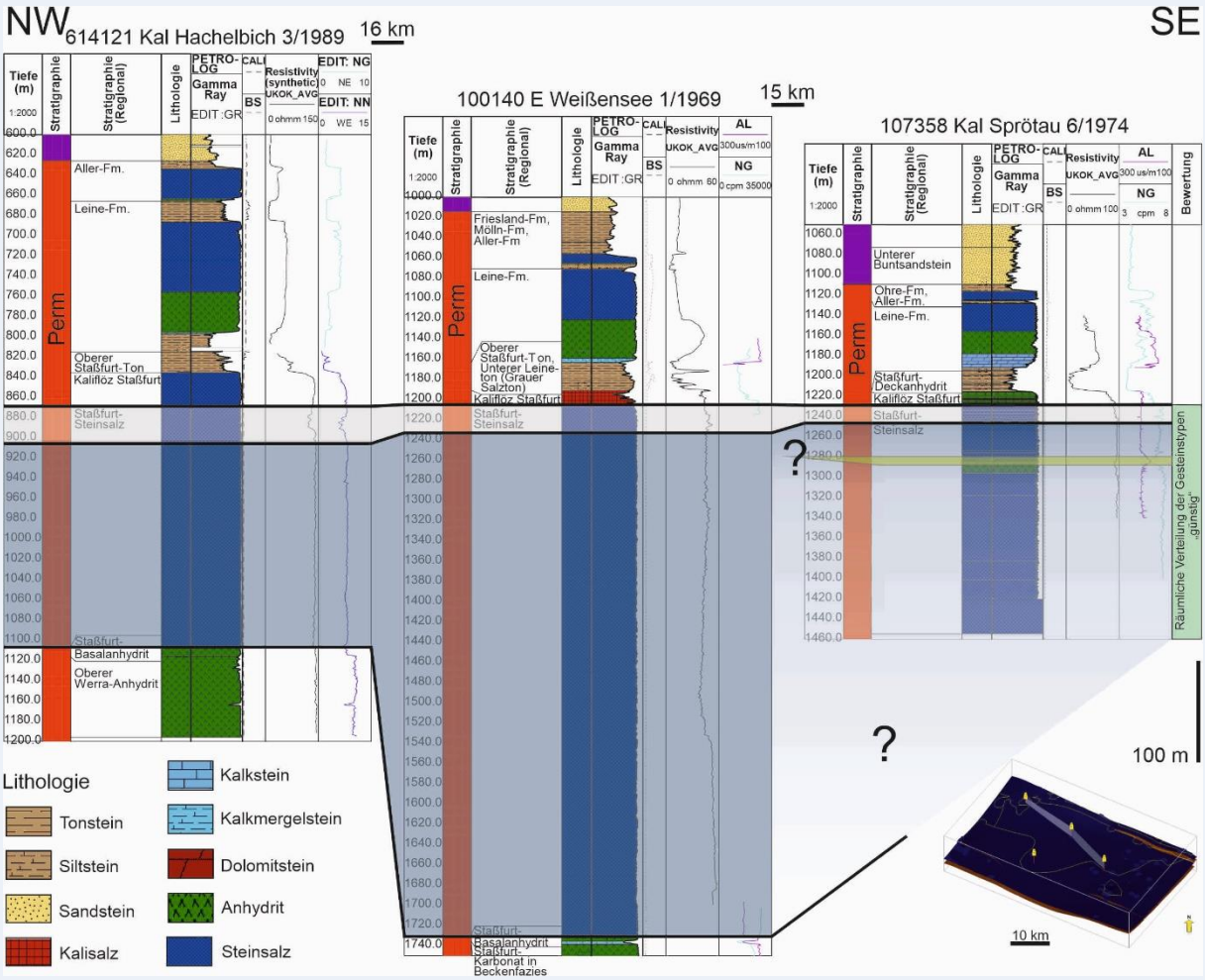


Abbildung 125: Räumliche Korrelation der repräsentativen Profile im Teiluntersuchungsraum 03_21UR im GzME „Thüringer Becken“.
Der untere blau hinterlegte Bereich im Staßfurt-Steinsalz definiert eine homogene Steinsalz-Abfolge, im oberen grau markierten Bereich weisen die bohrlochgeophysikalischen Daten auf eine Verunreinigung der Abfolge hin.

Beispiel 60: Bearbeitung des Indikators 3.1b „Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften“ im Teiluntersuchungsraum 04_11UR des GzME „Saxothuringikum“ (04_00UR)

Anwendungsbeispiel im GzME „Saxothuringikum“ (04_00UR)

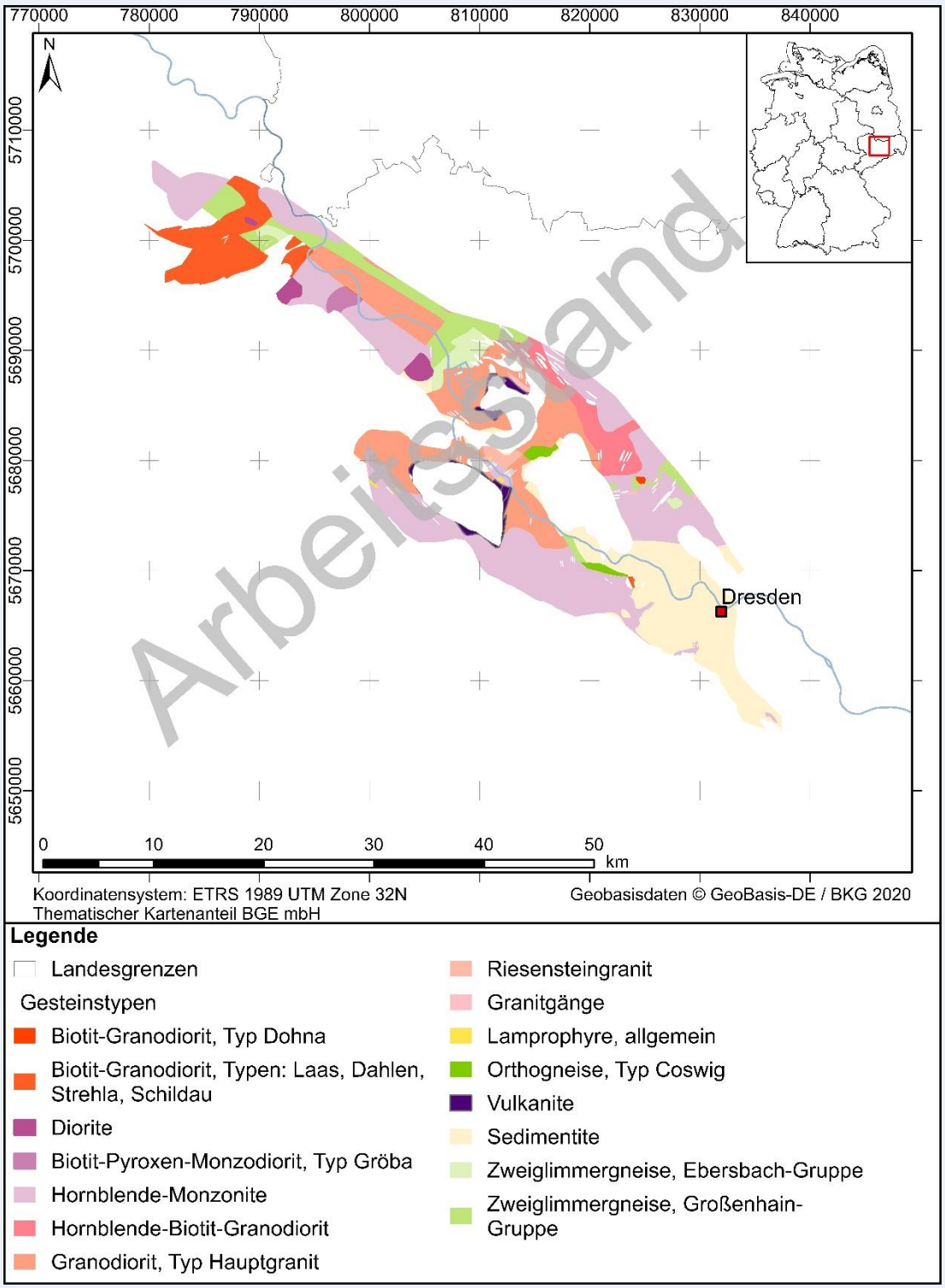
Die zusammenfassende Bewertung des Indikators 3.1b „**Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften**“ nach Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG für den Teiluntersuchungsraum 04_11UR im GzME „Saxothuringikum“ ist in Tabelle 51 dargestellt.

Im großflächigen Teiluntersuchungsraum 04_11UR kommen viele kristalline Wirtsgesteinstypen vor: Granodiorit, Granit, Monzodiorit, Monzonit, Quarzmonzonit, Amphibol-Quarz-Monzonit, Diorit, Amphibolit, Quarzit, Augengneis und Zweiglimmer-Gneis (Abbildung 126).

Tabelle 51: Übersicht über die Bewertung des Indikators 3.1b „Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften“ der Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG für den Teiluntersuchungsraum 04_11UR

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße beziehungsweise Indikator des Kriteriums	Bewertung
Ermittelbarkeit der Gesteinstypen und ihre charakteristischen Eigenschaften im vorgesehenen Endlagerbereich, insbesondere im vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereich	Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften	Flächendifferenziert: günstig oder bedingt günstig und ungünstig

Anwendungsbeispiel im GzME „Saxothuringikum“ (04_00UR)



Arbeitsstand

Abbildung 126: Vereinfachte geologische Karte mit verschiedenen Gesteinstypen im Teiluntersuchungsraum 04_11UR

Anwendungsbeispiel im GzME „Saxothuringikum“ (04_00UR)

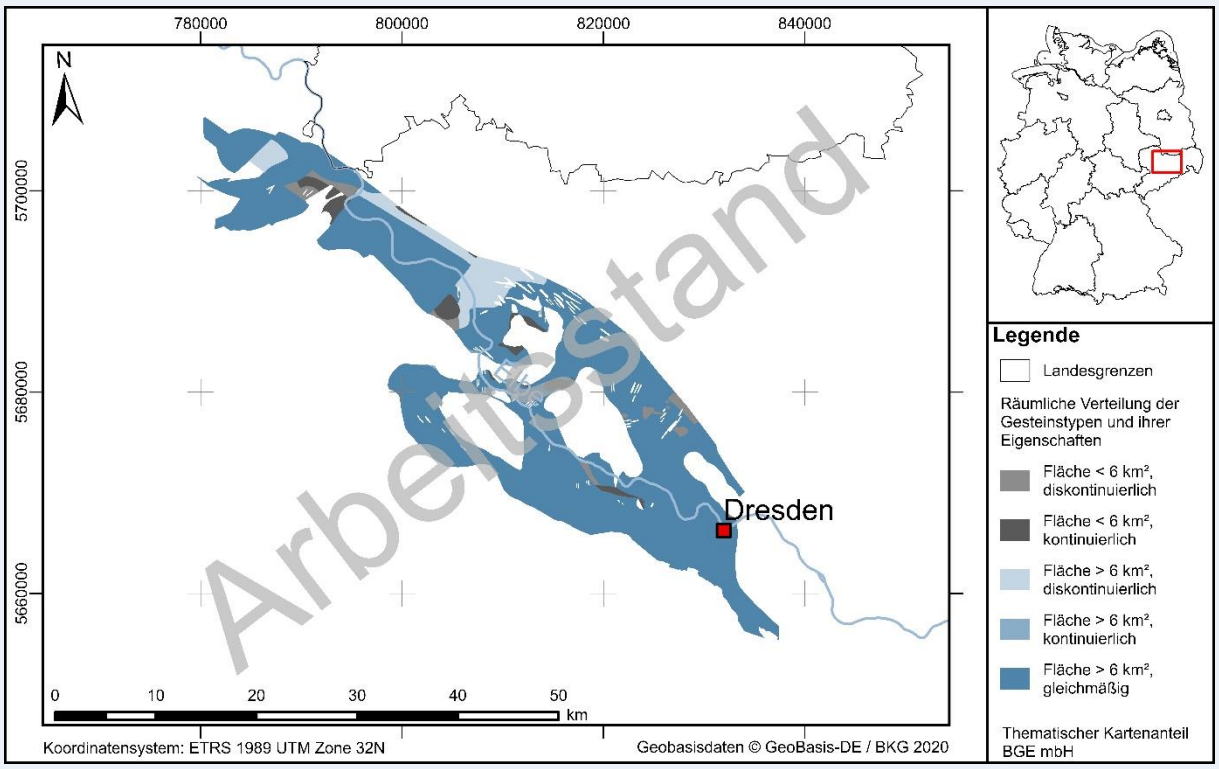
Die Plutonite des Meißener Plutons (Hornblende-Monzonite, Hornblende-Biotit-Granodiorite, Granodiorite Typ Hauptgranit und Riesenteingranit, siehe Abbildung 126) sind aushaltend großflächige (größer als 6 km^2) homogene intrusive Gesteinstypen deren Vorkommen gleichmäßig und bekannt sind; Bereiche mit diesen variszischen plutonischen Gesteinstypen werden als „günstig“ bewertet.

Hochgradig regionalmetamorphe Gesteine wie die Paragneise der Ebersbacher und Großenhainer Gruppe zeigen einen komplexen Gesteinsaufbau (z. T. Paragneise mit Kalksilikatgesteinen und Amphiboliten) mit kontinuierlichen, aber bekannten räumlichen Veränderungen; Bereiche mit Paragneisen der Großenhainer und Ebersbacher Gruppe (Abbildung 126) über 6 km² Mindestfläche werden als „bedingt günstig“ bewertet. Bereiche mit Gesteinstypen der Ebersbacher und Großenhainer Gruppe mit Flächenausdehnungen unter 6 km² sind jedoch gemäß dem Indikator „Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften“ nach Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG als „ungünstig“ zu bewerten.

Cadomische Granodiorite, wie der Granodiorit vom Typ Laas, und auch Augengneise, wie der „Pluton von Coswig“, werden im Bereich des Meißener Plutons und der Elbezone als z. T. kataklastisch deformiert beschrieben. Die räumlichen Veränderungen der cadomischen Gesteinstypen und ihrer Eigenschaften sind jedoch bekannt und kartiert und können als kontinuierlich angesehen werden. Somit werden diese Flächen als „bedingt günstig“ bewertet.

Abbildung 127 zeigt die Auswertung der räumlichen Verteilung der Gesteinstypen und ihrer Eigenschaften im Teiluntersuchungsraum 04_11UR.

Anwendungsbeispiel im GzME „Saxothuringikum“ (04_00UR)



Arbeitsstand

Abbildung 127: Darstellung der räumlichen Verteilung der Gesteinstypen und ihrer Eigenschaften im Teiluntersuchungsraum 04_11UR

Beispiel 61: Bearbeitung des Indikators 3.1b „Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften“ im GzME „Salzstock Bahlburg“ (02_00UR)

Anwendungsbeispiel im GzME „Salzstock Bahlburg“ (02_00UR)

Die zusammenfassende Bewertung des Indikators „**Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften**“ nach Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG für das GzME „Salzstock Bahlburg“ ist in Tabelle 52 dargestellt. Dieser Indikator wird maßgeblich durch den unbekannten Internbau der Salzstrukturen kontrolliert. Zur Prognose des Internbaus und eines favorisierten homogenen, mächtigen Steinsalzkerns wird aktuell ein Verfahren entwickelt. Daher gilt zu beachten, dass die Bewertung vorläufig anhand der Internbautypen der InSpEE-Studie (von Goerne et al. 2016) erfolgt und eine abschließende Bewertung des Indikators für den Schritt 2 der Phase I erst nach der Entwicklung einer Internbauprognose erfolgen kann.

Anwendungsbeispiel im GzME „Salzstock Bahlburg“ (02_00UR)

Tabelle 52: Übersicht über die vorläufige Bewertung des Indikators „Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften“ der Anlage 3 (zu § 24) StandAG für das GzME „Salzstock Bahlburg“

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße beziehungsweise Indikator des Kriteriums	Vorläufige Bewertung
Ermittelbarkeit der Gesteinstypen und ihre charakteristischen Eigenschaften im vorgesehenen Endlagerbereich, insbesondere im vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereich	Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften	günstig

Der Indikator bewertet die Verteilung verschiedener Gesteinstypen innerhalb des „vorgesehenen Endlagerbereichs, insbesondere im vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereich“. Den Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion stellt im Wirtsgestein Steinsalz „in steiler Lagerung“ eine mächtige Steinsalzschicht dar, die den künftigen einschlusswirksamen Gebirgsbereich aufnehmen wird. Außerhalb des Wirtsgesteinsbereichs mit Barrierefunktion treten weitere Gesteinstypen in Form von geringmächtigen Steinsalzabfolgen sowie Anhydrit oder Kalisalzen auf.

Der Hauptteil der Staßfurt-Formation wird durch das Hauptsalz ohne nennenswerte Beimengungen aufgebaut. Diese Steinssalzpartie ist besonders mächtig, homogen und rein. Einzig an der Basis (v. a. Karbonat/Anhydrit, nicht am Salzaufstieg beteiligt) und am Top (u. a. Kieseritische Übergangschichten und Kaliflöz Staßfurt) der Staßfurt-Formation kommen ungeeignete Bestandteile vor. In den Leine- und Aller-Formation kommen auch Steinsalzabfolgen vor, die aber im Vergleich zur Staßfurt-Formation geringere Mächtigkeiten und vermehrte Zwischenschichten (Kalisalz und Anhydrit) zeigen und damit vorraussichtlich weniger endlagergeeignet sind.

Die Abfolgen des Zechstein sind in Abbildung 71 in Kapitel 5.2.2, dargestellt. Der Grenzbereich zwischen der Staßfurt- und Leine-/Aller-Formation definiert näherungsweise auch die erwartete Form der geologischen Barriere im Wirtsgesteinsbereich und damit eines möglichen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs. Der Grenzverlauf ist stark durch den Internbau der Salzstruktur geprägt. Je komplexer der Internbau einer Salzstruktur, desto komplexer wird die Außengrenze der geologischen Barriere im Wirtsgesteinsbereich.

Anwendungsbeispiel im GzME „Salzstock Bahlburg“ (02_00UR)

Die Bohrungsdaten innerhalb des Teilgebiets, die den Salzstock erreichen, zeigen Abfolgen von Salz mit Einschaltungen von Anhydrit, Kalisalz und Salzton. Es bleibt jedoch zu beachten,dass die Bohrungen eher im Randbereich der zentralen Aufstiegszone lokalisiert sind (Abbildung 128). Es wird angenommen, dass im Zentralbereich der Salzstruktur höhere Steinsalzmächtigkeiten vorhanden sind (beispielhaft und schematisch in Abbildung 94 dargestellt). Bohrungen spiegeln die geologischen Verhältnisse an einem konkreten Punkt wider. Durch die Verfaltung der primären Gesteinsabfolgen während des Salzaufstiegs lässt sich eine Interpolation zwischen zwei Bohrungen nicht belastbar durchführen. Daher stellt die Beschreibung des Internbaus von Salzstrukturen eine besondere Herausforderung dar.

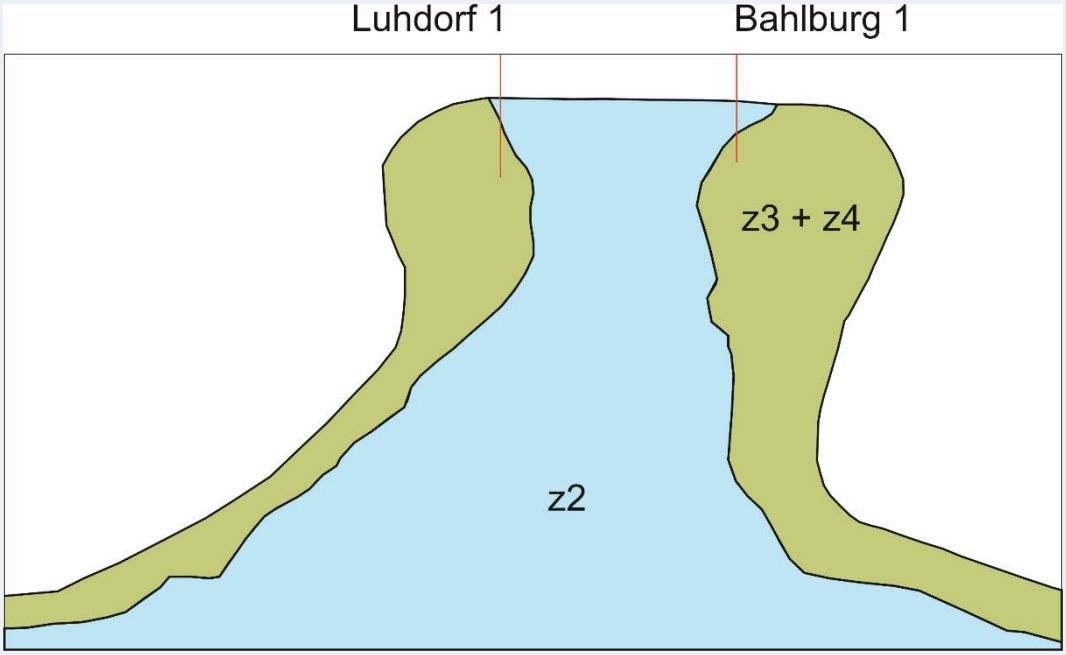


Abbildung 128: Schematische Platzierung der Bohrungen Luhdorf 1 und Bahlburg 1 im Randbereich der Hauptaufstiegzone nach von Goerne et al. (2016)

Aufgrund dieser Wissenslücke ist es notwendig, eine Prognosemöglichkeit für die Komplexität der Internstruktur zu ermitteln. In den InSpEE- und InSpEE-DS-Studien der BGR (von Goerne et al. 2016; Fleig & Röhling 2019) wurden bereits Kategorien von Internbautypen gebildet und sämtliche Salzstrukturen des Norddeutschen Beckens zugeordnet. In dieser Kategorisierung fällt das GzME „Salzstock Bahlburg“ in den Internbautyp 3 „Diapir“, der eine weniger komplexe Internbaustruktur erwarten lässt.

Abbildung 129 zeigt die Bohrungen innerhalb der Salzstruktur Bahlburg. Die Bohrungen Bahlburg 1 und Luhdorf-1 bestätigen, dass es – trotz ihrer Lage im Randbereich der Salzstruktur – neben der gesetzlich geforderten 300 m Salzschwebe ausreichend Steinsalz gibt, um potenziell einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich auszuweisen. Die Bohrung Garlstorf Z1 liegt außerhalb des Teilgebietes, beinhaltet jedoch wichtige Informationen bezüglich des generellen

Anwendungsbeispiel im GzME „Salzstock Bahlburg“ (02_00UR)

Eignungspotenzials der Salzstruktur: Es werden mächtige Steinsalzintervalle mit wenigen Zwischenlagen angetroffen, was für eine Salzstruktur des InSpEE-Internbautyps 3 „Diapir“ für den Zentralbereich erwartet wird. Die verfügbaren Daten bestätigen für die Salzstruktur Bahlburg die Einteilung nach InSpEE (von Goerne et al. 2016). Daher wird der Indikator 3.1b für das GzME „Salzstock Bahlburg“ als „günstig“ bewertet.

Im Rahmen der Arbeiten zu Schritt 2 der Phase I soll die bestehende Kategorisierung nach InSpEE und InSpEE-DS weiterentwickelt werden. Der methodische Ansatz dazu wird in Kapitel 5.2 vorgestellt. Basierend auf den Ergebnissen dieser Arbeiten sollen die Kategorisierungen überprüft und gegebenenfalls verfeinert werden. Diese Arbeiten sind eine wichtige Grundlage, um die Bewertungen des Indikators 3.1b für den Schritt 2 der Phase I durchzuführen. Eine Einteilung der Salzstrukturen nach InSpEE-Internbautypen geschieht bis dahin vorläufig.

Anwendungsbeispiel im GzME „Salzstock Bahlburg“ (02_00UR)

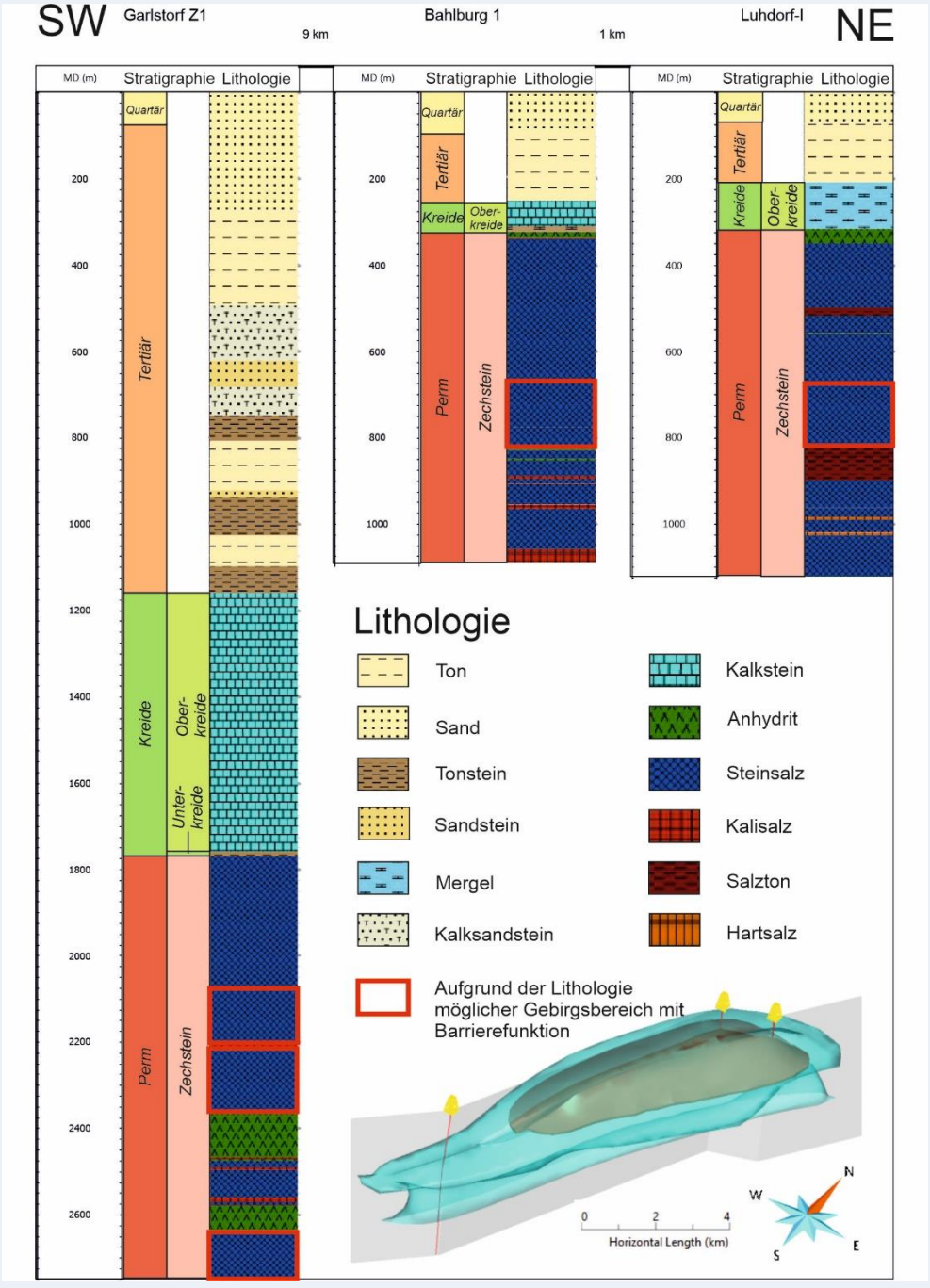


Abbildung 129: Bohrungskorrelation innerhalb der Salzstruktur Bahlburg. Bohrung Garlstorf Z1 zeigt mehrere Steinsalzintervalle, die aufgrund der Lithologie als einschlusswirksamer Gebirgsbereich möglich wären (in diesem Fall jedoch tiefer als der Betrachtungshorizont bis 1500 m u. GOK). Bahlburg 1 und Luhdorf-1 zeigen ebenfalls mögliche Steinsalzschichten, in denen ein einschlusswirksamer Gebirgsbereich möglich wäre.

5.7.4.5 Indikator 3.1 c „Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit“

„*Der Indikator „Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit“ bewertet das Vorhandensein von Störungen und deren Abstand zum einschlusswirksamen Gebirgsbereich sowie das Vorhandensein von Flexuren und Falten*“ (Alfarra et al. 2020b, S. 147). Der Gesteinsverband des Endlagerbereiches und des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs soll eine möglichst geringe tektonische Überprägung aufweisen. Nach der Begründung des Gesetzentwurfes aus dem Jahr 2017 (BT-Drs. 18/11398, S. 75) wird das Ausmaß der Überprägung abgeleitet aus den Lagerungsverhältnissen unter Berücksichtigung von Bruch- und Faltentektonik. Für den Indikator erfolgt die Bewertung der identifizierten Gebiete anhand der in Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG angegebenen Wertungsgruppen, wie in Tabelle 41 aufgeführt.

Im Rahmen der vorläufigen Sicherheitsuntersuchung in Schritt 2 Phase I im Standortauswahlverfahrens ist es bei der Bewertung des „Ausmaßes der tektonischen Überprägung“ sinnvoll, den Fokus auf die geologische Gesamtsituation zu legen und nicht nur auf eine isolierte Bewertung einzelner Störungen. Hierfür ist eine möglichst vollständige strukturgeologische Beschreibung und Interpretation des Gebietes sowie eine Bewertung hinsichtlich der Qualität der zugrundeliegenden Datensätze Voraussetzung. Um den in Schritt 1 Phase I nicht im Detail bekannten internen strukturgeologischen Bau des Gesteinsverbands zu bewerten, kann der Indikator tektonische Überprägung in verschiedenen Maßstäben mithilfe von drei strukturgeologisch relevanten Komponenten sinnvoll beschrieben werden. Die zu betrachtenden Komponenten setzten sich zusammen aus dem *„tektonischen Großraum“,* den *„überregionalen und regionalen Störungszonen“*, und der *„diffusen tektonischen Überprägung“*. Diese Komponenten zielen darauf, die tektonische Deformation des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs in Schritt 2 Phase I des Standortauswahlverfahrens großflächig, detaillierter und gebietsspezifisch bewerten zu können.

Die Unterteilung des Indikators in drei Komponenten zielt auf eine Erhöhung des Detaillierungsgrad in drei Schritten und berücksichtigt die regional heterogene Daten- und Kenntnislage zur tektonischen Überprägung des Untergrundes. Um letzteren zu begegnen, werden neben den erkundeten und kartierten Störungen sowie nicht-bruchhaften Deformationsstrukturen (Falten und Flexuren) aus Kartenwerken, Untergrundmodellen und seismischen Profilen, auch das tektonische Gesamtverständnis, welches sich aus der tektonischen Entwicklungsgeschichte einer Region ergibt, als Bewertungsgrundlage verwendet. Das Ziel ist es, durch die Integration des tektonischen Gesamtverständnisses in die Gesamtbewertung, die Dichte und Intensität der Deformationen im Untersuchungsraum bestmöglich zu ermitteln und zu bewerten. Der Detaillierungsgrad der tektonischen Überprägung von „günstig“ und „bedingt günstig“ bewerteten Großräumen wird durch die Anwendung überregionaler und regionaler Störungszonen und der diffusen tektonischen Überprägung weiter erhöht und führt am Ende zu einer Gesamtbewertung in „günstig“, „bedingt günstig“ oder „ungünstig“. Wird ein Großraum durch eine fachliche verbalargumentative Abwägung als „ungünstig“ eingestuft, entfällt die weitere Erhöhung des Detaillierungsgrades durch die Ausweisung der überregionalen und regionalen Störungszonen sowie der diffusen tektonischen Überprägung.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

Wie bereits in AkEnd (2002) festgestellt wurde, lässt sich dieser Indikator nicht sinnvoll für das Wirtsgestein Steinsalz „in steiler Lagerung“ und auf Salzkissen anwenden. Denn im Gegensatz zu anderen Wirtsgesteinsforationen, wo tektonische Deformation immer mit einer Verschlechterung der Ermittelbarkeit, der Explorierbarkeit (also der Charakterisierbarkeit) und den grundsätzlichen sicherheitsrelevanten Eigenschaften der Wirtsgesteine einhergeht, ist die Entstehung einer Salzstruktur selbst ein (salz)tektonischer Vorgang, der mit einer intensiven Deformation durch das Zusammenströmen des Steinsalzes aus der usprünglichen Lagerung verbunden ist. Die damit verbundene Auflösung des ursprünglichen salinaren Schichtverbandes, ist die Vorraussetzung, um großvolumige Akkumulation von homogenen Steinsalzkörpern mit weitgehend einheitlichen Gesteinseigenschaften der Salzstrukturen entstehen zu lassen.

Allgemeine Umsetzung – Workflow

Um die tektonische Überprägung in den jeweiligen Untersuchungsräumen zu ermitteln, werden tektonische Großräume ausgewiesen. Der Detaillierungsgrad der tektonischen Überprägung wird in den tektonischen Großräumen durch die Anwendung überregionaler und regionaler Störungszonen und der diffusen tektonischen Überprägung weiter erhöht und führt am Ende zu einer Gesamtbewertung. Das genaue Vorgehen ist im folgenden Text beschrieben.

Tektonischer Großraum

In einem ersten Schritt werden tektonische Großräume ausgewiesen. Über die Beschreibung der Deformationsgeschichte einer Region sollen mithilfe einer umfangreichen Auswertung von Fachliteratur tektonische Großräume definiert werden. Tektonische Großräume zeichnen sich durch eine gemeinsame oder ähnliche geologisch-tektonische Entwicklungsgeschichte aus. Durch das Durchlaufen gleicher Entstehungs- und Deformationsprozesse entsteht ein ähnlich ausgeprägtes oder vergleichbares strukturgeologisches Inventar, welches das jeweilige Gebiet charakterisiert.

Durch eine Analogiebetrachtung wird die Deformationsgeschichte des ursprünglichen Gesteinsverbands als wichtiger indirekter Indikator für das Ausmaß der tektonischen Überprägung verwendet (Abbildung 130).

Die Gesamtbewertung erfolgt über eine verbalargumentative, fachliche Ableitung der Intensität und Dichte der Deformationsstrukturen über die Indikatoren:

- Anzahl der Deformationsphasen
- Intensität der Deformation
- Art der Deformation

Die Begriffe intensive und schwache Deformation sind fachlich verbalargumentativ ableitbar aus der Art und Skalierung der Deformation im jeweiligen Großraum. Intensive Deformation wird z. B. durch intensive Blattverschiebung erzeugt, die eine große Zerrüttung des Gesteinskörpers verursacht (Kim et al. 2004). Auf- und Abschiebungen mit Versatzbeträgen im 100er-Meter-Bereich sowie Faltenbildung sind ebenfalls als intensive Deformation einzustufen, sobald sie den Großteil des Gesteinskörpers überprägen. Deformationen sind als schwach zu bewerten, wenn Auf- und Abschiebungen mit

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

geringen Versatzbeträgen in reduzierter Anzahl sowie Flexuren auftreten. Da die Störungslängen mit dem Versatz entlang von Störungen korrelieren, kann bei fehlenden Versatzbeträgen eine Abschätzung getroffen werden.

Das Vorgehen sowie die Bewertung von tektonischen Großräumen wird nachfolgend für die Teiluntersuchungsräume 01_06UR „Hegau“ und 04_11UR „Meißener Pluton“ (Kapitel 5.7.4.6, Beispiel 62 und Beispiel 63) beschrieben.

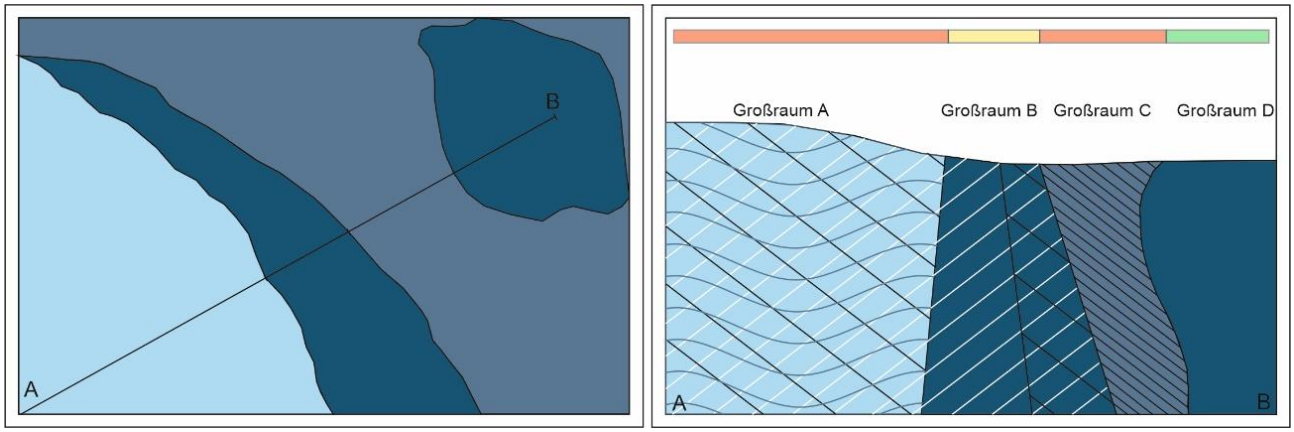


Abbildung 130: Schematische Darstellung von Gesteinen, die verschiedene Deformationszyklen durchlaufen haben.
Basierend auf dem strukturellen Inventar führt dies zur Ausweisung von tektonischen Großräumen.

Tabelle 20: Beispielhaftes Bewertungsschema von tektonischen Großräumen bezogen auf Abbildung 132

Großraum	Großraum A	Großraum B	Großraum C	Großraum D
Anzahl Deformationsphasen	3	1 – 2	1	–
Intensität der Deformation	Intensiv	Schwach	Intensiv	Schwach
Bewertung	**Ungünstig**	**Bedingt günstig**	**Ungünstig**	**Günstig**

Überregionale, regionale Störungszonen

Für die Ausweisung einer überregionalen und/oder regionalen Störungszone im tektonischen Großraum werden regionale Daten hinzugezogen. Voraussetzung ist, dass die Störungszone in der Fachliteratur (Veröffentlichungen, Fachberichte, Erläuterungen von geologischen Karten etc.) und seismischen Profilen bekannt ist und beschrieben wird. Es werden überregionale Störungszonen (z. B. Fränkische Linie, Lausitzer Überschiebung) und regionale Störungen (z. B. Leipzig-Colditz-Störung, Joachimsthaler Störung) in Betracht gezogen. Störungssysteme mit Einzelstörungen mit geringen

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

Längen werden einem Störungssystem zugeordnet, in dem die Störungssegmente mechanisch interagieren, und gesamtheitlich betrachtet (z. B. Elbe-Lineament). Der *„bedingt günstige Bereich“* von überregionalen Störungszonen orientiert sich an den Wertungsgruppen der Indikatoren nach StandAG und ist mit 3 km anzugeben. Der *„bedingt günstige Bereich“,* der um regionale Störungen gelegt werden soll, orientiert sich an den Vorgaben zum Sicherheitsabstand des Ausschlusskriteriums aktive Störungszonen und beträgt mindestens 1 km. Ist die Raumlage der Störungsfläche bekannt, wird der Sicherheitsabstand parallel zur Störungsfläche angelegt. Der 1-km-Sicherheitsabstand basiert auf der Mächtigkeit der möglichen Zerrüttungszone einer Störung, in der es zur Ausbildung von bruchhafter Deformation kommen kann.

Basierend auf einer Erweiterung der Wertungsgruppen werden die Gebiete um regionale Störungszonen „bedingt günstig“ (bei 100 m bis 1 km vom Rand des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs) oder als „ungünstig“ (kleiner als 100 m vom Rand des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs) bewertet. Um überregionale Störungen wird der „bedingt günstige“ Bereich auf 3 km vergrößert. Die Bewertung wird wie in Tabelle 53 beschrieben vorgenommen.

Hatten Störungsbewegungen eine nicht-bruchhafte Deformation des angrenzenden Gebirges in Form von Flexuren oder Falten zur Folge, die in ihrer räumlichen Erstreckung über den Abstand von 3 km oder 1 km hinausgehen, wird der als „bedingt günstig“ bewertete Bereich um den betroffenen Bereich vergrößert.

In der Abbildung 131 ist beispielhaft ein Profilschnitt über die Finne-Störung (im GzME „Thüringer Becken“) aufgeführt, für den eine Bewertung der Flexuren im Sinne einer bedingt günstigen Bewertung erfolgt ist. Demnach werden Bereiche, die aufgrund der Bewegung auf der Störungszone im Bereich des Zechstein eine Deformation bzw. Flexur erfahren haben, als bedingt günstig gewertet. Der rot dargestellte Bereich bezieht sich auf den Störungsbereich ebenfalls im Zechstein-Horizont und wird für den Indikator 3.1c als ungünstig gewertet.

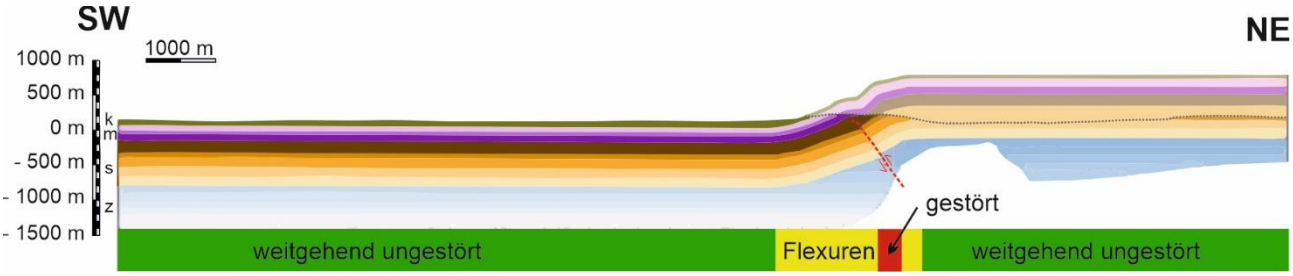


Abbildung 131: Bewertung der Flexuren im Bereich der Finne-Störung für den Zechstein am Beispiel des Profilschnitts „Heldrungen“, verändert nach Malz & Kley (2012)

Tabelle 53: Wertungsgruppen der überregionalen und regionalen Störungszonen. Angegeben ist die Breite der Pufferzonen, die um überregionale und regionale Störungszonene gelegt werden sollen.

Klassifikation von Störungen	Wertungsgruppen		
	günstig	bedingt günstig	ungünstig
Überregionale Störung	Über 3 km	Bis 3 km	Bis 100 m
Regionale Störung	Über 1 km	Bis 1 km	Bis 100 m

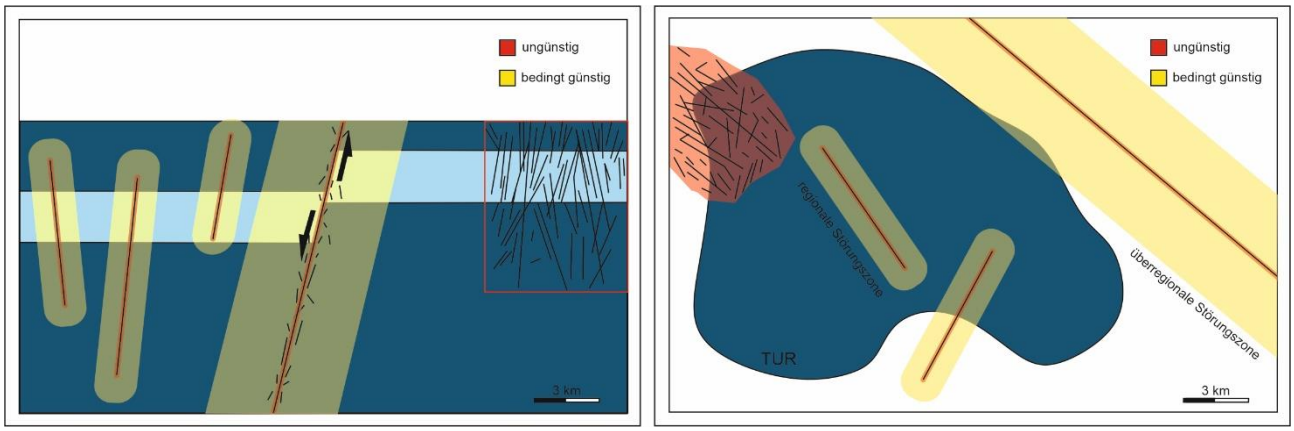


Abbildung 132: Schematische Darstellung von Diskontinuitäten im Wirtsgestein mit dem dazugehörigen „bedingt günstigen“ Bereich. Überregionale Störungszone mit einem 3 km mächtigen „bedingt günstigen“ Bereich; regionale Störungszonen mit einem 1 km mächtigen „bedingt günstigen“ Bereich; diffuse Überprägung mit einer „ungünstigen“ Bewertung.

Diffuse tektonische Überprägung

Für die Ausweisung einer diffusen tektonische Überprägung eines Gesteinskörpers werden regionale Daten hinzugezogen. Als diffus überprägt wird der Gesteinskörper betrachtet, wenn ein weit verbreitetes Netz aus Störungen auftritt, das zur einer engständigen Zerblockung führt. An vielen Stellen ist das Störungsmuster zwar im Detail weitgehend unbekannt, die vorhandenen strukturgeologischen Daten und untergeordneten, auch konzeptionellen Überlegungen deuten aber auf eine erhöhte kleinräumige tektonische Zergliederung hin. In Zonen, in welchen nur qualitativ schlechte oder gar keine Daten zur Verfügung stehen, müssen zwangsläufig auch mögliche (aber nicht zwingende) Anzeichen sowie Analogieschlüsse und/oder konzeptionelle Überlegungen berücksichtigt werden. Diffuse tektonische Überprägung wird als „ungünstig“ bewertet (z. B. Nagra 2008a).

5.7.4.6 Beispiele Indikator 3.1c „Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit“

Die Vorgehensweise bei der Bewertung des Indikators „Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit“ anhand der beschriebene Komponenten wird im Folgenden anhand der Anwendungsbeispiele Tektonischer Großraum Freiburg-Bonndorf-Bodensee-Scherzone im GzME „Opalinuston“ (Beispiel 62) für das Wirtsgestein Tongestein und Tektonischer Großraum Elbezone im GzME „Saxothuringikum“ (Beispiel 63) für das kristalline Wirtsgestein veranschaulicht.

Beispiel 62: Bewertung des Teiluntersuchungsraums 01_06UR im GzME „Opalinuston“ (01_00UR)

Bewertung des Teiluntersuchungsraums 01_06UR im GzME „Opalinuston“ (01_00UR)

Die geowissenschaftlichen Arbeiten als Grundlage für die Bewertung des Indikators 3.1c der Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG werden für das GzME „Opalinuston“ am Beispiel des Teiluntersuchungsraums 01_06UR gezeigt. Dieser Teiluntersuchungsraum wird in Kapitel 5.7.5 ausführlich beschrieben.

Die Bewertung des Indikators 3.1c „Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit“ des Kriteriums zur Bewertung der „Ermittelbarkeit der Gesteinstypen und ihrer charakteristischen Eigenschaften im vorgesehenen Endlagerbereich, insbesondere im vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereich“ (Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG) ist in Tabelle 54 zusammengefasst. Die Ausarbeitung, die zur Bewertung des Indikators führt, wird im Folgenden gezeigt.

Tabelle 54: Übersicht über die Bewertung des Indikators „Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit“ der Eigenschaft „Ermittelbarkeit der Gesteinstypen und ihre charakteristischen Eigenschaften im vorgesehenen Endlagerbereich, insbesondere im vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereich“ der Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG für 01_07UR im GzME „Opalinuston“

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße beziehungsweise Indikator des Kriteriums	Bewertung
Ermittelbarkeit der Gesteinstypen und ihre charakteristischen Eigenschaften im vorgesehenen Endlagerbereich, insbesondere im vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereich	Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit	ungünstig

Bewertung des Teiluntersuchungsraums 01_06UR im GzME „Opalinuston“ (01_00UR)

Der Teiluntersuchungsraum 01_06UR Hegau liegt im tektonischen Großraum der Freiburg-Bonndorf-Bodensee-Scherzone (FBBS). Die Freiburg-Bonndorf-Bodensee-Scherzone (Abbildung 133) ist eine spätvariszische, als Bruchlinie angelegte, WNW-ESE orientierte Scherzonen im kristallinen Grundgebirge. Sie repräsentiert eine etwa 10 km bis 20 km breite, komplexe Störungszone des Sockels, die aus mehreren Teilgräben besteht, welche keine durchgehende Senkungszone bilden, sondern gestaffelt angeordnet sind (Nagra 2002d). Sie wird im Westen vom südlichen Oberrheingraben begrenzt (Geyer et al. 2011). Die Störungen im Grundgebirge kontrollieren die Deformationen der mesozoischen und känozoischen Sedimente entlang der Freiburg-Bonndorf-Bodensee-Scherzone (Egli et al. 2017). Durch mehrere tektonische Ereignisse (Phasen P1 bis P3) wurden die Wirtsgesteine innerhalb des tektonischen Großraums stark überprägt.

Tabelle 22: Deformationsphasen und Bewertung des tektonischen Großraums FBBS

Deformationsphasen	Art der Deformation	Intensität der Deformation
Phase 1	Seitenverschiebung	**Intensive Überprägung** durch starke Zerrüttung
Phase 2	Abschiebungen	**Intensive Überprägung** durch Versatzbeträge von 200 m – 250 m
Phase 3	Seitenverschiebung und Abschiebungen	**Intensive Überprägung** durch starke Zerrüttung

In einer ersten Deformationsphase (P1), die vom Mesozoikum bis in das Känozoikum (Tertiär) reichte, kam es entlang der Scherzone zu Seitenverschiebungen, die die Sedimente stark deformierten. Hauptstrukturelemente in den jurassischen und känozoischen Sedimenten sind Nordwest–Südost sowie WNW-ESE streichende Störungen, die auf reaktivierte paläozoische Störungen hindeuten (Egli et al. 2017).

Im Känozoikum (Neogen) (P2) kam es zu abschiebenden Bewegungen mit Versätzen von 200 m bis 250 m im Bonndorf- und Hegau-Graben. Die Hauptaktivität fand postmesozoisch statt und reichte bis in das Miozän (Egli et al. 2017). Die hauptsächlich miozäne tektonische Aktivität ist durch deformierte Molasse-Sedimente dokumentiert, die an einzelnen Störungszonen 200 m bis 250 m versetzt wurden (Hofmann et al. 2000).

Herdflächenlösungen von rezenten seismischen Ereignissen in der Umgebung der Freiburg-Bonndorf-Bodensee-Scherzone zeigen Störungsbewegungen in Form von Seitenverschiebungen und Abschiebungen an (Deichmann et al. 2000), die in einer dritten Deformationsphase (P3) aktiv waren. Durch die unterschiedliche Orientierung der Störungszonen äußert sich die Seitenverschiebungsbewegung des Gesamtsystems an einzelnen Störungszonen mit

Bewertung des Teiluntersuchungsraums 01_06UR im GzME „Opalinuston“ (01_00UR)

abweichender Orientierung, sowohl als Seitenverschiebung als auch als Abschiebung (Egli et al. 2017).

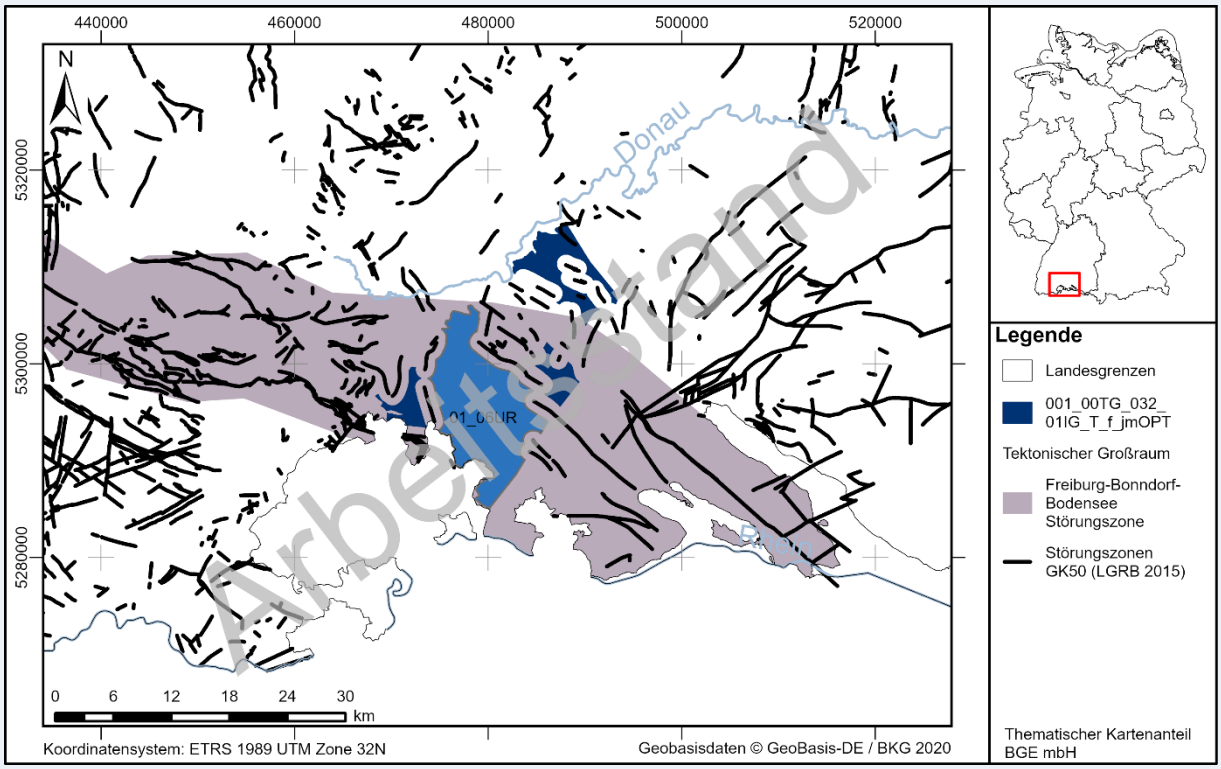


Abbildung 133: Lage des Teiluntersuchungsraums 01_06UR Hegau im Tektonischen Großraum der Freiburg-Bonndorf-Bodensee Scherzone (Störungszonen aus LGRB 2015)

Insgesamt kann die tektonische Überprägung der Freiburg-Bonndorf-Bodensee-Scherzone im Rahmen der Bewertung von Indikator 3.1c als „ungünstig“ eingestuft werden, da eine anhaltende Seitenverschiebung sowie Abschiebungen mit großen Versätzen die Gesteine sowie Sedimente nachweislich stark deformiert haben. Die weitere Betrachtung der überregionalen und regionalen Störungszonen sowie der diffusen Überprägung entfällt damit.

Arbeitsstand

Beispiel 63: Bewertung des Teiluntersuchungsraums 04_11UR im GzME „Saxothuringikum“

Bewertung des Teiluntersuchungsraums 04_11UR im GzME „Saxothuringikum“

Die geowissenschaftlichen Arbeiten als Grundlage für die Bewertung des Indikators 3.1c der Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG werden für das GzME „Saxothuringikum“ am Beispiel des Teiluntersuchungsraums 04_11UR gezeigt.

Die Bewertung des Indikators 3.1c „**Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit**“ des Kriteriums zur Bewertung der „Ermittelbarkeit der Gesteinstypen und ihrer charakteristischen Eigenschaften im vorgesehenen Endlagerbereich, insbesondere im vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereich“ (Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG) ist in Tabelle 55 zusammengefasst. Die Bewertung des Ausmaßes der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit findet aufgrund einer Analyse des tektonischen Großraumes statt.

Tabelle 55: Übersicht über die Bewertung des Indikators „Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit“ der Eigenschaft „Ermittelbarkeit der Gesteinstypen und ihre charakteristischen Eigenschaften im vorgesehenen Endlagerbereich, insbesondere im vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereich“ der Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG für den Teiluntersuchungsraum 04_11UR im GzME „Saxothuringikum“

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße beziehungsweise Indikator des Kriteriums	Bewertung
Ermittelbarkeit der Gesteinstypen und ihre charakteristischen Eigenschaften im vorgesehenen Endlagerbereich, insbesondere im vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereich	Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit	ungünstig

Der Teiluntersuchungsraum 04_11UR „Meißener Pluton“ befindet sich im tektonischen Großraum der Elbezone, zwischen dem Lausitzer Block und dem Granulit-Erzgebirgs-Block (Abbildung 134). Die Elbezone ist Teil des Elbe-Lineaments, das eine tiefe krustale Struktur repräsentiert (Dillenardt 2010). Sie gehört zur Wrench-and-Thrust-Zone des variszischen Orogens, die eine Strike-slip und Überschiebungszone im Übergang zwischen autochthoner und allochthoner Domäne darstellt. Die engräumig gestörte Geologie der Elbezone entstand durch mehrere tektonische Ereignisse (Phasen 1 bis 3, siehe Tabelle 56).

Bewertung des Teiluntersuchungsraums 04_11UR im GzME „Saxothuringikum“

Tabelle 56: Deformationsphasen und Bewertung des Tektonischen Großraums Elbezone

Deformationsphasen	Art der Deformation	Intensität der Deformation
Phase 1	Dextrale Scherbewegung	**Intensive Überprägung** durch starke Scherung und Zerrüttung
Phase 2	Abschiebungen, Dehnungstektonik	**Intensive Überprägung** durch intensive Dehnungstektonik
Phase 3	Aufschiebungen	**Intensive Überprägung** von vorrangig mesozoischen und känozoischen Sedimentgesteinen durch intensive Kompression

Im Unterkarbon kam es zu einer weitreichenden, NW-SE gerichteten dextralen Scherbewegung über eine Länge von 300 km. Während dieser Deformationsphase (P1) kam es zur Intrusion des Meißener Massivs. Aus der P1-Phase sind Streckungslineare mit Streichrichtungen von 100° bis 140° und Einfallswinkeln von 8° bis 35° in den Gesteinen überliefert (Linnemann & Schauer 1999). Im Perm bis Jura (P2) bildeten sich Störungen und Abschiebungen im Zusammenhang mit einer NE-SW-gerichteten Dehnungstektonik aus (Berger et al. 2011d), welche die Bildung des Döhlener und Briesnitzer Becken zur Folge hatte.

Während der Kreide und des Tertiär (P3) kam es aufgrund einer NE-SW gerichteten Kompression zur Überschiebung der Lausitzer Störung sowie zur Ausbildung kleinerer Abschiebungen. Somit ergibt sich das Bild einer durch drei verschiedene tektonische Ereignisse überprägten Grenzzone zwischen den tektonischen Großeinheiten des Lausitzer Blocks, des Granulit-Erzgebirgs-Blocks und des Nordwestsächsischen Blocks (LfULG 2016).

In dem durch die Deformationsphasen P1 bis P3 stark tektonisch beanspruchten kristallinen Grundgebirge treten viele durch bruchhafte Deformation entstandene Störungen auf. Es bildeten sich außerdem Rampenstrukturen, mylonitisierte Gesteinsbänder sowie tiefgreifende Störungen, die auf seismischen Profilen ersichtlich sind (Dillenardt 2010). Durch die starke und intensive tektonische Beanspruchung der Gesteine in mehreren Deformationsphasen ist die tektonische Überprägung der Elbezone als „ungünstig“ einzustufen.

In der Senkungsstruktur der Elbezone befinden sich vor allem Magmatite des Meißener Plutons, das Molassebecken der Döhlener Senke und die Sedimentgesteine der Sächsisch-Böhmischen Kreidesenke (Sebastian 2013). Der Teiluntersuchungsraum 04_11UR ist mit dem enthaltenen Meißener Massiv als Teil der Elbezone und dessen Entstehungsgeschichte zu betrachten. Der Beginn der Intrusion des Gesteinskörpers ist in die P1-Phase zu stellen. Das Intrusionsalter nimmt zum Zentrum hin ab. In älteren variszischen Plutoniten ist eine aktive Scherbewegung in Form von Schlieren und Fließbewegungen erkennbar (P1-Phase), die in den Zusammenhang mit der Seitenverschiebung gebracht werden kann. Diese erste tektonische Aktivität ist im jüngeren Meißener Granit nicht überliefert. Der Körper wurde durch die Dehnungstektonik (P2-Phase) im Perm bis Jura und die Kompression während der Kreide bis ins Tertiär (P3-Phase) tektonisch überprägt. Im Teiluntersuchungsraum 04_11UR ist vor allem

Bewertung des Teiluntersuchungsraums 04_11UR im GzME „Saxothuringikum“

die spröde Deformation bedeutend. Diese ist in Form von kreidezeitlichen bis tertiären Störungen der P3-Phase geprägt. Insgesamt ist der Teiluntersuchungsraum 04_11UR in Hinblick auf Indikator 3.1c als „ungünstig“ zu bewerten.

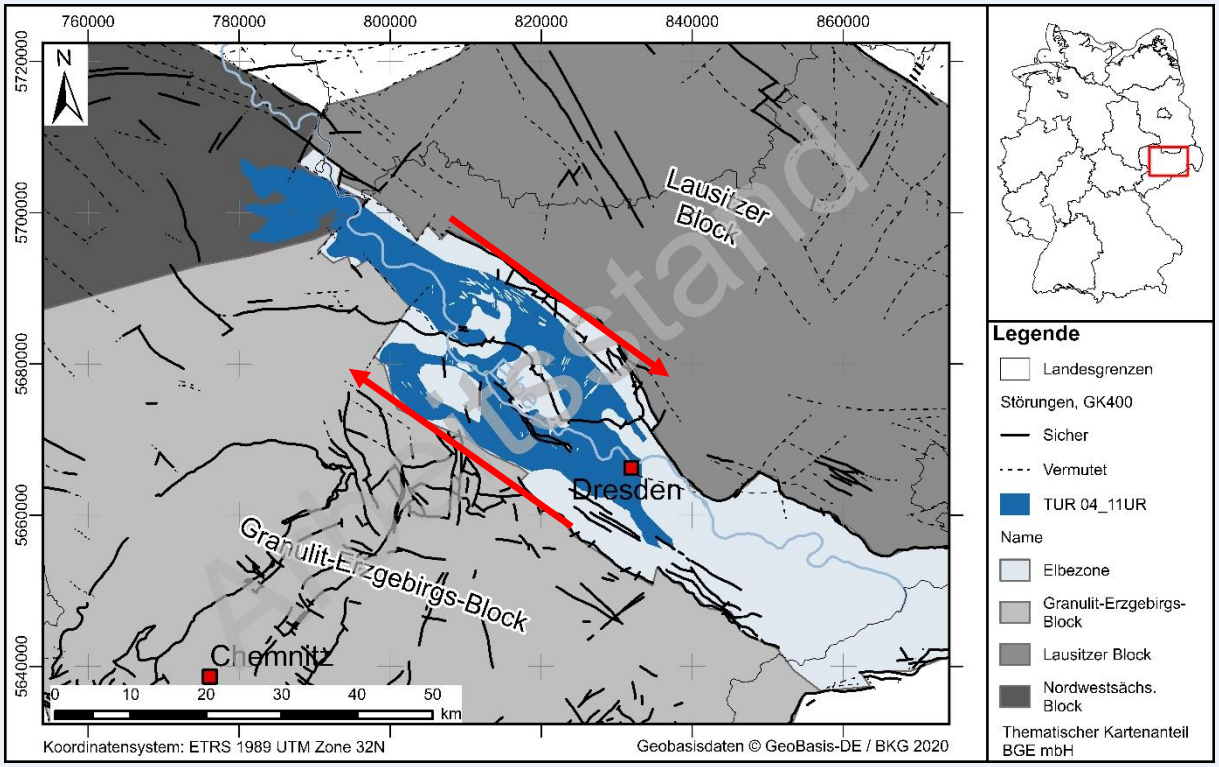


Abbildung 134: Lage des Teiluntersuchungsraums 04_11UR zwischen den tektonischen Einheiten des Granulit-Erzgebirgs-Blocks und des Lausitzer Blocks im tektonischen Großraum Elbezone (GK400 verändert nach LfULG 2016).

Die Pfeile markieren die Bewegungsrichtung der dextralen Seitenverschiebung.

5.7.4.6.1 Tektonische Überprägung und Gebirgsdurchlässigkeit im kristallinen Wirtsgestein

Die tektonische Überprägung eines Gebirges beeinflusst die Gebirgsdurchlässigkeit, welche die hydraulische Leitfähigkeit eines natürlichen Gesteinsverbandes darstellt und sich aus der Trennfugendurchlässigkeit und der Gesteinsdurchlässigkeit zusammensetzt. Kristalline Wirtsgesteine besitzen Gesteinsdurchlässigkeiten von ca. 10^{-14} m/s (Becker et al. 2020). Eine Variation der Gebirgsdurchlässigkeit kristalliner Wirtsgesteine und damit eine veränderte Barrierewirkung ist somit durch die Trennfugendurchlässigkeit und folglich durch die vorliegende Anzahl und räumliche Verteilung von Diskontinuitäten wie Klüften und Störungszonen bestimmt. Demzufolge führt eine starke „tektonische Überprägung der geologischen Einheit“ (wie sie zum Beispiel für den Indikator 3.1c Anlage 3

(zu § 24 Abs. 3) StandAG ermittelt wird) zu einer Erhöhung der „charakteristischen Gebirgsdurchlässigkeit“ und zu einer bedingt, bzw. weniger günstigen, Bewertung der Anlage 1 Indikator 2 (zu § 24 Abs. 3) StandAG) und dient somit als zusätzlicher indirekter Indikator.

Um eine Bewertung der Teiluntersuchungsraum hinsichtlich ihrer Gebirgsdurchlässigkeit zu ermöglichen, strebt die BGE an, Aussagen der Trennfugendurchlässigkeit in kristalline Wirtsgesteinen unter anderem über eine Bewertung unterschiedlicher ermittelbarer Faktoren in Form von Analogiebetrachtungen abzuleiten. Entscheidend ist hierbei, dass die Verheilung von Trennfugen in kristallinen Wirtsgesteinsformationen oft nur durch die Mineralisation von Sekundärmineralen erfolgt und somit die Gebirgsdurchlässigkeit durch eine Bildung von Klüften langfristig erhöht wird. Ein Vergleich der Gebirgsdurchlässigkeiten von ungestört und geklüfteten magmatischen und metamorphen Gesteinen zeigt eine erhöhte Durchlässigkeit bei gestörten Gebirgsformationen (Domenico & Schwartz 1990). Die hydraulische Trennfugendurchlässigkeit wird somit durch die Klüftigkeit des Wirtsgesteins beeinflusst. Die BGE stellt folglich die Hypothese auf, dass sich die Trennfugendichte und die Gebirgsdurchlässigkeit von kristallinen Wirtsgesteinsformationen von der tektonischen Überprägung eines regionalgeologischen Gebiets ableiten lässt. Der Grad der tektonischen Überprägung variiert je nach Art, Versatzbetrag und Stressregime.

Die BGE prüft, ob sich auf Grundlage dieser Annahme eine Methodik für die Bewertung der Gebirgsdurchlässigkeit (Anlage 1 Indikator 2 (zu § 24 Abs. 3) StandAG) entwickeln lässt, welche aufgrund der tektonischen Überprägung (Anlage 3 Indikator 3.1c (zu § 24 Abs. 3) StandAG) abgeleitet werden kann.

5.7.4.7 Indikator 3.2 „Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)“

Die bewertungsrelevante Eigenschaft „Übertragbarkeit der Eigenschaften im vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereich“ wird durch den Indikator „Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)“ beschrieben (Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG). In dem Indikator wird die Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies) des Wirtsgesteinsbereiches mit Barrierefunktion bewertet.

Der Begriff Fazies beschreibt einen Gesteinskörper mit spezifischen Merkmalen, der durch einen bestimmten Prozess oder durch die Kombination bestimmter Prozesse unter bestimmten Bedingungen (sedimentär, magmatisch oder metamorph) gebildet wurde (modifiziert nach Reading 2004). Daher werden für die Bewertung der Gesteinsfazies generische Charakteristika herangezogen, z. B. Ablagerungsbedingungen und Diagenese bei den sedimentären Wirtsgesteinen und magmatische und metamorphe Bildungsbedingungen und Phasen bei kristallinen Gesteinseinheiten.

Mit der Bewertungsgrundlage der Fazies einer Gesteinsabfolge wird die Übertragbarkeit der lithologischen Eigenschaften beurteilt. „*Dabei sind Gebiete, in denen die Gesteine und deren Eigenschaften großräumig einheitlich oder sehr ähnlich ausgebildet sind, positiv einzuordnen*“ (AkEnd 2002). Der Betrachtungsmaßstab ist deutlich kleiner (d. h. überregionaler) als in den zuvor behandelten Indikatoren, da mit den Fazies größere, generisch verwandte Räume bewertet werden und sich diese auf die gesamte Wirtsgesteinsabfolge mit Barrierefunktion beziehen. Die Bewertung ergibt sich aus den in der Geosynthese zusammengestellten Informationen und Parametern. In der ersten

Phase des Standortauswahlverfahrens liegen oft keine detaillierten Fazies-Modelle der Wirtsgesteine für die jeweiligen Untersuchungsräume vor. Jedoch können qualitative Aussagen für die Teiluntersuchungsräume auf Basis von lithologischen Beschreibungen in Bohrungen, geophysikalischen Messungen inkl. bohrlochgeophysikalischen Daten, geologischen 3D-Modellen, paläogeographischen Karten, der Entstehungsgeschichte der Wirtsgesteinsformationen sowie aus Analogieschlüssen getroffen werden. Aufgrund der Entstehungsgeschichte der verschiedenen Wirtsgesteine unterscheidet sich die Anwendung der bewertungsrelevanten Eigenschaft und wird daher im Folgenden für die verschiedenen Wirtsgesteine beschrieben (Tabelle 57).

Für die Wirtsgesteine Steinsalz und Tongestein liegen wenige konkrete Untersuchungsergebnisse zur Auswirkung von Diagenese und anderen die Gesteinsfazies beeinflussenden Prozessen (z. B. Halokinese oder synsedimentäre Deformation) in den Teiluntersuchungsräumen vor. Daher werden zum jetzigen Stand der Bearbeitung die primären Ablagerungsverhältnisse betrachtet und bewertet. Sobald detaillierte Informationen zu den oben aufgeführten Prozessen und deren Auswirkungen im Hinblick auf die Gesteinsfazies vorliegen, werden diese in der Bewertung der Teiluntersuchungsräume berücksichtigt. Insbesondere in den Wirtsgesteinsbereichen von Steinsalz „in steiler Lagerung“ führt der Prozess der Halokinese bzw. Halotektonik zur Auflösung des ursprünglichen Schichtverbandes und einer Erhöhung der Komplexität der Lagerungsverhältnisse, so dass interne Faziswechsel nach bekanntem oder nicht bekanntem Muster zu erwarten sind. Über die Kenntnis des Internbaustyps (Grad der Komplexität der Verfaltung) von Salzstrukturen können Muster näherungsweise prognostiziert werden (Kapitel 5.2).

Tabelle 57: Beispiele der Wirtsgesteine zur Bewertung der Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies) (gem. Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG)

	Wertungsgruppe		
	günstig	bedingt günstig	ungünstig
Allgemeine Beispielanwendung	Fazies regional einheitlich	Fazies nach bekanntem Muster wechselnd	Fazies nach nicht bekanntem Muster wechselnd
Tongestein	Ablagerungsräume die geprägt sind von Sedimentation aus Suspension, wie beckenzentrale marine Ablagerungsräume (Beckenzentrum, Shelf bis Unterer Vorstrand)	Mittlerer Vorstrand	Ablagerungsräume die geprägt sind von stark wechselnden Lithologien, z. B. Deltafront, Deltaebene oder Ablagerungsraum, der durch Massentransport (Turbidite etc.) beeinflusst ist
Steinsalz	Bereiche im Beckeninneren	Randbereiche der Becken mit großräumigem Wechsel der Gesteinsytpen; Übergangsbereich zwischen Schwellen und Senken	Randbereiche der Becken mit kleinräumigem Wechsel der Gesteinstypen

	Wertungsgruppe		
	günstig	bedingt günstig	ungünstig
Kristallin	**Plutonite,** deren Kristallisationsabfolgen grundsätzlich bekannt und gut kartiert sind, und deren Intrusionskörper homogen und über mehrere hundert Meter oder mehrere Kilometer aushaltend sind	**Hochgradig regionalmetamorphe Gesteine**, die grundsätzlich aus großvolumigen magmatischen Ausgangsgesteinen hervorgegangen sind oder aufgrund ihrer Entstehungsgeschichte eine weitgehend einheitliche metamorphe Gesteinsfazies und Gesteinsausbildung entwickeln konnten. Beispiele sind Orthogneise und Granulite	**Hochgradig regionalmetamorphe Gesteine,** die grundsätzlich aus Gesteinen sedimentären Ursprungs hervorgegangen sind; wie z. B. Paragneis-Amphibolit-Wechselfolgen oder Paragneis-Kalksilikat-Wechselfolgen sowie, **teilgeschmolzene Hochtemperatur- und Hochdruckgesteine** welche in Teilen Merkmale metamorpher und magmatischer Gesteine aufweisen; wie z. B. Anatexite, Diatexite, Migmatite

5.7.4.8 Beispiele zu Indikator 3.2 „Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)“

Die Vorgehensweise bei der Bewertung des Indikators „Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)“ mithilfe der beschriebenen Komponenten wird im Folgenden anhand der Anwendungsbeispiele Opalinuston-Formation im GzME „Opalinuston“ (Beispiel 64) für das Wirtsgestein Tongestein, dem GzME „Thüringer Becken“ (Beispiel 65) für das Wirtsgestein „Steinsalz flach“, dem GzME „Saxothuringikum“ (Beispiel 66) für das kristalline Wirtsgestein und dem GzME „Bahlburg“ für das Wirtsgestein „Steinsalz in steiler Lagerung“ (Beispiel 67) beleuchtet.

Beispiel 64: Bearbeitung des Indikators 3.2 „Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)“ am Beispiel des Teiluntersuchungsraums 01_07UR im GzME „Opalinuston“ (01_00UR)

Bewertung des Indikators 3.2 „Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)“ am Beispiel des Teiluntersuchungsraums 01_07UR im GzME „Opalinuston“ (01_00UR)

Die geowissenschaftlichen Arbeiten als Grundlage für die Bewertung des Indikators 3.2 „**Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)**“ des Kriteriums zur Bewertung der „Übertragbarkeit der Eigenschaften im vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereich“ der Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG werden für das GzME „Opalinuston“ am Beispiel des Teiluntersuchungsraums 01_07UR gezeigt. Dieser Teiluntersuchungsraum wird in den Kapiteln 5.6.1 und 5.7.2 ausführlich beschrieben.

Die Bewertung des Indikators 3.2 „Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)“ des Kriteriums zur Bewertung der „Übertragbarkeit der Eigenschaften im vorgesehenen einschlusswirksamen

Bewertung des Indikators 3.2 „Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)“ am Beispiel des Teiluntersuchungsraums 01_07UR im GzME „Opalinuston“ (01_00UR)

Gebirgsbereich“ (Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG) ist in Tabelle 58 zusammengefasst. Die Ausarbeitung, die zur Bewertung des Indikators führt, wird im Folgenden gezeigt.

Tabelle 58: Übersicht über die Bewertung des Indikators 3.2 „Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)“ der Eigenschaft „Übertragbarkeit der Eigenschaften im vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereich“ der Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG für 01_07UR im GzME „Opalinuston“

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße beziehungsweise Indikator des Kriteriums	Bewertung
Übertragbarkeit der Eigenschaften im vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereich	Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)	günstig

Für den Indikator 3.2 werden paläogeographische Karten herangezogen, um Aussagen über den Ablagerungsraum treffen zu können, der zur Faziesinterpretation führt. Die Opalinuston-Formation zeichnet sich in Baden-Württemberg durch eine geringe laterale Variabilität der Fazies aus (Allia 1996; Franz & Nitsch 2009). Der Opalinuston wurde während des Aalenium in einem flachen, in Schwellen und Senken gegliederten Epikontinentalmeer abgelagert (Abbildung 135), das von einer andauernden Absenkung geprägt war (Allia 1996; Hoth et al. 2007). Die Wassertiefe des Ablagerungsraumes lag bei ca. 20 m bis 50 m, was in etwa der Lage der Sturmwellenbasis entspricht (Stark 2014). Es kann von einer raschen synsedimentären Subsidenz ausgegangen werden (Allia 1996). Insgesamt ist der Ablagerungraum geprägt von Sedimentation aus Suspensionsfracht, was auf überwiegend ruhige Sedimentationsbedingungen hinweist und zu großflächig gleichmäßigen Ablagerungen führt. Diese ruhigen Ablagerungsbedingungen werden selten durch Ereignisse wie beispielsweise starke Stürme unterbrochen, dessen Auswirkungen im oberen Teil der Opalinuston-Formation stellenweise zu beobachten sind. Der Indikator 3.2 „Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)“ ist damit für den Teiluntersuchungsraum 01_07UR mit „günstig“ zu bewerten.

Bewertung des Indikators 3.2 „Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)“ am Beispiel des Teiluntersuchungsraums 01_07UR im GzME „Opalinuston“ (01_00UR)

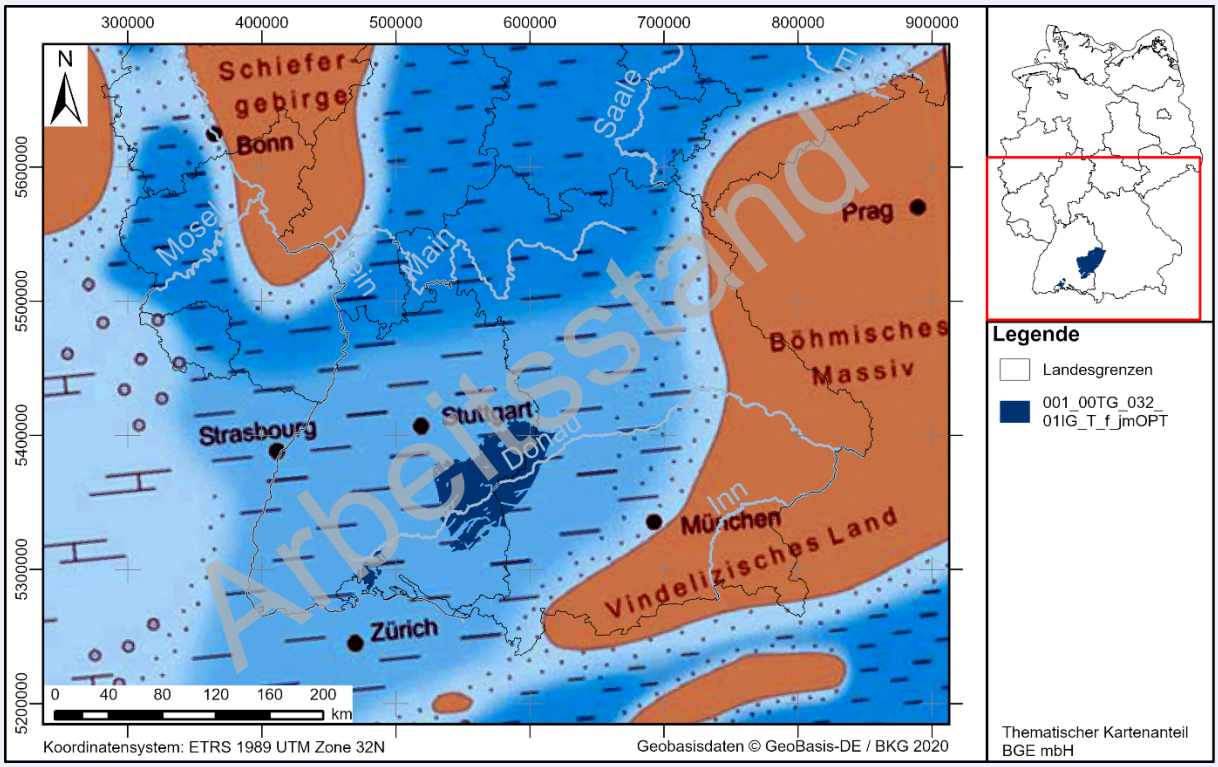


Abbildung 135: Paläogeographische Situation zu Beginn der Ablagerung des Opalinustons. Eine Ausfällung von Karbonat findet in den Flachwasserzonen statt (sehr helles blau), in den Becken werden Tone abgelagert (striche, hell bis dunkelblau); in Nähe der Landmassen kommt Sand zur Ablagerung (gepunktete Signatur) (Nagra 2002d).

Beispiel 65: Bearbeitung des Indikators 3.2 „Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)“ am Beispiel des GzME „ Thüringer Becken“ (03_00UR)

Bewertung des Indikators 3.2 „Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)“ am Beispiel des Teiluntersuchungsraums 03_21UR im GzME „Thüringer Becken“ (03_00UR)

Die geowissenschaftlichen Arbeiten als Grundlage für die Bewertung des Indikators 3.2 „**Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)**“ des Kriteriums zur Bewertung der „Übertragbarkeit der Eigenschaften im vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereich“ (Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG) werden für das GzME „Thüringer Becken“ am Beispiel des Teiluntersuchungsraums 03_21UR gezeigt. Dieser Teiluntersuchungsraum wird in den Kapiteln 5.6.1 und 5.7.2 ausführlich beschrieben.

Bewertung des Indikators 3.2 „Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)“ am Beispiel des Teiluntersuchungsraums 03_21UR im GzME „Thüringer Becken“ (03_00UR)

Die Bewertung des Indikators 3.2 ist in Tabelle 59 zusammengefasst. Die Ausarbeitung, die zur Bewertung des Indikators führt wird, im Folgenden gezeigt.

Tabelle 59: Übersicht über die Bewertung des Indikators „Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)“ der Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG für den Teiluntersuchungsraum 03_21UR im GzME „Thüringer Becken“

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße beziehungsweise Indikator des Kriteriums	Bewertung
Übertragbarkeit der Eigenschaften im vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereich	Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)	günstig

Für den Indikator 3.2 werden paläogeographische Karten zur Zeit des Zechstein herangezogen, um Aussagen über den Ablagerungsraum zu treffen. Der Zechstein ist durch marine Verhältnisse und die Bildung mächtiger Steinsalzablagerungen innerhalb des Zentraleuropäischen Beckens geprägt (Meschede 2018). Fazieskarten des späten Perm (≈ 260 Ma) zeigen, dass Norddeutschland im Beckenzentrum des Southern Permian Basin lag (Ziegler 1990), welches sich durch Subsidenz der Rotliegendsedimente ausgebildet hat (Meschede 2018). Das Thüringer Becken stellt ein Nebenbecken des Zentraleuropäischen Beckens dar und gliedert sich in vier verschiedene Fazieszonen (Deutsche Stratigraphische Kommission 2020). Während der Norden des GzME „Thüringer Becken“ im Beckeninneren und Plattformhang liegt, schließt sich südlich die Fazies der Plattform und Lagunen an. Im äußersten Südosten besteht ein Übergang zur litoralen bis fluviatilen Randfazies (Abbildung 136). Der Teiluntersuchungsraum 03_21UR befindet sich zur Zeit der Staßfurt-Formation im Übergangsbereich vom Beckeninneren zum Plattformhang. Derzeit kann nur davon ausgegangen werden, dass im Bereich der fluviatilen und lithoralen Randfazies stärkere Variationen in der Gesteinsfazies auftreten. Sowohl die Ablagerungsbereiche des Beckenzentrums und des Plattformhangs lassen derzeit auf überwiegend regional einheitliche Faziesmuster schließen. Die Bewertung des Indikators 3.2 „Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)“ des Kriteriums zur Bewertung der „Übertragbarkeit der Eigenschaften im vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereich“ (Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG) ist damit für den Teiluntersuchungsraum 03_21UR mit „günstig“ zu bewerten.

Bewertung des Indikators 3.2 „Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)“ am Beispiel des Teiluntersuchungsraums 03_21UR im GzME „Thüringer Becken“ (03_00UR)

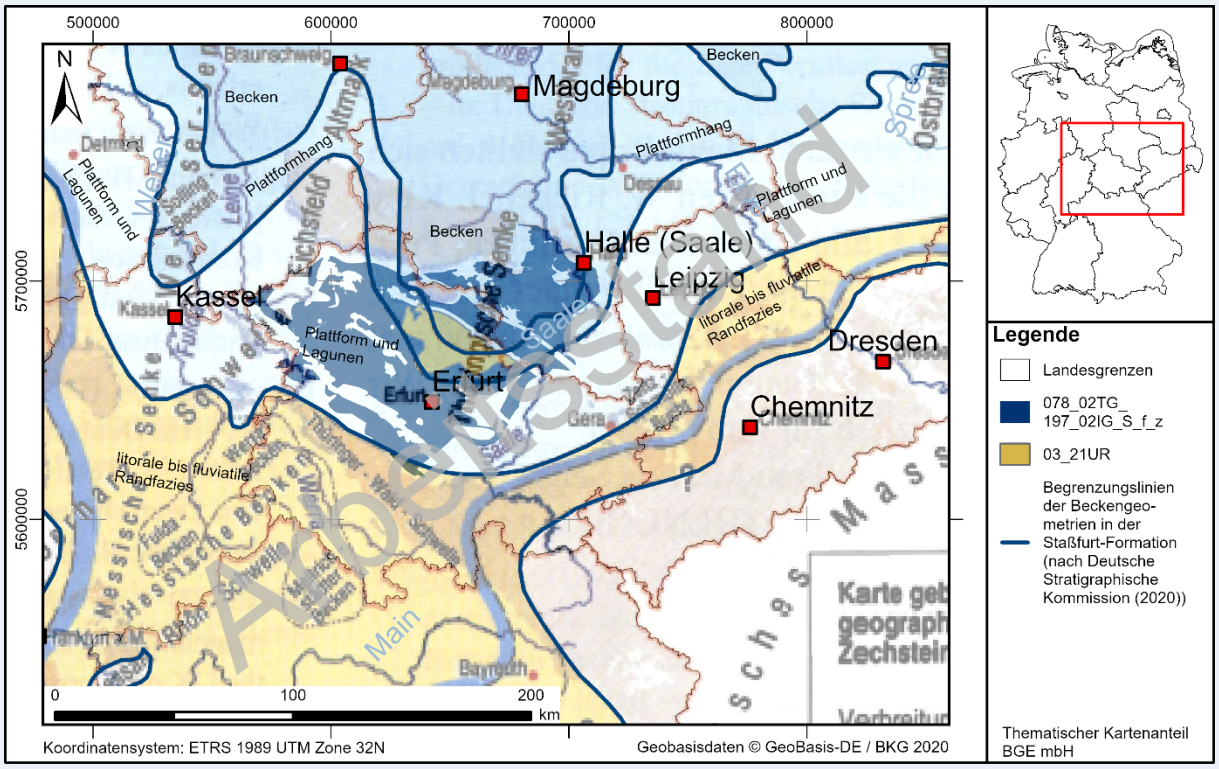


Abbildung 136: Paläogeographische Situation zur Zeit der Staßfurt-Formation im Zechstein (Deutsche Stratigraphische Kommission 2020). Das GzME „Thüringer Becken“ ist blau markiert. Der Teiluntersuchungsraum 03_21UR ist gelb eingefärbt.

Beispiel 66: Bearbeitung des Indikators 3.2 „Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)“ am Beispiel des Teiluntersuchungsraums 04_11UR im GzME „Saxothuringikum“

Bewertung des Indikators 3.2 „Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)“ am Beispiel des Teiluntersuchungsraums 04_11UR im GzME „Saxothuringikum“

Der Begriff Fazies kann über die Gesteinsart, die Entstehungs- und Ablagerungsbedingungen, aber auch durch Gesteinsmerkmale definiert sein. Als Gesteinsfazies kristalliner Wirtsgesteine werden übergeordnet magmatische und metamorphe Faziesbereiche in ihrer Gesamtheit und die Gesteinsausbildung der kristallinen Wirtsgesteine beschrieben (Tabelle 57).

Eine zusammenfassende Darstellung der Bewertung des Indikators „Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)“ der Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG für den Teiluntersuchungsraum 04_11UR ist in Tabelle 60 dargestellt.

Bewertung des Indikators 3.2 „Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)“ am Beispiel des Teiluntersuchungsraums 04_11UR im GzME „Saxothuringikum“

Tabelle 60: Übersicht über die Bewertung des Indikators „Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)“ der Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG für den Teiluntersuchungsraum 04_11UR im GzME „Saxothuringikum“

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße beziehungsweise Indikator des Kriteriums	Bewertung
Übertragbarkeit der Eigenschaften im vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereich	Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)	Flächendifferenziert: günstig oder bedingt günstig und ungünstig

Die Gesteinsausbildung der kristallinen Wirtsgesteine im Teiluntersuchungsraum 04_11UR ist je nach Entstehungsbedingung, Ausgangsmaterial und tektonischer Entwicklung stark variierend. Einheiten (Gneise) der Großenhainer Gruppe zeigen eine Zunahme des Metamorphosegrads in Richtung Nordwest von der Amphibolitfazies bis hin zur Migmatisierung. Die Strukturen der sedimentären Ausgangsgesteine sind in Form von Einschaltungen von Kalksilikaten und Amphiboliten in den flasrigen Biotit-Zweiglimmergneisen überliefert. Die flasrigen und ebenschiefrigen Gneise der Ebersbacher Gneise weisen einen geringeren Metamorphosegrad entsprechend der Amphibolitfazies auf. Auch hier ist durch Einschaltungen von Metaarkosen und Quarziten von sedimentären Ausgangsgesteinen auszugehen. Diese hochgradig regionalmetamorphen Gesteine sind aufgrund des faziellen Wechsels und der sedimentären Ausgangsgesteine als „ungünstig“ zu bewerten.

Der cadomische Granodiorit vom Typ Dohna steht oberflächlich an und ist reich an Restiten und Xenolithen (Berger et al. 2011b). Diese anatektische Fazies ist aufgrund der unbekannten faziellen Wechsel als ungünstig zu bewerten. Die cadomischen Granodiorite des Typs Laas zeigen ein homogenes magmatisches Gefüge, und werden „günstig“ bewertet. Der Orthogneis von Coswig, auch als Pluton von Coswig oder Coswiger Granit bezeichnet, intrudierte vermutlich bei der cadomischen Orogenese und wurde postintrusiv tektonisch und thermisch überprägt (Berger et al. 2011c). Dieser Orthogneis wird als „bedingt günstig“ bewertet.

Die Diorite des Meißener Plutons (Pyroxen-Monzodiorite des Gröba-Typs und assoziierte Quarz-Diorite und Diorite) zeigen ein homogenes Gefüge (Kozdrój et al. 2001). Die Monzonit-Quarzmonzonit-Subformation (Förster et al. 2011) besteht aus Monzoniten, Quarzmonzoniten bis Granodioriten und Syenodioriten (Hornblende-Monzonite). Es handelt sich um mittel- bis grobkörnig ausgebildete magmatische Gesteine. Das Gefüge des Meißener Hauptgranits (Granodiorit) wird als mittelkörnig-gleichmäßig beschrieben (Kozdrój et al. 2001), eine textu-

Bewertung des Indikators 3.2 „Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)“ am Beispiel des Teiluntersuchungsraums 04_11UR im GzME „Saxothuringikum“

relle Ausrichtung ist nur gering ausgeprägt oder nicht vorhanden (Wenzel 2012). Die magmatischen Gesteine des Meißener Plutons sind allesamt faziell günstig ausgebildet (Abbildung 137).

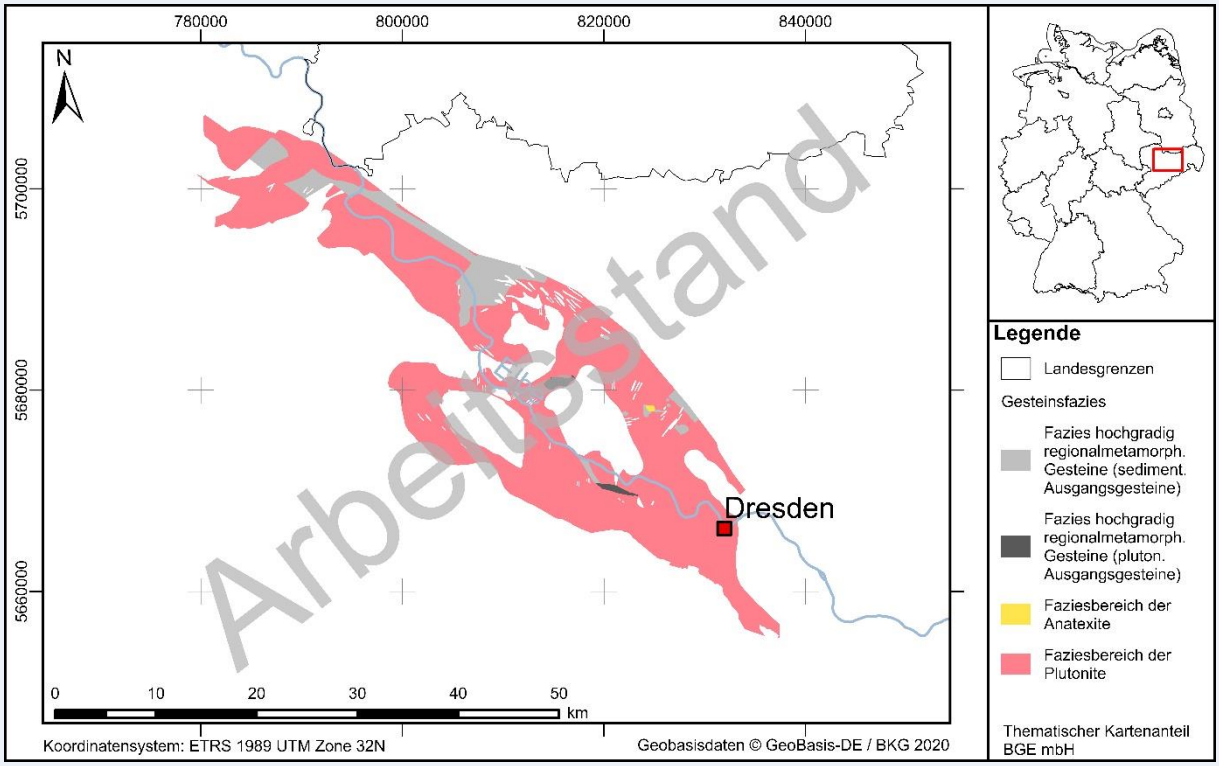


Abbildung 137: Darstellung der Gesteinsfazies im Teiluntersuchungsraum 04_11UR

Beispiel 67: Bearbeitung des Indikators 3.2 „Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)“ am Beispiel des GzME „Salzstock Bahlburg“ (02_00UR)

Bewertung des Indikators 3.2 „Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)“ am Beispiel des des GzME „Salzstock Bahlburg“ (02_00UR)

Die Bewertung des Indikators 3.2 „**Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)**“ des Kriteriums zur Bewertung der „Übertragbarkeit der Eigenschaften im vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereich“ (Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG) ist in Tabelle 61 zusammengefasst. Die Ausarbeitung, die zur Bewertung des Indikators führt wird, im Folgenden gezeigt.

Tabelle 61: Übersicht über die Bewertung des Indikators 3.2 „Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)“ der Eigenschaft „Übertragbarkeit der Eigenschaften im vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereich“ der Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG im GzME „Salzstock Bahlburg“

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße beziehungsweise Indikator des Kriteriums	Bewertung
Übertragbarkeit der Eigenschaften im vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereich	Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)	günstig

Das Kriterium und demnach auch der Indikator beziehen sich v. a. auf den einschlusswirksamen Gebirgsbereich. Da dieser zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht ausgewiesen werden kann, wird der Indikator daher auf den Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion angewendet. Die Gesteinsfazies spiegelt neben der mineralogischen Zusammensetzung und dem Gefüge auch die Prozesse und Bedingungen, die zu ihrer Existenz geführt haben, wider. Die ursprüngliche Ablagerungsfazies wurde im Wirtsgestein Steinsalz „in steiler Lagerung“ durch die Prozesse der Halokinese bzw. Halotektonik, also der Mobilisierung von Steinsalz und dessen Aufstieg mit Durchbruch des überlagernden Gebirges, überprägt. Die halokinetischen und -tektonischen Prozesse haben für alle Salzstrukturen stattgefunden, was durch deren Existens belegt wird. Die konkreten Auswirkungen dieser Prozesse auf die ursprüngliche Ablagerungsfazies und deren Verteilung im Inneren der Salzstrukturen müssen weiter untersucht werden (vgl. Kapitel 5.7.4.7).

Bis zur Fertigstellung der methodischen Arbeiten wird hier die Annahme getroffen, dass dieser Aspekt der Fazies regional einheitlich ist. Auch wenn der Bildungsprozess gleich ist, kann sich die Fazies durch die primär abgelagerte Sedimentabfolge unterscheiden. Dies sind für das GzME „Salzstock Bahlburg“ wie für die meisten Teilgebiete des Wirtsgesteins Steinsalz „in steiler Lagerung“ die ursprünglich flach gelagerten Steinsalzabfolgen der Zechsteingruppe.

Bewertung des Indikators 3.2 „Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)“ am Beispiel des des GzME „Salzstock Bahlburg“ (02_00UR)

Dabei befinden sich vor allem die mächtigen Steinsalzpartien des Hauptsalzes der Staßfurt-Formation im Fokus.

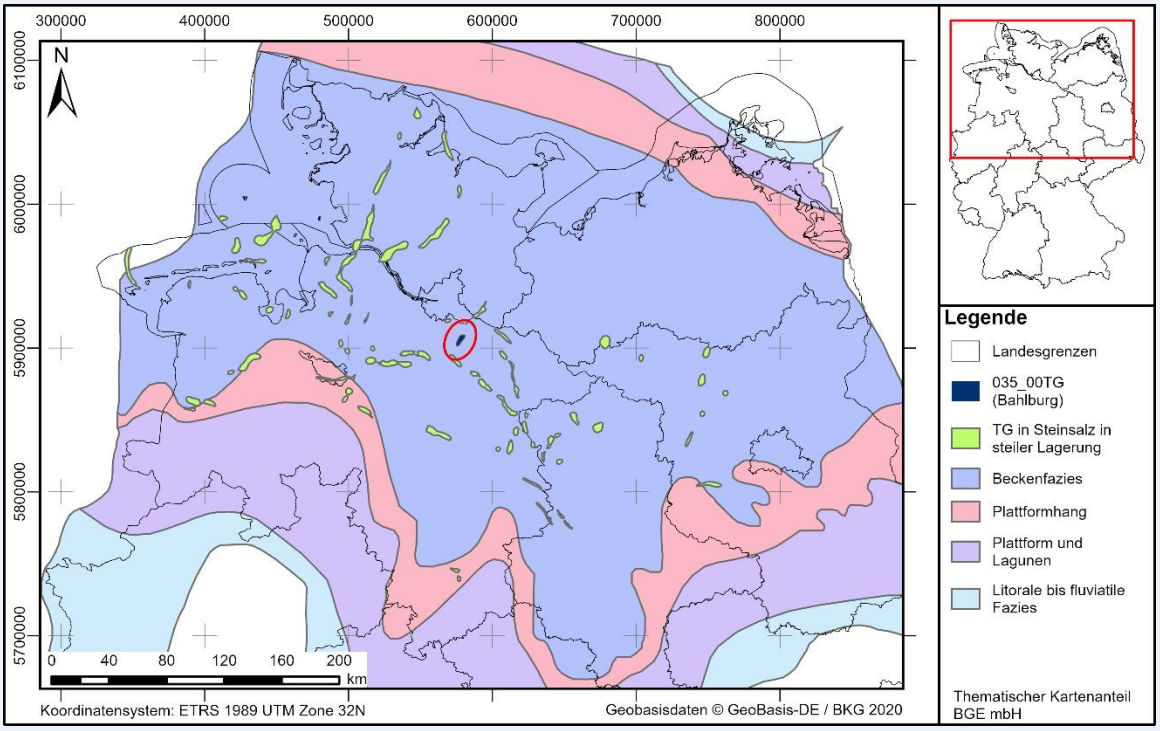


Abbildung 138: Übersicht über die Faziesverteilung der Staßfurt-Formation (z2) im norddeutschen Raum mit dazugehörigen Verbreitungsgrenzen nach Deutsche Stratigraphische Kommission (2020).
Teilgebiete im Wirtsgestein Steinsalz in steiler Lagerung sind in Grün dargestellt, das GzME „Salzstock Bahlburg“ (rot eingekreist) in Dunkelblau.

Wie bereits im Beispiel des GzME „Thüringer Becken“ beschrieben, ist der Zechstein durch vollmarine Verhältnisse und die Bildung mächtiger Steinsalzablagerungen innerhalb des Zentraleuropäischen Beckens geprägt (Meschede 2018). Durch die Subsidenz der darunterliegenden Rotliegendsedimente (Meschede 2018) bildete sich das südliche Permbecken, wobei das heutige Norddeutschland hier im Beckenzentrum zu verorten ist (Ziegler 1990).

Abbildung 138 zeigt die Faziesverteilung der Staßfurt-Formation, rot markiert ist die Lage des GzME „Salzstrock Bahlburg“ (Deutsche Stratigraphische Kommission 2020). Es ist zu erkennen, dass die Struktur im zentralen Bereich der Beckenfazies der Staßfurt-Foramtion liegt. Somit wird derzeit angenommen, dass vor allem die mobilen Steinsalze der Staßfurt-Formation an der Strukturbildung beteiligt waren. Für Teilgebiete die im (Grenz-)Bereich der Becken- und Plattformfazies liegen, wird derzeit die Fazies als regional interpretiert und somit als

Bewertung des Indikators 3.2 „Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)“ am Beispiel des des GzME „Salzstock Bahlburg“ (02_00UR)

„günstig“ bewertet. Im Rahmen der zukünftigen Arbeiten zu Schritt 2 der Phase I wird untersucht, inwiefern der Einfluss der Halokinese/Halotektonik die ursprüngliche Ablagerungsfazies innerhalb der Salzstruktur verändert und wie eine differenzierte Bewertung erfolgen kann.

Für Bahlburg wird ursprüngliche Ablagerungsfazies als regional einheitlich interpretiert und der Indikator 3.2 mit „günstig“ bewertet.

5.7.5 Spezifizierung der geogenen Prozesse

Das Auftreten von Prozessen in der Vergangenheit und ihr mögliches Auftreten in der Zukunft wird in der geowissenschaftlichen Langzeitprognose (siehe Kapitel 5.3) großräumig zusammengestellt und diskutiert. Dabei kann es notwendig sein, kleinräumig wirkende Prozesse in einem höheren Detailgrad zu bearbeiten und anschließend räumlich differenzierte zu bewerten.

In der Ableitung der Entwicklungen der wirtsgesteinsspezifischen Endlagersysteme (siehe Kapitel 8.2) werden die Auswirkungen der Prozesse in einem Endlagersystem erarbeitet. Zusätzlich werden geogene Prozesse in der qualitativen und quantitativen Analyse des Endlagersystems (§ 7 EndlSiUntV) durch den Aspekt b) (langfristige Stabilität der geologischen Verhältnisse, § 7 Abs. 6 Nr.3 Buchst. b) EndlSIUntV) bewertet (siehe Kapitel 6 und Kapitel 8). Dabei erfolgt die Bewertung des Aspekt b) in Anlehnung an Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG, der langfristigen Stabilität der günstigen Verhältnisse und ist in Kapitel 8.3 näher erläutert.

Für eine besseren Nachvollziehbarkeit wird das Vorgehen im Folgenden aufgezeigt ohne formell zwischen der Geosynthese und der Bewertung, die im Rahmen der Analyse des Endlagersystems stattfindet, zu unterscheiden. Als Beispiel wird an dieser Stelle auf den Vulkanismus des Hegau eingegangen, welcher in Teilen des Teiluntersuchungsraums 01_06 im mittleren Miozän aufgetreten ist (Beispiel 68).

Beispiel 68: Beeinflussung der langfristige Stabilität der günstigen Verhältnisse durch den Vulkanismus des Hegau im Teiluntersuchungsraum 01_06UR im GzME „Opalinuston“ (01_00UR)

Beeinflussung der langfristige Stabilität der günstigen Verhältnisse durch den Vulkanismus des Hegau im Teiluntersuchungsraum 01_06UR im GzME „Opalinuston“ (01_00UR)

Die geowissenschaftlichen Arbeiten als Grundlage für die Bewertung der Anlage 4 zu § 24 StandAG werden für das GzME „Opalinuston“ am Beispiel des Teiluntersuchungsraums 01_06UR gezeigt (Kapitel 5.6.1). Dieser Teiluntersuchungsraum hat eine flächenhafte Ausdehnung von 137,5 km² und befindet sich nordwestlich des Bodensees in der Mittelschwäbischen Senke im Bundesland Baden-Württemberg, etwa zwischen Schwäbischer Alb im Norden, dem Rhein im Süden und dem Bodenseebecken im Osten sowie westlich einer gedachten Linie zwischen Randen und Geisingen. Die wesentliche Barriere dieses Teiluntersuchungsraums wird durch die Opalinuston-Formation (bestehend aus Teufelsloch-Subformation und Zillhausen-Subformation) der stratigraphischen Einheit Mittlerer Jura gebildet.

Im Bereich des Teiluntersuchungsraums 01_06UR (Abbildung 139) liegt das miozäne Vulkanfeld des Hegau (Schreiber & Jentzsch 2021) und deckt es zu etwa 80 % ab. Im Hegau setzte vor etwa 14 Millionen Jahren im Mittelmiozän starker Vulkanismus ein, in dessen Resultat sich etwa ein Dutzend Vulkane bildeten (Geyer et al. 2011, S. 335). Das Vulkanfeld des Hegau umfasst die Reste dieser Vulkanbauten und wird in Schreiber & Jentzsch (2021) detailliert beschrieben. Die ältesten vulkanischen Aktivitäten werden nach Lippolt et al. (1963) von Tuffen in den Helicidenschichten der Oberen Meeresmolasse (K/Ar-Alter von 16,2 Ma) sowie von dem örtlich in die Obere Süßwassermolasse eingeschalteten Basisbentonit (K/Ar-Alter von 14,6 Ma) bezeugt (vgl. auch Tabelle 62).

Ursprünglich waren in dieser Region Tuffe mit einer Mächtigkeit von über 100 m verbreitet, von denen nur noch Relikte in von jüngeren Laven und Stöcken geschützten Positionen erhalten geblieben sind (Schreiner 1992, 2008). Bei den Vulkaniten handelt es sich um Olivin-Melilithite und Olivin-Nephelin-Melilithite, die von ca. 13 Ma bis ca. 6 Ma gefördert wurden (Tabelle 62), sowie um Phonolithe (Dunworth & Wilson 1998). Die Phonolithe bildeten erst in der letzten Phase der vulkanischen Aktivität Stöcke (ca. 8 – 6 Ma, Weiskirchner 1975; Schreiner 1992), die in die älteren Tuffdecken eingedrungen sind (vgl. hierzu auch Geyer et al. 2011, S. 335). Das Vulkanfeld des Hegaus wird häufig mit der besonderen Lage im Kreuzungsbereich von zwei weitreichenden Scherzonen in Verbindung gebracht (Geyer et al. 2011), der Hegau-Albstadt-Scherzone (HASZ) und der Freiburg-Bonndorf-Bodensee-Störungszone (FBBSZ). Diese haben wahrscheinlich den Aufstieg der Magmen und die Richtung der Gänge beeinflusst.

Beeinflussung der langfristige Stabilität der günstigen Verhältnisse durch den Vulkanismus des Hegau im Teiluntersuchungsraum 01_06UR im GzME „Opalinuston“ (01_00UR)

Tabelle 62: Physikalisch bestimmte Alter des Hegau-Vulkangebietes (aus Schreiber & Jentzsch (2021); Daten aus Geyer et al. (2011))

Vorkommen	Alter (Ma)	Stufe	Weiterführende Literatur
Hohenkrähen	6,9	Messinium	Weiskirchner (1972)
Gönnersbohl	8	Tortonium	Weiskirchner (1972)
Wartenberg	8,5	Tortonium	(Horn et al. 1972)
Höwenegg	11,8 – 10,8	Serravallium – Tortonium	Weiskirchner (1972), Baranyi et al. (1976)
Höwenegg	12,4 – 9,4	Serravallium – Tortonium	Lippolt et al. (1963), Weiskirchner (1972)
Hohenstoffeln	12,5	Serravallium	Lippolt et al. (1963)
Hohenstoffeln	12,9	Serravallium	Baranyi et al. (1976)
Bischofszell (CH) (Basisbentonit)	14,6 ± 0,6	Langhium	Lippolt et al. (1963)
Tengen (Helicidenmergel)	16,2 ± 0,6	Burdigalium	Lippolt et al. (1963)

Beeinflussung der langfristige Stabilität der günstigen Verhältnisse durch den Vulkanismus des Hegau im Teiluntersuchungsraum 01_06UR im GzME „Opalinuston“ (01_00UR)

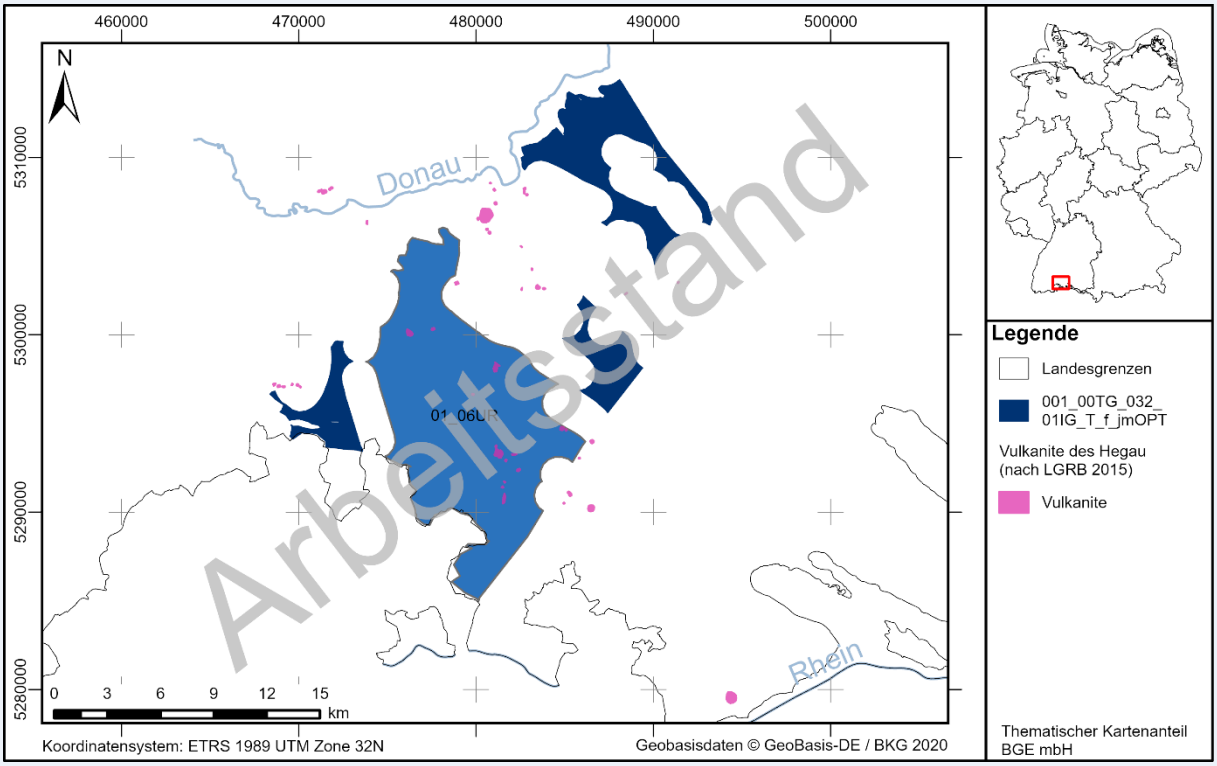


Abbildung 139: Lage der tertiären Hegau-Vulkanite (nach LGRB 2015)

Durch die Platznahme der Vulkanite hat der Hegau-Vulkanismus die Ausdehnung der Gesteine der Opalinuston-Formation, die hier bis in das Mittelmiozän anstanden, verändert. Ob hierbei auch die Durchlässigkeit des Opalinustons verändert worden ist, kann hier nicht endgültig gezeigt werden. Magmenbewegungen unter Vulkanen können aber Erdbeben und damit Spannungsänderungen und -umlagerungen hervorrufen, welche u. a. zur Remobilisierung alter und/oder Bildung neuer Klüfte und Änderungen von Kluftöffnungsweiten führen können, was sich auf die Durchlässigkeit des Opalinustons auswirkt. Hinsichtlich eines möglichen Endlagers formulieren Schreiber & Jentzsch (2021, S. 4): „*Auch wenn ein Magmazutritt in ein Endlager sehr unwahrscheinlich ist, müssen doch untertägige Auswirkungen benannt werden: Temperaturspannungen, vulkanische Beben und induzierte Bewegungen an Störungen können die Integrität des Endlagers beeinträchtigen und über den Zutritt von Grundwasser die Barriere-Wirkung verringern.*“

Durch die hohen Temperaturen der aufsteigenden Magmen wird es in den Tongesteinen im Rahmen von diagenetischen und sogar kontaktmetamorphen Prozessen zu Mineralumbildungs- und möglicherweise auch zu Kompaktionsprozessen gekommen sein, welche die Durchlässigkeit des anstehenden Opalinustons wenigstens im unmittelbaren Kontaktbereich

Beeinflussung der langfristige Stabilität der günstigen Verhältnisse durch den Vulkanismus des Hegau im Teiluntersuchungsraum 01_06UR im GzME „Opalinuston“ (01_00UR)

verändert haben dürften (Prestel & Schloz 2011).

Daraus können Änderungen im Mineralbestand („Reifung“ der Tonminerale, d. h. Umwandlung quellfähiger in nicht quellfähige Tonminerale, und Neubildung von Glimmern), der Textur (Einregelung) sowie Veränderungen bestimmter Eigenschaften (Verlust des Selbstabdichtungsvermögens, Nachlassen der Sorptionsfähigkeit für radioaktive Nuklide) resultieren (Stark et al. 2014, S. 37). Denkbar sind auch Gasfracs infolge der Aggregatzustandsänderung des Wassers (Stark et al. 2014, S. 530).

Der Hegau-Vulkanismus reicht mit den jüngsten nachgewiesenen Aktivitäten bis in den Bewertungszeitraum von 10 Millionen Jahren des Kriteriums „zur Bewertung der langfristigen Stabilität der günstigen Verhältnisse“ der Anlage 4 zu § 24 StandAG. Auf Basis dieser Informationen ist die Anlage 4 zunächst mit „bedingt günstig“ zu bewerten. Jedoch ist die Bewertung dieser Anlage mit den Betrachtungen und Analysen der geogenen Entwicklung in § 7 EndlSiUntV verzahnt (Kapitel 8.2), da das Auftreten und Wirken des Prozesses im Bewertungszeitraum wichtig ist. In die abschließende Bewertung können daher zusätzlich neben den Indikatorzeiträumen auch die Erkenntnisse über die Relevanz des Prozesses im Nachweiszeitraum einfließen, was sich unter Umständen auf die abschließende Bewertung der Anlage auswirken kann (Kapitel 8.3).

Bezogen auf den Hegau-Vulkanismus ist für eine abschließende Bewertung daher z. B. die Arbeit von Schreiber & Jentzsch (2021) zu berücksichtigen, der zufolge sich Teile des Hegaus innerhalb eines von ihnen postulierten Gebiets „*zwischen Stuttgart und der Bodenseeregion […] mit geringer Wahrscheinlichkeit für eine künftige vulkanische Aktivität in den nächsten 1 Ma*“ befinden. Außerhalb dieses Hegau-Randgebietes jedoch ist für den Hegau „*aufgrund der hohen Alter und fehlender Hinweise aus dem Mantel und den Gaszusammensetzungen keine vulkanische Aktivität in den nächsten 1 Ma anzunehmen*“ (Schreiber & Jentzsch 2021, S. 113).

5.7.6 Geologische Modelle für die quantitative Analyse des sicheren Einschlusses

Die Geosynthese stellt als Grundlage für die numerischen Transportrechnungen geologische Modelle für Teiluntersuchungsräume bereit. Dafür werden in der Geosynthese eindimensionale repräsentative geologische Profile, 2D-Profilschnitte oder geologische 3D-Modelle erstellt. Diese enthalten neben der Modelleinheit des Wirtsgesteinsbereichs mit Barrierefunktion auch alle lithologischen Einheiten des die Modelleinheit umgebenden Gebirges. Dazu zählen die die Modelleinheit unterlagernden stratigraphischen Einheiten im Liegenden sowie die überlagernden Einheiten im Hangenden bis zur Geländeoberkante.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

Der Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion sowie die weiteren geologischen Modelleinheiten werden hinsichtlich ihrer Gesteinsparameter nachvollziehbar beschrieben – also bezüglich ihrer mineralogischen, geochemischen, hydrogeologischen und petrophysikalischen Merkmale durch Parameter charakterisiert. Daten für die Gesteinsparameter und -eigenschaften stammen aus verschiedenen Quellen, z. B. aus der Fachliteratur oder aus geophysikalischen Messungen. Die umgesetzte, also die mit Werten gefüllte Parameterzusammenstellung, wird als Parameterkatalog einer Einheit bezeichnet.

Die Zusammenstellung soll in Form von ortsbezogenen Daten (also lokalen Punktdaten) für die einzelnen Untersuchungsräume erfolgen. Es zeigte sich jedoch, dass insbesondere für die GzME kaum entsprechende Daten vorliegen. Aufgrund dieser geringen Datenlage müssen die jeweiligen Parameter einerseits für die Modelleinheiten aus ähnlichen Gesteinen abgeleitet oder aus vergleichbaren Gesteinen der gleichen Formationen auf die Gesteine der Modelleinheiten im GzME übertragen werden. So wurde beispielsweise die Opalinuston-Formation im GzME „Opalinuston“ (001_00UR) mit Werten parametrisiert, die im Rahmen von Standorterkundungsprogrammen in der Schweiz ermittelt wurden. Für die Teufelsloch-Subformation kamen dabei v. a. Werte aus dem Opalinuston in der Nordostschweiz (z. B. Zürcher Weinland) zur Anwendung, für die wesentlich siltig/sandigere Zillhausen-Subformation hingegen Werte aus der „sandigen Fazies“ des Untertagelabors Mont Terri. Zum anderen können für die Parametrisierung wesentliche Daten (s. Anhang 4) direkt aus bohrlochgeophysikalischen Datensätzen in den Teiluntersuchungsräumen interpretiert und abgeleitet werden. So sind z. B. Informationen zu Temperaturverhältnissen im Untergrund sowie Tonanteilen und Porositäten der einzelnen Modelleinheiten aus bohrlochgeophysikalischen Messungen ableitbar, sofern diese vorliegen und die Möglichkeit besteht, diese zu kalibrieren.

Beispiel 69: Modellbildung für die quantitative Analyse am Beispiel des GzME „Opalinuston“ (01_00UR)

Geologische Modelle für die quantitative Analyse am Beispiel des GzME „Opalinuston“ (01_00UR)

Um eine möglichst realistische Bewertung der Abfolge in Hinblick auf die Eignung und das Rückhaltevermögen einer Abfolge bekommen zu können, werden derzeit repräsentative 1D-Profile genutzt. In diesen Profilen werden die Gesteinstypen, die den lithologischen Beschreibungen aus den Schichtenverzeichnissen der Bohrungen entnommen wurden, zu Gesteinseinheiten, sogenannten Modelleinheiten, zusammengefasst (Abbildung 140). Regionen mit unterschiedlichem Aufbau des Untergrundes werden jeweils von einem repräsentativen Profil abgedeckt. So können unterschiedliche geologische Verhältnisse im Hinblick auf deren Eignung verglichen werden.

Zur Bewertung der Eignung müssen wesentliche Gesteinseigenschaften der Modelleinheiten zusammengetragen werden (Parameterkatalog). Dabei soll die Bandbreite an Gesteinseigenschaften die Variabilität der vorkommenden Lithologien abbilden. Da keine ortsspezifischen, detaillierten Daten über die Gesteinseigenschaften des Wirtsgesteinsbereiches mit Barrierefunktion aus den Teiluntersuchungsräumen des GzME „Opalinuston“ (01_00UR) vorliegen, werden Datensätze zusammengetragen, die die Gesteinseigenschaften bestmöglich abbilden. Für die Abfolge der Opalinuston-Formation konnten zwei Modelleinheiten definiert werden, die durch unterschiedliche Gesteinseigenschaften charakterisiert sind. Diese beiden Modelleinheiten, die Zillhausen-Subformation und die Teufelsloch-Subformation, wurden in diesem Schritt durch repräsentative Datensätze aus Baden-Württemberg sowie dem schweizerischen Opalinuston (Daten aus Nagra-Bohrungen in der Nordostschweiz und dem Untergrundlabor Mont Terri) ausreichend gut charakterisiert. Dabei konnte ebenfalls auf bereits vorhandene Datenzusammenstellungen der BGR aus dem Projekt AnSichT (Jahn et al. 2016; Maßmann 2016) zurückgegriffen werden. Da es jedoch nur sehr wenige standortspezifische Daten aus dem Untersuchungsraum gibt, werden Modellparameterwerte mit Hilfe empirischer Zusammenhänge sowie einiger lokaler Daten aus beispielsweise Bohrlochgeophysikalischen Daten abgeleitet (s. Anhang 4). Für den Untersuchungsraum 01_00UR beschränken sich bohrlochgeophysikalische Daten vielfach auf eine Gamma-Ray-Messung. Mehr oder weniger vollständige Messprogramme mit Porenraum-sensitiven Logs wie Dichte, Neutron oder Soniclog liegen nur für vereinzelte Bohrungen außerhalb des Untersuchungsraumes vor. Aus den vorhandenen Gamma-Ray-Messungen konnten Vshale-Logs berechnet werden, die den Tonanteil darstellen (Abbildung 140) und zur Parametrisierung der Modelleinheiten genutzt werden konnten.

Geologische Modelle für die quantitative Analyse am Beispiel des GzME „Opalinuston“ (01_00UR)

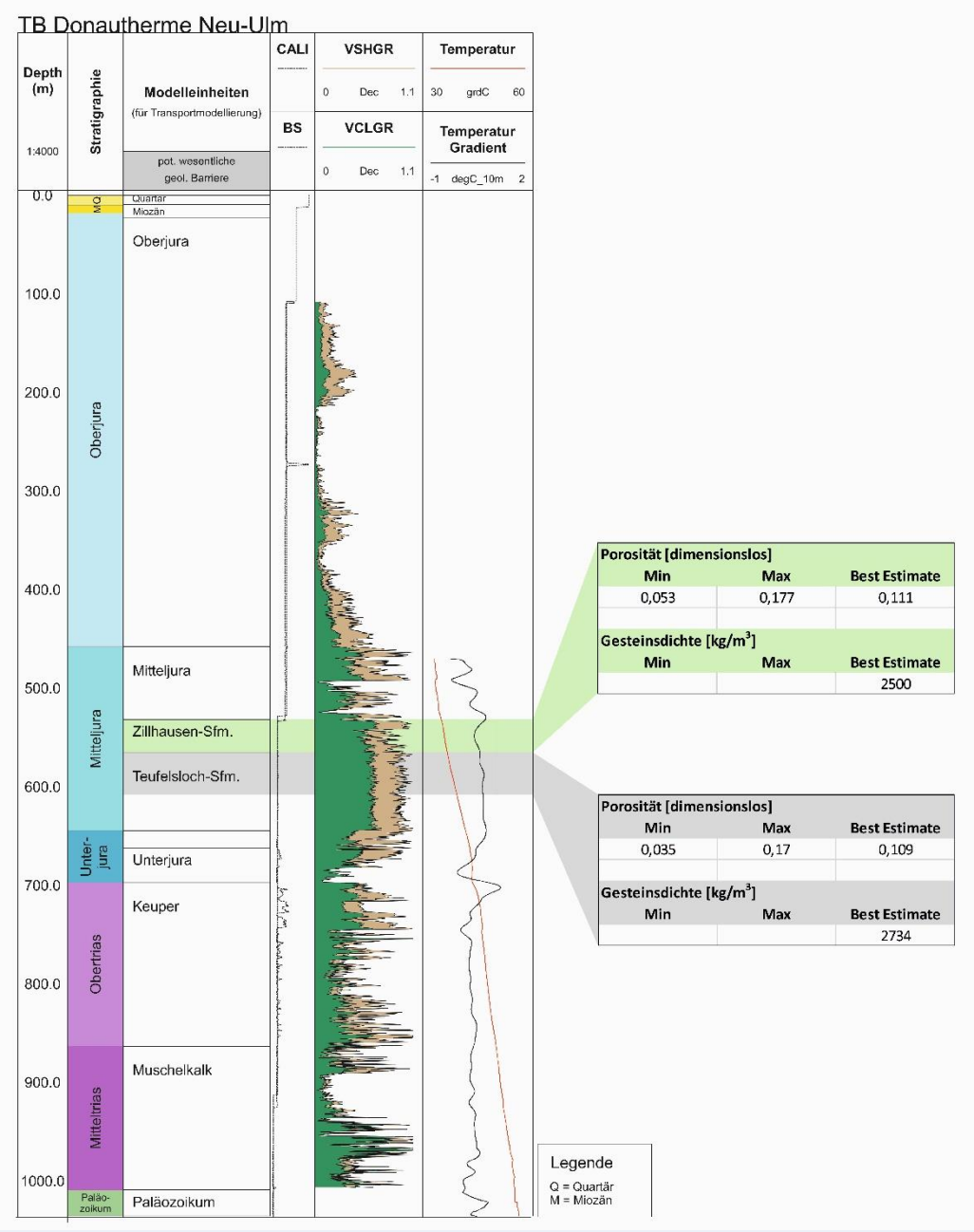


Abbildung 140: Beispiel für Modelleinheiten im GzME „Opalinuston“ am Beispiel des repräsentativen Profiles der TB Donautherme Neu-Ulm

Die Parametrisierung der Modelleinheiten erfolgt mit Hilfe von Literaturwerten oder wird direkt aus geophysikalischen Messungen hergeleitet.

Beispiel 70: Anwendung am Beispiel GzME „Salzstock Bahlburg“ (02_00UR)

Geologische Modelle für die quantitative Analyse am Beispiel des GzME „Salzstock Bahlburg“ (02_00UR)

Um das Rückhaltevermögen und die Ausbreitung von Radionukliden in Modellrechnungen zu simulieren, werden für das Wirtsgestein Steinsalz „in steiler Lagerung“ als Datengrundlage geologische 3D-Modelle der Salzstrukturen genutzt. Daraus können bei Bedarf zusätzlich 1D- als auch 2D-Profile für Modellrechnungen extrahiert werden. Die einzelnen Modelleinheiten repräsentieren häufig lithostratigraphische Einheiten, denen wesentliche Gesteinseigenschaften aus einem separat erstellten Parameterkatalog zugewiesen werden. Da keine ortsspezifischen Daten vorliegen, müssen auf Literaturwerte aus Labormessungen oder Messungen in anderen Salzstrukturen zurückgegriffen werden. Dies begründet sich in einer allgemein geringen Anzahl an Bohrungsinformationen sowie der Tatsache, dass eine Vielzahl von wesentlichen Parametern nicht typischerweise bei Bohrungen erfasst werden. Dies ist in Salinargesteinen hauptsächlich für wirtschaftlich genutzte Salzstrukturen geschehen und nur für wenige Salzstrukturen veröffentlicht. Hierzu zählen v. a. die Salzstrukturen Gorleben, Asse oder Morsleben. Für die Modelleinheiten des Deck- und Nebengebirge konnten überwiegend auf die Arbeiten im Projekt AnSichT Nord (Jahn & Sönnke 2013) zurückgegriffen werden, ergänzt durch sinnvolle Werte aus der P³-Datenbank (Bär et al. 2020).

Für die Modellbildung und numerischen Berechnungen werden die Modelleinheiten aus den geologischen 3D-Modellen der Teilgebiete (Abbildung 141) mit dazugehörigen Gesteinseigenschaften aus dem Parameterkatalog verknüpft.

Geologische Modelle für die quantitative Analyse am Beispiel des GzME „Salzstock Bahlburg“ (02_00UR)

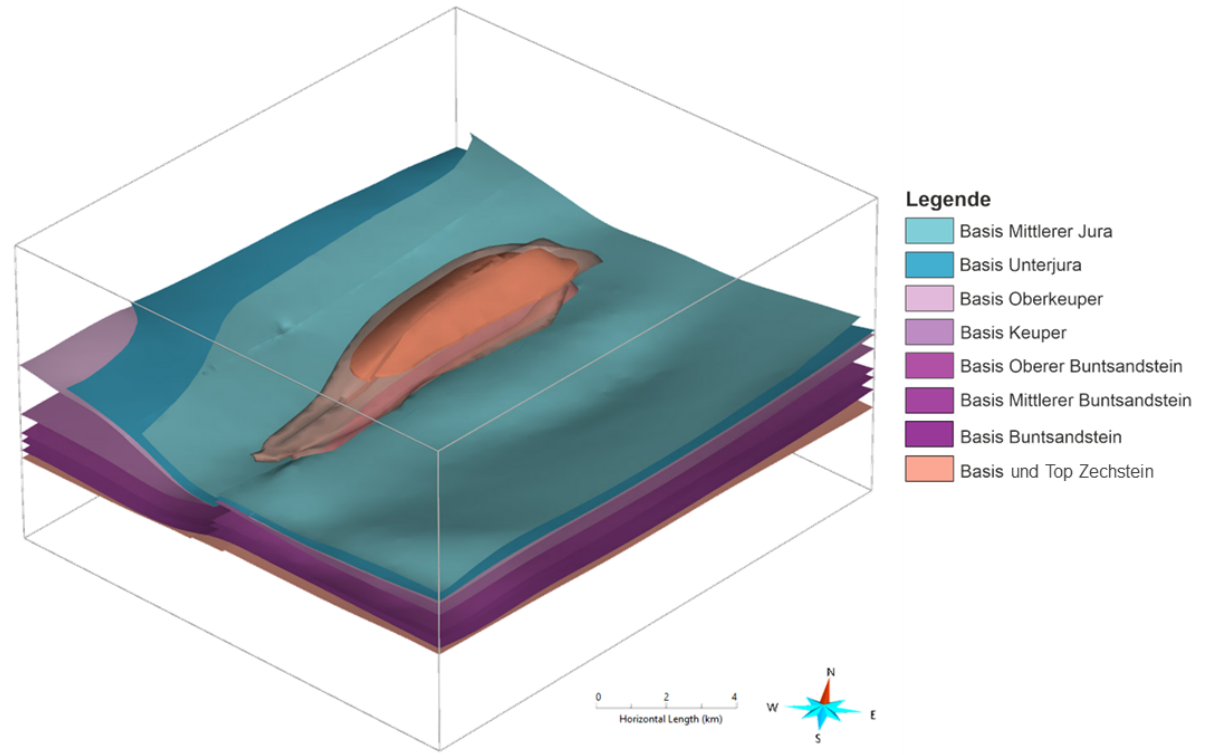


Abbildung 141: Auszug aus dem geologischen 3D-Modell des GzME „Salzstock Bahlburg“

6 Analyse des Endlagersystems (§ 7 EndlSiUntV) – qualitative Bewertung des sicheren Einschlusses

Im prozessualen Ablauf der rvSU kommt es zu einer schrittweisen Einordnung von Teiluntersuchungsräumen oder Gebieten in vier Gütebereiche, den Kategorien A bis D (siehe auch Kapitel 7 und 9). Hierbei legt die qualitative Bewertung des sicheren Einschlusses in der Analyse des Endlagersystems die Grundlage für den Prüfschritt, der zu einer Einstufung der Gebiete in die Kategorie C führen kann (vgl. Kapitel 1.2). Eine Einstufung in Kategorie D erfolgt für Gebiete, die eine Mindestanforderung nicht erfüllen oder für die ein Ausschlusskriterium vorliegt. Eine Einstufung in die Kategorie A oder B erfolgt im weiteren Verlauf anhand detaillierterer Analysen. Diese sind in Kapitel 8 näher beschrieben. Der Umgang mit mehreren vorläufigen Sicherheitskonzepten im kristallinen Wirtsgestein wird im Kapitel 4.1.3.2 erläutert.

Ziel der qualitativen Bewertung des sicheren Einschlusses ist eine sicherheitsgerichtete Eignungsprüfung innerhalb der rvSU durch eine systematische Bewertung und Überprüfung einheitlicher Kriterien, die zu einem Abschluss der Arbeiten in den jeweiligen Gebieten führen kann. Dies ist vor allem für die in Schritt 2 der Phase I notwendige Eingrenzung von Teilgebieten ein wichtiges Instrument für die Fokussierung der Arbeiten auf potenziell als Standortregion geeignete Gebiete.

Die qualitative Bewertung des sicheren Einschlusses ist nach der zielgerichteten Anwendung der Mindestanforderungen und Ausschlusskriterien der zweite Prüfschritt bei der Analyse des Endlagersystems § 7 EndlSiUntV. Die qualitative Bewertung des sicheren Einschlusses erfolgt anhand geeigneter Kriterien aus dem StandAG, die hier im Rahmen der rvSU zur Anwendung kommen. Dabei lässt sich die erreichbare Qualität des Einschlusses und die zu erwartende Robustheit des Nachweises nach § 24 StandAG anhand der Kriterien zum Transport durch Grundwasser, zur Konfiguration der Gesteinskörper, zur räumlichen Charakterisierbarkeit und zur Prognostizierbarkeit beurteilen. Diese sind in den Anlagen 1 bis 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG vom Gesetzgeber festgelegt (siehe Tabelle 63). Anhand dieser Anlagen und der zugehörigen Indikatoren kann unter anderem ein Prüfschritt für die rvSU definiert werden. Die dazugehörige Begründung zur Anwendbarkeit wird näher in Kapitel 6.2 erläutert.

Mit der Bewertung der Anlagen 1 bis 4[19] (zu § 24 Abs. 3) StandAG lassen sich systematisch und nachvollziehbar Gebiete, die für die Endlagerung ungeeignet oder weniger geeignet sind, fachlich einordnen. Sie fungieren damit in dieser ersten Analyse als wichtige Kriteriengruppe für die Bewertung des Endlagersystems, da eine gemeinsame Betrachtung der Anlagen 1 bis 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG und ihrer Indikatoren eine qualitative Aussage über die erreichbare Qualität des Einschlusses in einem einschlusswirksamen Gebirgsbereich im Rahmen der umfassenden Bewertung nach § 10 EndlSiUntV zulässt.

[19] Die Bewertung der räumlichen Charakterisierbarkeit und der langfristigen Stabilität der geologischen Verhältnisse ist speziell für die rvSU in § 7 Abs.6 Nr. 3 Buchst. a) und b) EndlSiUntV aufgeführt. Durch den beinahe gleichen Wortlaut erfolgt die Bewertung in Anlehnung an Anlage 3, dem Kriterium zur Bewertung der räumlichen Charakterisierbarkeit und Anlage 4, dem Kriterium zur Bewertung der langfristigen Stabilität der günstigen Verhältnisse des StandAG (zu § 24 Abs. 3).

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

Zusätzlich zu den Bewertungen der Anlagen 1 bis 4 (zu § 24 Abs. 3) des StandAG können ggf. noch weitere Kriterien zu einer Einstufung in die Kategorie C führen, sofern sich aus deren Bewertung im Rahmen der umfassenden Bewertung eine sehr geringe Eignung nachweisen lässt. Zusätzliche Kriterien sind beispielsweise die Betrachtung der günstigen Tiefenlage bezüglich bautechnischer Aspekte (vgl. Anhang 1). Diese können dann in der qualitativen Bewertung ausschlaggebend sein und in einer verbalargumentativen Gesamtschau zur Einstufung in Kategorie C führen.

Die im Kontext der rvSU ablaufende Einordnung der qualitativen Bewertung des sicheren Einschlusses im Rahmen der Analyse des Endlagersystems (§ 7 EndlSiUntV) ist in Abbildung 142 dargestellt.

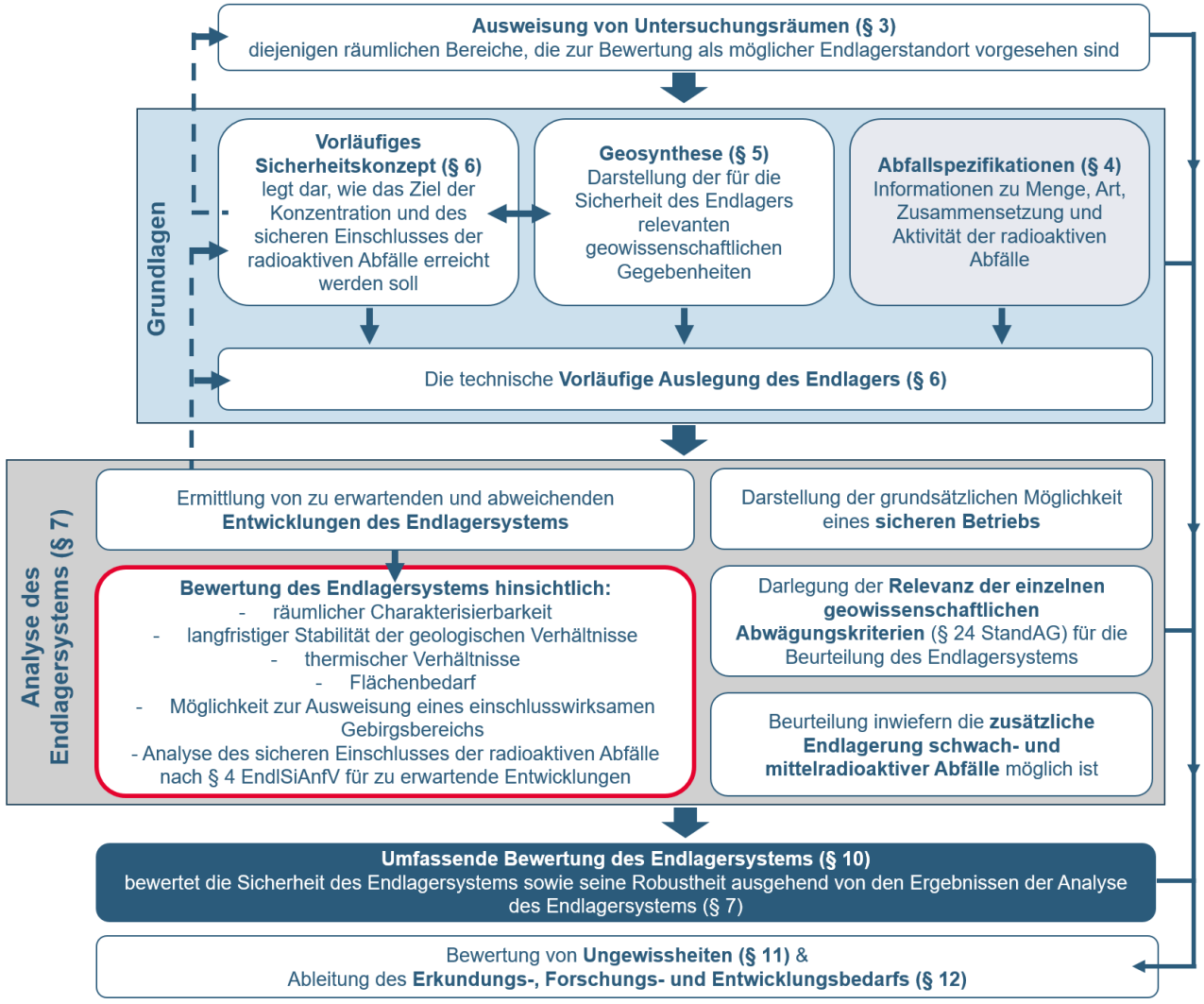


Abbildung 142: Schematische Darstellung der Arbeitsschritte der rvSU gemäß EndlSiUntV

Geschäftszeichen: SG02303/97-2/2-2022#10 – Objekt-ID: 919256 – Stand: 28.03.2022

Tabelle 63: Übersicht über die qualitative Bewertung des sicheren Einschlusses anhand der Anlagen 1 bis 4[19] (zu § 24 Abs. 3) StandAG zur Beurteilung der „erreichbare Qualität des Einschlusses und der zu erwartende Robustheit des Nachweises“ (§ 24 Abs. 3 StandAG)

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße/Indikator	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig oder ungünstig
Anlage 1: Kriterium zum Transport radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich				
1.1 Grundwasserströmung	1.1 a Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers [mm/a]	< 0,1	0,1 – 1	> 1
1.2 Grundwasserangebot	1.2 a Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit des Gesteinstyps [m/s]	$< 10^{-12}$	$10^{-12} – 10^{-10}$	$> 10^{-10}$
1.3 Diffusionsgeschwindigkeit	1.3 a Charakteristischer effektiver Diffusionskoeffizient des Gesteinstyps für tritiiertes Wasser (HTO) bei 25 °C [m^2/s]	$< 10^{-11}$	$10^{-11} – 10^{-10}$	$> 10^{-10}$
1.4 Diffusionsgeschwindigkeit	1.4 a Für Tonstein: Absolute Porosität	< 20 %	20 % – 40 %	> 40 %
	1.4 b Für Tonstein: Verfestigungsgrad	Tonstein	fester Ton	halbfester Ton

Geschäftszeichen: SG02303/97-2/2-2022#10 – Objekt-ID: 919256 – Stand: 28.03.2022

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße/Indikator	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig oder ungünstig
Anlage 2: Kriterium zur Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper				
2.1 Barrierewirksamkeit	2.1 a Barrierenmächtigkeit [m]	> 150	100 – 150	50 – 100
	2.1 b Grad der Umschließung des Einlagerungsbereichs durch einen ewG	vollständig	unvollständig, kleinere Fehlstellen in unkritischer Position	unvollständig, größere Fehlstellen in kritischer Position
2.2 Robustheit und Sicherheitsreserven	2.2 a Teufe der oberen Begrenzung des erforderlichen ewG [m u. GOK]	> 500	300 – 500	Keine Angabe
2.3 Volumen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs	2.3 a flächenhafte Ausdehnung bei gegebener Mächtigkeit (Vielfaches des Mindestflächenbedarfs)	>> 2-fach	etwa 2-fach	<< 2-fach
2.4 Indikator „Potenzialbringer“ bei Tonstein Anschluss von wasserleitenden Schichten in unmittelbarer Nähe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs/ Wirtsgesteinskörpers an ein hohes hydraulisches Potenzial verursachendes Gebiet	2.4 a Vorhandensein von Gesteinsschichten mit hydraulischen Eigenschaften und hydraulischem Potenzial, die die Induzierung bzw. Verstärkung der Grundwasserbewegung im ewG ermöglichen können	keine Grundwasserleiter als mögliche Potenzialbringer in unmittelbarer Nachbarschaft zum Wirtsgestein/ ewG vorhanden	keine Angabe	Grundwasserleiter in Nachbarschaft zum Wirtsgestein/ewG vorhanden

Geschäftszeichen: SG02303/97-2/2-2022#10 – Objekt-ID: 919256 – Stand: 28.03.2022

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße/Indikator	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig oder ungünstig
Anlage 3: Kriterium zur Bewertung der räumliche Charakterisierbarkeit				
3.1 Ermittelbarkeit der Gesteinstypen und ihrer charakteristischen Eigenschaften im vorgesehenen Endlagerbereich, insbesondere im vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereich	3.1 a Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich	gering	deutlich, aber bekannt bzw. zuverlässig erhebbar	erheblich und/oder nicht zuverlässig erhebbar
	3.1 b Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften	gleichmäßig	kontinuierliche, bekannte räumliche Veränderungen	diskontinuierliche, nicht ausreichend genau vorhersagbare räumliche Veränderungen
	3.1 c Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit	weitgehend ungestört (Störungen im Abstand > 3 km vom Rand des ewG), flache Lagerung	wenig gestört (weitständige Störungen, Abstand 100 m bis 3 km vom Rand des ewG), Flexuren	gestört (engständig zerblockt, Abstand < 100 m), gefaltet
3.2 Übertragbarkeit der Eigenschaften im vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereich	3.2 a Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)	Fazies regional einheitlich	Fazies nach bekanntem Muster wechselnd	Fazies nach nicht bekanntem Muster wechselnd

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße/Indikator	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig oder ungünstig
Anlage 4: Kriterium zur Bewertung der langfristigen Stabilität der günstigen Verhältnisse				
4.1 langfristige Stabilität der wichtigen sicherheitsgerichteten geologischen Merkmale	4.1 a Zeitspanne, über die sich die Mächtigkeit des ewG nicht wesentlich verändert hat	wenn seit mehr als zehn Millionen Jahren keine wesentliche Änderung des betreffenden Merkmals aufgetreten ist	wenn seit mehr als einer Million, aber weniger als zehn Millionen Jahren keine solche Änderung aufgetreten ist	wenn innerhalb der letzten eine Million Jahre eine solche Änderung aufgetreten ist
	4.1 b Zeitspanne, über die sich die Ausdehnung des ewG nicht wesentlich verändert hat			
	4.1 c Zeitspanne, über die sich die Gebirgsdurchlässigkeit des ewG nicht wesentlich verändert hat			

Geschäftszeichen: SG02303/97-2/2-2022#10 – Objekt-ID: 919256 – Stand: 28.03.2022

6.1 Bewertung der Anlagen 1 bis 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG

Zunächst erfolgt eine Bewertung der Anlagen 1 bis 4[19] (zu § 24 Abs. 3) StandAG auf Basis der Geosynthese nach § 5 EndlSiUntV in der Analyse des Endlagersystems nach § 7 EndlSiUntV. Dabei werden Untersuchungsräume, Teiluntersuchungsräume oder, sofern eine flächendifferenzierte Bewertung möglich und nötig ist, Teile von Teiluntersuchungsräumen bewertet.

Die Einordnung der Wertungsgruppen der Anlage 1 und 2 (zu § 24 Abs. 3) StandAG erfolgt entsprechend dem Gesetzestext anhand von Wertungsgruppen in „günstig“, „bedingt günstig“ und „weniger günstig“. Für die Anlagen 3 und 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG wird im Gesetz anstatt „weniger günstig“ die Wertungsgruppe „ungünstig“ verwendet.

Hintergrundinformationen zum theoretischen Verständnis der Anlagen sowie Beispiele für die Ausarbeitung und Bewertung einzelner Indikatoren werden ausführlich an anderer Stelle in den Kapiteln zur Geosynthese (Kapitel 5.7) und Analyse des Endlagersystems (Kapitel 8.3) angeführt.

Die Anlage 1 (zu § 24 Abs. 3) StandAG zum *Transport radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegung im einschlusswirksamen Gebirgsbereich* wird hauptsächlich anhand von Parametern bewertet, die in den meisten Fällen anhand von Analogiebetrachtungen innerhalb der Geosynthese für die Formation abgeleitet wurden. Im Gegensatz dazu ergibt sich die Bewertung der Anlage 2 (zu § 24 Abs. 3) StandAG, dem Kriterium zur *Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper* aus der geowissenschaftlichen Interpretation unterschiedlichster Geodaten (siehe Kapitel 5.7.2). Die Bewertung der *räumlichen Charakterisierbarkeit* (Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG) ist in den rvSU in § 7 Abs. 6 Nr. 3 EndlSiUntV speziell für die rvSU nach § 14 Abs. 1 StandAG in Aspekt a) aufgeführt und basiert hauptsächlich auf den geowissenschaftlichen Arbeiten zum Internbau der Wirtsgesteine mit Barrierefunktion. Dies wird ausführlich in Kapitel 5.7.1 erläutert und beispielhaft gezeigt. Die *Langfristige Stabilität der geologischen Verhältnisse* (Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG) wird auf Basis der geowissenschaftlichen Langzeitprognose analysiert und dann anhand des Aspekt b) nach § 14 Abs. 1 StandAG bewertet. Das dazugehörige Vorgehen wird in Kapitel 8 (*Analyse des Endlagersystems Aspekt b)* beschrieben.

6.2 Begründung zur Anwendung der Anlagen 1 bis 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG im Rahmen der Analyse des Endlagersystems

Die Anlagen 1 bis 4 (zu § 24 StandAG) bilden eine Kriteriengruppe, mit der *„Die erreichbare Qualität des Einschlusses und die zu erwartende Robustheit des Nachweises“* bewertet werden soll. Wie im Vorhaben RESUS (Mönig et al. 2020b) und vom Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (Gewichtungsgruppe I nach AkEnd 2002, S. 103/104) eingestuft, erhalten sie somit eine besondere Bedeutsamkeit für die Beurteilung eines möglichen Endlagerstandorts. Die Kriterien 1 und 2 zum Transport radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen und zur Konfiguration der Gesteinskörper bauen dabei auf den Mindestanforderungen zu Gebirgsdurchlässigkeit, Mächtigkeit und Tiefenlagen eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs auf. Damit werden bevorzugte Wertebereiche festgelegt, die höhere Sicherheitsreserven jenseits der grundlegenden Sicherheit der in den Mindestanforderungen festgelegten Werte darstellen.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

Die Kriterien 3 und 4 zur räumlichen Charakterisierbarkeit und zur Prognostizierbarkeit der Stabilität der geologischen (günstigen) Verhältnisse bevorzugen eine sowohl räumlich als auch zeitlich geringe Variabilität, die Grundlage für zuverlässige Sicherheitsbewertungen sind. Sie beeinflussen damit maßgeblich die Robustheit der Nachweisführung an einem möglichen Standort.

Aus den Erfahrungen bei der Anwendung der Anlagen 1 bis 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG in Schritt 1 der Phase I ist zu erwarten, dass hier voraussichtlich eine genügend hohe Anzahl von Gebieten überwiegend günstig bewertet werden kann (BGE 2020g). Kann ein potenzieller Endlagerstandort diese Sicherheitsreserven und Perspektiven zur Aussagesicherheit nicht in überwiegend günstigem Maß vorweisen, ist davon auszugehen, dass dies nicht durch bessere Performanz in nachgeordneten Kriterien aufgewogen werden kann. Dadurch entsteht eine Hürde für Gebiete, die hier nicht überwiegend günstig abschneiden, da diese Bewertung durch die hohe Bedeutsamkeit der Anlagen 1 bis 4 (zu § 24 Abs. 3) in einer Gesamtschau nur geringfügig durch andere Kriterien kompensiert werden kann. Eine weitere detailliertere Bearbeitung ist dann nicht zielführend, da dieses Gebiet aus diesem Grund nicht als Standortregion für die übertägige Erkundung in Frage kommt. Dementsprechend können aus der Bewertung der Anlagen 1 bis 4[19] (zu § 24 Abs. 3) in der umfassenden Analyse nach § 10 EndlSiUntV verschärfte Anforderungen an die Qualität des Einschlusses als Prüfkriterium abgeleitet werden (vgl. Kapitel 7).

Fachlich zeigen die Inhalte der Anlagen 1 bis 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG speziell für rvSU eine hohe Übereinstimmung mit den Inhalten der Analyse des Endlagersystems § 7 EndlSiUntV. Diese sind in § 7 Abs. 3 EndlSiUntV speziell für die rvSU nach § 14 Abs. 1 StandAG neben weiteren Inhalten in den Aspekte a) bis f) aufgeführt. Eine Gegenüberstellung der Aspekte mit den Anlagen 1 bis 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG zeigt, dass speziell diese Kriterien des StandAG auch innerhalb der Systemanalyse als Bewertungsmaßstab dienen können (Tabelle 64). Aus der Gegenüberstellung ergibt sich, dass die Bewertung der Indikatoren der Anlagen 1 bis 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG als vereinfachte Analyse des Endlagersystems fungieren können, die die wichtigsten sicherheitsgerichteten Aspekte, die in der EndlSIUntV definiert sind, abdeckt.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

Tabelle 64: Die Gegenüberstellung der Anlagen 1 bis 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG mit den Aspekt a) bis f) der Analyse des Endlagersystems § 7 EndlSiUntV zeigt fachlich eine große Übereinstimmung.
Dies verdeutlicht, dass sich die Anlagen 1 bis 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG zur Bewertung der Qualität des sicheren Einschlusses im Rahmen der rvSU eignen.

Geowissenschaftliches Abwägungskriterium beziehungsweise bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße beziehungsweise Indikator des Kriteriums	Zusammenhang mit zu bewertendem(n) Aspekt(en)
Anlage 1: Kriterium zur Bewertung des Transportes radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich	**Indikator 1.1a – 1.4b** Abstandsgeschwindigkeit, Gebirgsdurchlässigkeit, effektiver Diffusionskoeffizient (und zugehörige Ersatzindikatoren im Tonstein)	**Aspekte e) und f)** können auf Grundlage der quantitativen Indikatoren der Anlage 1 mittels Modelrechnungen bewertet werden. Der Transport radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen ist einer der Haupteinflussgrößen zur Bewertung der Ausbreitungspfade und damit auf die Möglichkeit zur Ausweisung des ewG und Bewertung der Barrierewirkung der unversehrten Barriere.
Anlage 2: Kriterium zur Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper – Barrierewirksamkeit	**Indikator 2.1a und 2.1b** Barrierenmächtigkeit [m], Grad der Umschließung des Einlagerungsbereichs durch einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich	**Aspekte e) und f)** können auf Grundlage der Indikatoren zur Barrierewirksamkeit mittels Modelrechnungen bewertet werden. Die Konfiguration der Gesteinskörper ist eine der Haupteinflussgrößen zur Bewertung der Ausbreitungspfade und damit auf die Möglichkeit zur Ausweisung des ewG und Bewertung der Barrierewirkung der unversehrten Barriere.
Anlage 2: Kriterium zur Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper – Robustheit und Sicherheitsreserven	**Indikator 2.2a** Teufe der oberen Begrenzung des erforderlichen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs [m unter Geländeoberfläche]	In **Aspekt f)** ist für die zu erwartenden Entwicklungen die Möglichkeit des sicheren Einschlusses der Radionuklide nach § 4 EndlSiAnfV zu bewerten. Hierbei ist die Teufe der oberen Begrenzung des erforderlichen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs eine wichtige Eingangsgröße.

Geowissenschaftliches Abwägungskriterium beziehungsweise bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße beziehungsweise Indikator des Kriteriums	Zusammenhang mit zu bewertendem(n) Aspekt(en)
Anlage 2: Kriterium zur Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper – Volumen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs	**Indikator 2.3a** Flächenhafte Ausdehnung bei gegebener Mächtigkeit (Vielfaches des Mindestflächenbedarfs)	In **Aspekt d)** und Indikator 2.4 werden jeweils Flächenbedarfe zur Realisierung des Endlagerbergwerks bewertet. Die Flächenbedarfe wiederum basieren hauptsächlich auf Analysen zu den thermischen Verhältnissen im Endlagersystem, **Aspekt c)**.
Anlage 2: Kriterium zur Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper – Indikator „Potenzialbringer“ bei Tonstein Anschluss von wasserleitenden Schichten in unmittelbarer Nähe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs/ Wirtsgesteinkörpers an ein hohes hydraulisches Potenzial verursachendes Gebiet	**Indikator 2.4a** Vorhandensein von Gesteinsschichten mit hydraulischen Eigenschaften und hydraulischem Potenzial, die die Induzierung beziehungsweise Verstärkung der Grundwasserbewegung im einschlusswirksamen Gebirgsbereich ermöglichen können.	**Aspekte e) und f)** basieren im Tonstein auf Informationen zu Potenzialbringern, die zu einer Grundwasserbewegung im ewG führen könnten. Der Transport radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen ist einer der Haupteinflussgrößen zur Bewertung der Ausbreitungspfade und damit auf die Möglichkeit zur Ausweisung des ewG und Bewertung der Barrierewirkung der unversehrten Barriere.
Anlage 3: Kriterium zur Bewertung der räumlichen Charakterisierbarkeit	**Indikator 3.1a – 3.2a** Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich, räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften, Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)	**Aspekt a)** (die räumliche Charakterisierbarkeit des Endlagersystems) hat einen ähnlichen Wortlaut wie Anlage 3. Auch diese bezieht sich durch die Bewertung des Endlagerbereichs analog zu Aspekt a auf den Gebirgsbereich, in dem ein Endlagersystem realisiert werden soll (§ 2 StandAG). Dementsprechend werden Anlage 3 und Aspekt a) identisch angewendet.

Geowissenschaftliches Abwägungskriterium beziehungsweise bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße beziehungsweise Indikator des Kriteriums	Zusammenhang mit zu bewertendem(n) Aspekt(en)
Anlage 4: Kriterium zur Bewertung der langfristigen Stabilität der günstigen Verhältnisse (Prognostizierbarkeit)	**Indikator 4.1a – 4.1c** Zeitspannen, über die sich die Betrachtungsmerkmale „Mächtigkeit“, flächenhafte beziehungsweise räumliche „Ausdehnung“ und „Gebirgsdurchlässigkeit“ des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht wesentlich verändert haben	**Aspekt b)** (die langfristige Stabilität der geologischen Verhältnisse) hat einen ähnlichen Wortlaut wie Anlage 4. Diese bezieht sich explizit nur auf die geologischen Verhältnisse. Dementsprechend werden Anlage 4 und Aspekt b) identisch angewendet.

7 Umfassende Bewertung anhand der qualitativen Bewertung des sicheren Einschlusses (§ 10 EndlSiUntV)

Das Ziel der umfassenden Bewertung (§ 10 EndlSiUntV) ist die Bewertung der Sicherheit und Robustheit des Endlagersystems je Untersuchungsraum, ausgehend von den Ergebnissen der Analyse des Endlagersystems (§ 7 EndlSiUntV). Es erfolgt eine Gesamtbewertung je Untersuchungsraum, die jedoch gebietsspezifisch ausdifferenziert wird, sofern bewertungsrelevante Größen räumlich variieren (Einstufung der Gebiete in unterschiedliche Kategorien A bis D). Die umfassende Bewertung (§ 10 EndlSiUntV) wird in Kapitel 9 ganzheitlich erläutert (siehe Abbildung 143).

In Ergänzung dazu wird im Folgenden das Vorgehen erläutert, welches zur Einstufung von Gebieten in die Kategorien D und C führt. Durch diese Einstufung wird in der umfassenden Bewertung (§ 10 EndlSiUntV) gezeigt, dass die Anforderungen an den sicheren Einschluss nicht oder nur mit einer geringen Robustheit eingehalten werden können. Diese Gebiete werden nicht weiter im Rahmen der rvSU bearbeitet (z. B. weitere Paragrafen oder quantitative Analysen). Dadurch findet auch kein Vergleich oder eine Abwägung mit anderen Gebieten im Rahmen der Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien oder ggf. der planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien statt. Das führt letztendlich dazu, dass die Gebiete nicht als Standortregion für eine übertägige Erkundung vorgeschlagen werden.

Eine Einstufung von Gebieten in Kategorie D erfolgt anhand der Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen, die in §§ 22 und 23 StandAG festgelegt sind. Ein Gebiet ist ungeeignet für die Endlagerung, sobald dort ein Ausschlusskriterium erfüllt ist, oder nachgewiesen wurde, dass eine Mindestanforderung nicht erfüllt ist. Der Nachweis erfolgt durch die zielgerichtete Anwendung der Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen im Rahmen der rvSU und wird in Kapitel 1.4 sowie den Kapiteln 5, 5.4 und 5.5 näher erläutert. Für Gebiete, die als Standortregionen für die übertägige Erkundung vorgeschlagen werden, muss systematisch überprüft werden, dass kein Ausschlusskriterium erfüllt ist und alle Mindestanforderungen eingehalten werden. Wenn für die Bewertung eines Gebietes die notwendigen Daten erst in einer späteren Phase des Standortauswahlverfahrens erhoben werden können, dann gilt die jeweilige Mindestanforderung bis zur Erhebung dieser Daten als erfüllt, soweit dies aufgrund der vorhandenen Datenlage zu erwarten ist (§ 23 StandAG).

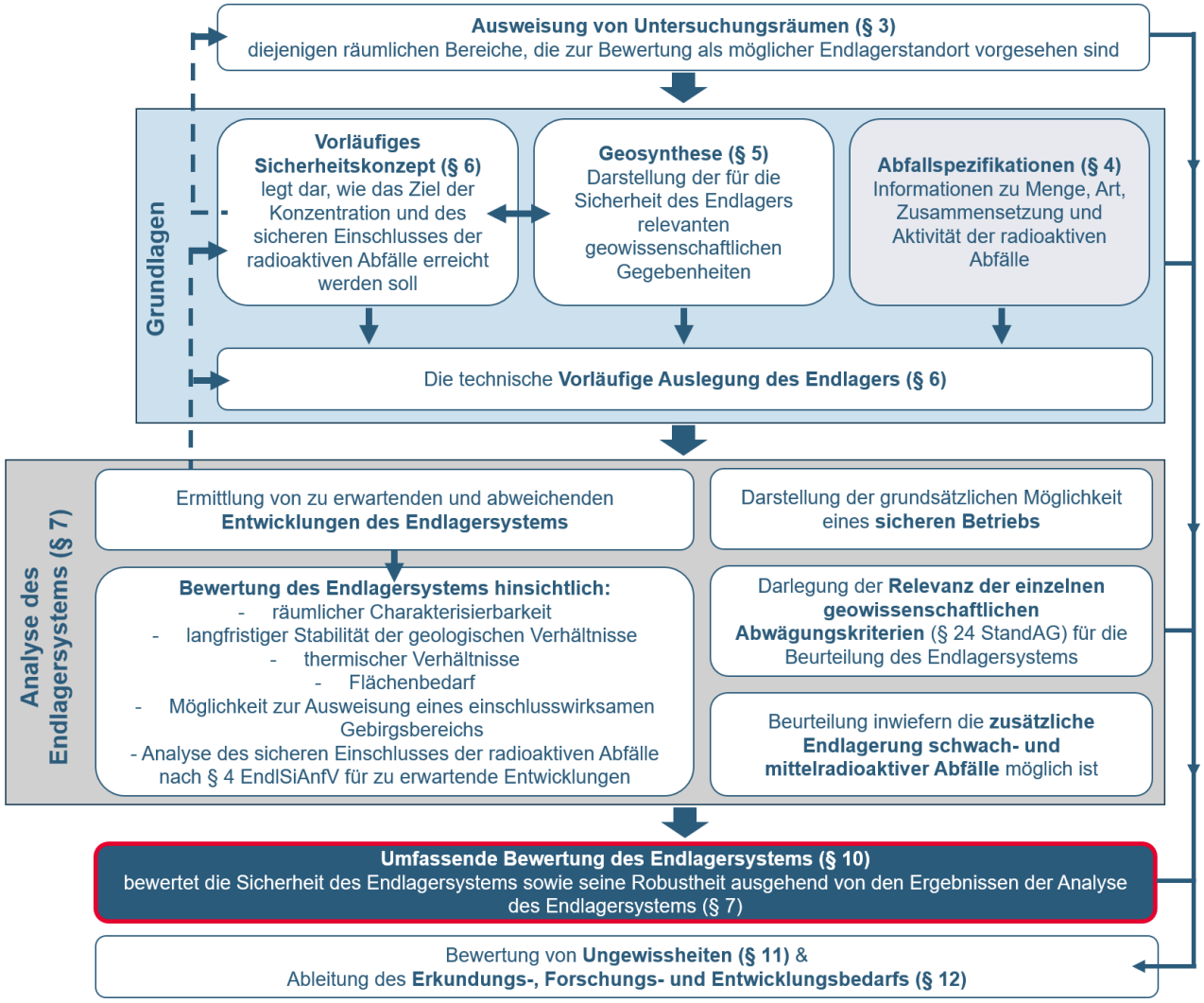


Abbildung 143: Schematische Darstellung der Arbeitsschritte der rvSU gemäß EndlSiUntV. In der umfassenden Bewertung werden Gebiete anhand der Prüfschritte zu den Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen sowie der qualitativen Überprüfung des sicheren Einschlusses bewertet.

Eine Einstufung von Gebieten in Kategorie C im Rahmen der umfassenden Bewertung (§ 10 EndlSiUntV) erfolgt anhand der Ergebnisse der qualitativen Bewertung des sicheren Einschlusses (§ 7 EndlSiUntV) anhand der Anlagen 1 bis 4[20] (zu § 24 Abs. 3) des StandAG sowie weiteren, z. B. bautechnischen Aspekten, sofern sich aus deren Bewertung im Rahmen der umfassenden Bewertung eine sehr geringe Eignung nachweisen lässt. Die qualitative Bewertung des sicheren Einschlusses ist in Kapitel 6 beschrieben. Ein im Grundsatz vergleichbares Vorgehen hat die NAGRA (Nagra

[20] Die Bewertung der räumlichen Charakterisierbarkeit und der langfristigen Stabilität der geologischen Verhältnisse ist speziell für die rvSU in § 7 Abs.6 Nr. 3 Buchst. a) und b) EndlSiUntV aufgeführt. Durch den beinahe gleichen Wortlaut erfolgt die Bewertung in Anlehnung an Anlage 3, dem Kriterium zur Bewertung der räumlichen Charakterisierbarkeit und Anlage 4, dem Kriterium zur Bewertung der langfristigen Stabilität der günstigen Verhältnisse des StandAG (zu § 24 Abs. 3).

2008a) im Schweizer Suchverfahren angewendet, um die Langzeitsicherheit eines Endlagers und deren Machbarkeit zu gewährleisten. Hier wurden an Indikatoren mit hoher Relevanz bei der Endlagersicherheit verschärfte Anforderungen gestellt und diese im Rahmen der Standortevaluation angewendet.

Neben der qualitativen Bewertung können auch Ergebnisse aus weiteren Prüfschritten zur Einstufung in Kategorie C führen (sicherer Einschluss kann anhand numerischer Modellrechnungen nicht nachgewiesen werden (Kapitel 8).

7.1 Ableitung und Definition eines Prüfschritts anhand der Anlagen 1 – 4 des StandAG

Die Entscheidung zur Einstufung in Kategorie C soll nach Möglichkeit systematisch für alle Gebiete anhand der Bewertungen der Indikatoren der Anlagen 1 bis 4 (zu § 24 Abs. 3) des StandAG erfolgen. Deshalb bedarf es einer Ableitung und Definition des Prüfschritts, die wirtsgesteinsübergreifend anwendbar ist.

Der Ableitung des Prüfschritts liegen folgende Annahmen zu Grunde:

- Der Prüfschritt kann nur auf ein Endlagersystem vom Typ 1 (mit einschlusswirksamem Gebirgsbereich) angewendet werden.

  Begründung: Die meisten Indikatoren der Anlagen 1 bis 4 beziehen sich explizit auf einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich. Dementsprechend kann der Prüfschritt für ein Konzept ohne einschlusswirksamen Gebirgsbereich nicht in gleicher Form zielführend angewendet werden. In diesen Fällen muss der sichere Einschluss über die technischen Barrieren nachgewiesen werden und der Bezugspunkt in den Anlagen 1 und 3 nach § 24 Abs. 2 StandAG auf den Einlagerungsbereich gelegt werden.

- Die Einstufung in Kategorie C sollte nicht auf Basis der Bewertungen eines singulären Kriteriums erfolgen.

  Begründung: Bei der Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien (zu § 24 StandAG) heißt es in der zugehörigen Begründung zum Gesetzentwurf (StandAG ; BT-Drs. 18/11398), dass ein *„einzelnes Abwägungskriterium nicht hinreichend* (ist), *um eine günstige geologische Gesamtsituation nachzuweisen oder auszuschließen“.* Analog sollte auch in der qualitativen Bewertung des sicheren Einschlusses ein singuläres Kriterium ohne weiteres nicht hinreichend für eine Einstufung in Kategorie C sein. Jedoch kann davon ggf. fachlich begründet abgewichen werden, sofern auf Grund der Bewertung eines Kriteriums nicht von einer überwiegend günstigen Bewertung durch eine Gesamtbetrachtung der Anlagen 1 bis 4 auszugehen ist.

- Der Prüfschritt erfolgt auf Ebene der Einzelindikatoren ohne Aggregierung.

  Begründung: Folgt man dem Aggregierungsschema (Vorhaben RESUS, Mönig et al. 2020b), so werden mit wenigen Ausnahmen jeweils die Indikatoren mit der schlechtesten Wertungsgruppe schrittweise zur Bewertung des Kriteriums aggregiert. D. h., dass in den meisten Fällen die Bewertung **eines** Indikators zur Bewertung des Kriteriums führt, unabhängig von der

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

Bewertung der restlichen Indikatoren. Speziell für Anlage 2, der Konfiguration der Gesteinskörper kann dies problematisch sein, da die Einzelindikatoren unabhängige Sachverhalte bewerten und dementsprechend auch unabhängig in die Bewertung einfließen sollten.

- Die Einstufung in Kategorie C erfolgt zunächst ohne Gewichtung der Kriterien, bewertungsrelevanter Eigenschaften und Indikatoren. Die Indikatoren werden bezüglich ihrer Relevanz zunächst als gleichwertig angesehen.

  Begründung: Der Prüfschritt ist eine erste Abschätzung, die in der weiteren Bearbeitung bei geeigneten Gebieten verfeinert wird. Eine detaillierte Berücksichtigung der Relevanz der einzelnen Indikatoren würde nicht dem Ziel einer einfachen und leicht nachvollziehbaren Bewertung folgen, da dies detaillierte Untersuchungen voraussetzen würde. Diese folgen innerhalb der Bewertung der Relevanz der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien in nachfolgenden Arbeitsschritte für Gebiete der Kategorie A und sind ein zusätzliches Ergebnis der rvSU. Jedoch können generelle Wichtungsaspekte im Einzelfall verbalargumentativ bei der Gesamtbewertung hinzugezogen werden und damit kann in Einzelfällen verbalargumentativ begründet von einer schematischen Bewertung abgewichen werden.

Im Folgenden wird beispielhaft **eine mögliche Option** für die Definition des Prüfschritts zur Einstufung in Kategorie C aufgeführt. Diese Option muss als vorläufig angesehen werden, da sie bisher „nur“ im Rahmen der Testung in den GzME ihre praktische Anwendbarkeit bewiesen hat. Sollten durch die Bearbeitung und Bewertung der weiteren Gebiete in Schritt 2 der Phase I neue Erkenntnisse vorliegen, die diese Einschätzung zweifelhaft erscheinen lassen, so wird die Definition des Prüfschritts angepasst und auf alle Gebiete erneut angewendet.

Das Prüfkriterium ist **nicht** erfüllt (Einstufung in Kategorie C), wenn eine der folgenden Optionen zutrifft:

1. Mindestens drei der Indikatoren der Anlagen 1 bis 4 werden mit bedingt günstig bewertet und diese „bedingt günstige Bewertungen entstammen aus mindestens zwei unterschiedlichen Anlagen.
2. Mindestens einer der Indikatoren der Anlagen 1 bis 4 wird mit ungünstig oder weniger günstig bewertet und ein weiterer mit bedingt günstig, ungünstig oder weniger günstig. Diese bedingt günstige, weniger günstige oder ungünstige Bewertung entstammt aus mindestens zwei unterschiedlichen Anlagen.
3. Wenn sich verbalargumentativ eine sehr geringe Eignung durch die Betrachtung zusätzlicher Aspekte nachweisen lässt.

Zu Option 3: In der qualitativen Bewertung können über die Anlagen 1 bis 4 (zu § 24 Abs. 3 StandAG) zusätzliche Aspekte für die Einstufung von Gebieten in die Kategorie C hinzugezogen werden. Dies erlaubt es, verbalargumentativ wichtige Erkenntnisse zu berücksichtigen. Dadurch können Gebiete, die nicht überwiegend günstig in ihrer Eignung als Endlagerstandort sind, fachlich begründet in Kategorie C eingestuft

werden. Zum Beispiel werden bautechnische Aspekte und Aspekte der Betriebssicherheit in die Prüfung einbezogen, wenn Erkenntnisse vorliegen, dass sich dadurch eine geringe Eignung als Endlagerstandort ergibt. Dies wird im Kapitel 7.4 anhand der Tiefenlage des Opalinustons beispielhaft gezeigt. Des Weiteren entstehen durch flächendifferenzierte Bewertungen oft kleinere Flächen, die durch eine verbalargumentative Betrachtung eingestuft werden können.

Sobald das Prüfkriterium (Einstufung in Kategorie C) nicht erfüllt ist, **kann** die Bearbeitung von Untersuchungsräumen oder Teilen von Untersuchungsräumen im Rahmen der rvSU abgebrochen werden. Zusätzlich wird im Rahmen einer verbalargumentativen Gesamtbetrachtung überprüft, ob wider Erwarten durch eine günstige Kombination der Indikatoren oder anhand weiterer Informationen eine hohe erreichbare Qualität des Einschlusses und zu erwartende Robustheit gegeben ist oder zusätzliche Analysen für eine Einstufung notwendig sind. In solchen Fällen gilt das Prüfkriterium als erfüllt und die Bearbeitung der rvSU wird fortgesetzt.

7.2 Zusammenfassende Begründung zur Einführung des Prüfschritts der Kategorie C im Rahmen der Umfassenden Bewertung

Die Anwendung der Anlagen 1 bis 4[20] (zu § 24 Abs. 3) des StandAG als Prüfschritt im Rahmen der umfassenden Bewertung wird folgendermaßen begründet:

- Die Anlagen 1 bis 4 des StandAG sind Kriterien, die eine hohe Übereinstimmung mit den Inhalten der Systemanalyse (§°7 EndlSiUntV) und der Umfassenden Bewertung (§°10 EndlSiUntV) haben. Dementsprechend lassen sie sich in die rvSU integrieren und für eine Bewertung anwenden (Kapitel 6).
- Sofern der Prüfschritt zu einer Einstufung in Kategorie C führt, ist die erreichbare Qualität des sicheren Einschlusses und die zu erwartende Robustheit nicht mit überwiegend günstig zu bewerten.
- Im Sinne des vergleichenden Verfahrens hin zu den Standortregionen für die übertägige Erkundung ist zu erwarten, dass Gebiete, die diesen Prüfschritt nicht bestehen, bei einem später vorgesehenen Vergleich schlechter abschneiden als Gebiete, die als Standortregionen für die übertägige Erkundung vorgeschlagen werden. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn es im Gegensatz dazu eine Vielzahl von Gebieten gibt, die den Prüfschritt innerhalb des Untersuchungsraums oder untersuchungsraumübergreifend bestehen und damit eine bessere Eignung versprechen.
- Durch die Anwendung kommt es im Rahmen der rvSU zu einer ersten qualitativen, allgemeingültigen (untersuchungsraumübergreifenden), transparenten Einschätzung über die Bewertung des sicheren Einschlusses in einem Gebiet. Dies ist vorteilhaft, da alle Gebiete räumlich differenziert anhand eines einheitlichen Maßstabs bewertet werden.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

- Eine solche Bewertung erlaubt es, für die Endlagerung hochradiokativer Abfälle **ungeeignete** oder im Rahmen des Verfahrens eindeutig **weniger geeignete Gebiete** fachlich begründet nicht weiter zu bearbeiten. Dadurch kann die Fläche und Anzahl der Gebiete frühzeitig signifikant eingeengt werden. Dies erlaubt es, dass sich detailliertere Analysen, wie z. B. quantitative numerische Modellbetrachtungen zur Überprüfung des Massenaustragskriteriums, nach § 4 Abs. 5 EndlSiAnfV auf die aussichtsreichsten Bereiche fokussieren.

Darüber hinaus geht aus den Begründungen des StandAG und der EndlSiUntV hervor, dass die Umfassende Bewertung im Rahmen der rvSU dasselbe Ziel verfolgt wie die Bewertung der Anlagen 1 bis 4 (zu § 24 Abs. 2) StandAG. Ziel ist eine Bewertung der erreichbaren Qualität des Einschlusses und seiner Robustheit.

In der Begründung der EndlSiUntV zur Umfassenden Bewertung heißt es: *„Im Kern beinhaltet* [die Umfassende Bewertung] *nach § 27 Absatz 1 StandAG eine Prognose über die zu erwartende **Qualität des erreichbaren Einschlusses** der radioaktiven Abfälle im jeweiligen Untersuchungsraum […]“*

Dieser Kern als Zentrum einer sicherheitsgerichteten Bewertung findet sich zusätzlich in § 24 Abs. 3 StandAG und wird hier näher erläutert und mit den Anlagen 1 bis 4 in Beziehung gesetzt: *„Die **erreichbare Qualität des Einschlusses** und die zu erwartende Robustheit des Nachweises werden anhand der Kriterien zum Transport durch Grundwasser, zur Konfiguration der Gesteinskörper, zur räumlichen Charakterisierbarkeit und zur Prognostizierbarkeit beurteilt. Diese Kriterien werden in den Anlagen 1 bis 4 festgelegt.“*

Dementsprechend wird es als zielführend betrachtet, die vom Gesetzgeber definierten Kriterien des StandAG als Bewertungsmaßstab hinzuzuziehen.

7.3 Übersicht zur Umfassenden Bewertung der GzME

Anhand der GzME werden in diesem Kapitel Anwendungsbeispiele zur umfassenden Bewertung gezeigt (Beispiel 71, Beispiel 72 und Beispiel 73). Dabei werden Gebiete innerhalb eines Untersuchungsraums anhand des Prüfschritts zu den Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen sowie des Prüfschritts zur Bewertung der qualitativen Überprüfung des sicheren Einschlusses in den GzME räumlich differenziert in die Kategorien D und C eingestuft. Durch die weitere Bearbeitung können Gebiete, die nicht in Kategorie D oder C eingestuft wurden, in alle Kategorien (A – D) fallen. Die gezeigte Einstufung basiert auf dem aktuellen methodischen Vorgehen und spiegelt den aktuellen Kenntnisstand wider. Dementsprechend stellen die gezeigten Karten den Arbeitsstand dar und werden ggf. Änderungen unterworfen. Detaillierte Anwendungsbeispiele, die die Einstufung eines Gebiets durch den Prüfschritt der qualitativen Bewertung des sicheren Einschlusses in Kategorie C zeigen, sind in Kapitel 7.4 aufgeführt.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

Beispiel 71: Übersicht zur umfassenden Bewertung im GzME „Opalinuston“

Übersicht zur umfassenden Bewertung im GzME „Opalinuston“

Im GzME „Opalinuston“ kommt es durch die qualitative Überprüfung des sicheren Einschlusses und der Prüfung der Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen zur Einstufung von einzelnen Gebieten in die Kategorie D und C (Abbildung 144). Teile des Untersuchungsraums im Osten erfüllen nicht die Mindestanforderungen „Mächtigkeit“ oder „Flächenbedarf“ und werden in Kategorie D eingestuft, (Kapitel 5.4, Beispiel 36). Der Teiluntersuchungsraum 01_06 im Süden des Untersuchungsraums ist nicht überwiegend günstig in der Bewertung der Anlagen 1 bis 4 (zu § 24 StandAG), da die Opalinuston-Formation allgemein weniger günstig bei dem Indikator 2.1 a „Barrierenmächtigkeit“ einzustufen ist und zusätzlich in diesem Teiluntersuchungsraum durch tektonische Überprägung und durch Vulkanschlote in der räumlichen Charakterisierbarkeit zwei Indikatoren ungünstig ausfallen (Indikator 3.1 b und 3.1 c; Beispiel 74). Im flächenmäßig größten Teiluntersuchungsraum 01_07 werden im nordwestlichen Bereich durch das Vorkommen von tertiären Vulkaniten des Urach Gebiete in Kategorie C eingestuft, da dort ein Indikator der räumlichen Charakterisierbarkeit ungünstig ausfällt und die Barrierenmächtigkeit als weniger günstig einzustufen ist (Kapitel 5.4). Zusätzlich werden im Teiluntersuchungsraum 01_07UR zum aktuellen Bearbeitungsstand durch die Bewertung weiterer sicherheitsrelevanter Aspekte im Rahmen der Endlagerauslegung Gebiete, in denen die Oberfläche der Opalinuston-Formation tiefer als 950 m liegt, in Kategorie C eingeordnet. Der Grund ist, dass sich im Opalinuston diese großen Tiefen nachteilig auf bautechnische Aspekte auswirken (s. Anhang 1, Beispiel 75). Die hier getroffene Bewertung bzgl. der Nichterfüllung des Prüfkriteriums entspricht in der oben aufgeführten Bewertungslogik der Option Nr. 3.

Übersicht zur umfassenden Bewertung im GzME „Opalinuston“

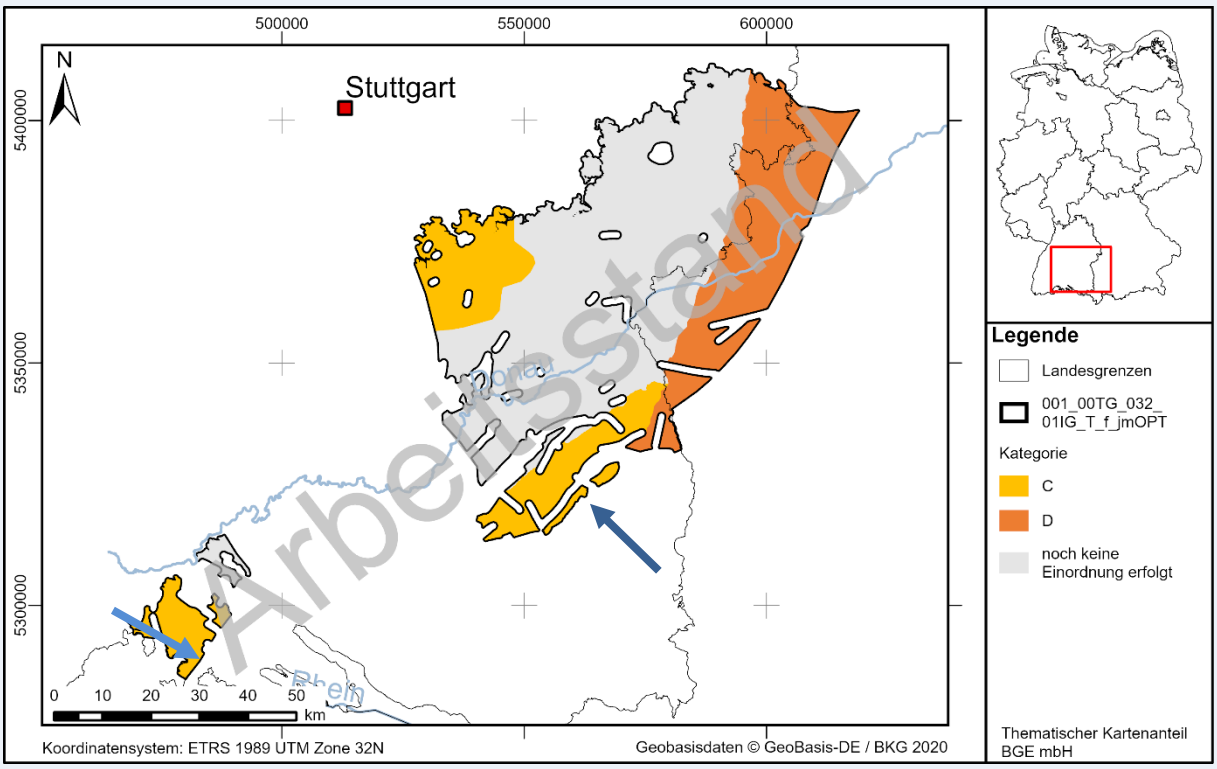


Abbildung 144: Einstufung von Gebieten in die Kategorie D und C im Untersuchungsraum des GzME „Opalinuston“. Gebiete, für die noch keine Einstufung erfolgt ist, können zukünftig in der Umfassenden Bewertung noch allen Kategorien A–D zugeordnet werden. Die blauen Pfeile zeigen die Lokationen des Beispiel 74 und Beispiel 75.

Gebiete, für die noch keine Einstufung erfolgt ist, können zukünftig in der umfassenden Bewertung noch allen Kategorien A – D zugeordnet werden. Der hellblaue Pfeil zeigt die Lokation des Teiluntersuchungsraums 01_06UR (Beispiel 74), der dunkelblaue Pfeil den Bereich aus dem Teiluntersuchungsraum 01_07UR, welcher durch eine ungünstige Tiefenlage bezüglich bautechnischer Aspekte in Kategorie C eingeordnet wurde (Beispiel 75).

Beispiel 72: Übersicht zur umfassenden Bewertung im GzME „Saxothuringikum“

Übersicht zur umfassenden Bewertung im GzME „Saxothuringikum“

Im GzME „Saxothuringikum“ kommt es durch die qualitative Überprüfung des sicheren Einschlusses zur Einstufung von einzelnen Gebieten in die Kategorien D und C (Abbildung 145). Teile desUntersuchungsraums, welche nicht die Mindestanforderungen „Mächtigkeit“ oder „Tiefenlage“ erfüllen, werden in Kategorie D eingestuft (Kapitel 5, Beispiel 33 und Beispiel 34). Einige Teiluntersuchungsräume und Gebiete innerhalb von Teiluntersuchungsräumen im GzME „Saxothurigikum“ werden flächendifferenziert der Kategorie C zugeordnet, wenn diese keine überwiegend günstige Bewertung der Anlagen 1 bis 4 (zu § 24 StandAG) aufweisen. Dies ist beispielhaft am Teiluntersuchungsraum 04_02UR dargestellt (Beispiel 76).

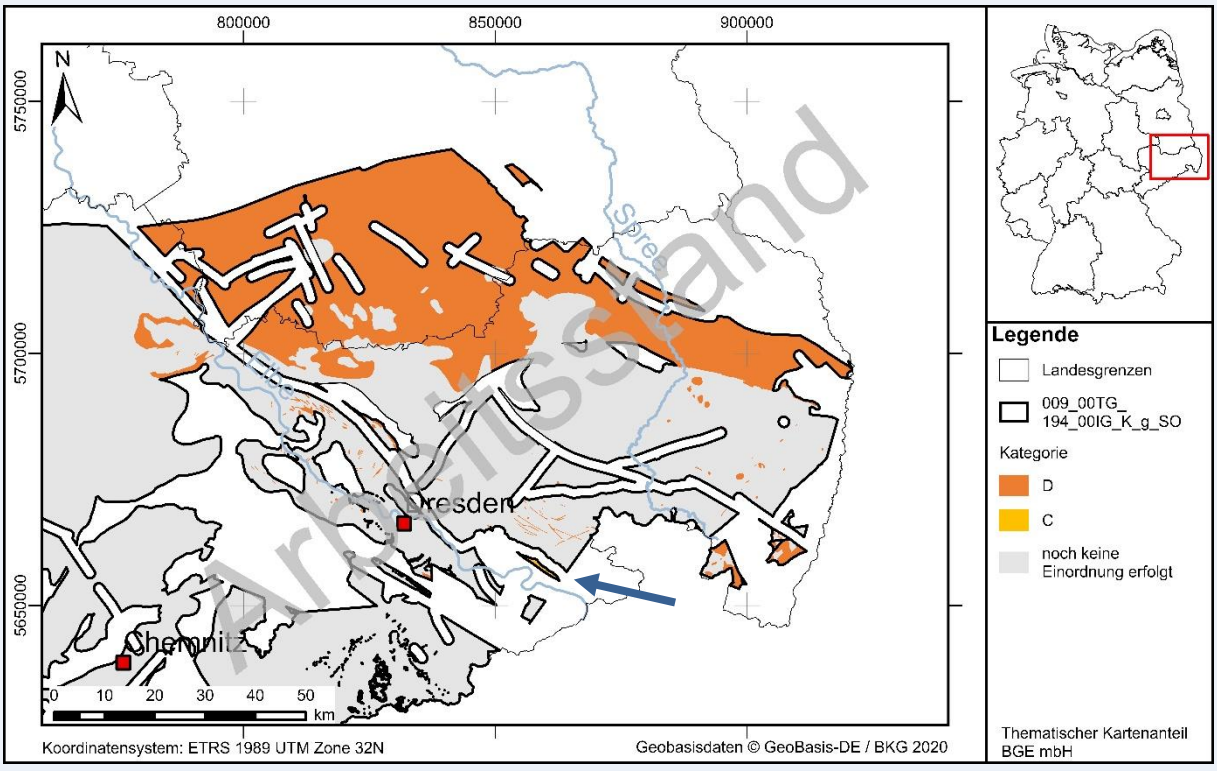


Abbildung 145: Einstufung von Gebieten in die Kategorie D und C im östlichen Teil des Untersuchungsraum des GzME „Saxothuringikum“.
Gebiete, für die noch keine Einstufung erfolgt ist, können zukünftig in der Umfassenden Bewertung noch allen Kategorien A–D zugeordnet werden. Der blaue Pfeil zeigt die Lokation des Teiluntersuchungsraum 04_02UR (Beispiel 76).

Beispiel 73: Übersicht zur umfassenden Bewertung im GzME „Thüringer Becken“

Übersicht zur umfassenden Bewertung im GzME „Thüringer Becken“

Für das GzME „Thüringer Becken“ können durch die Prüfung der Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen und der qualitativen Überprüfung des sicheren Einschlusses bereits einzelne Gebiete und Teiluntersuchungsräume in die Kategorien D und C eingestuft werden (Abbildung 146). Teile des Untersuchungsraums, welche nicht die Mindestanforderung „Mächtigkeit“ oder „Flächenbedarf“ erfüllen oder in denen die Ausschlusskriterien „Aktive Störungszonen“ – „Atektonische Vorgänge“ – oder „Bergwerke“ greifen, werden in Kategorie D eingestuft (vgl. Kapitel 5.4 und 5.5).

Einige Teiluntersuchungsräume im GzME „Thüringer Becken“ werden der Kategorie C zugeordnet, da diese keine überwiegend günstige Bewertung der Anlagen 1 bis 4 (zu § 24 StandAG) aufweisen (Abbildung 146). In diesen Teiluntersuchungsraum erfolgt eine bedingt/weniger günstige Bewertung z. B. bei Indikator 2.1 a „Barrierenmächtigkeit“, Indikator 2.2 a „Tiefenlage der oberen Begrenzung“, Indikator 2.3 a „Flächenhafte Ausdehnung“, Indikator 3.1 a „Variationsbreite der Eigenschaften“ oder 3.1 c „Tektonische Überprägung“, und zwar in der Form, dass das Prüfkriterium nicht erfüllt ist und eine Einstufung in Kategorie C erfolgt. Dies wird beispielhaft anhand des Teiluntersuchungsraums 03_03UR gezeigt (Beispiel 77).

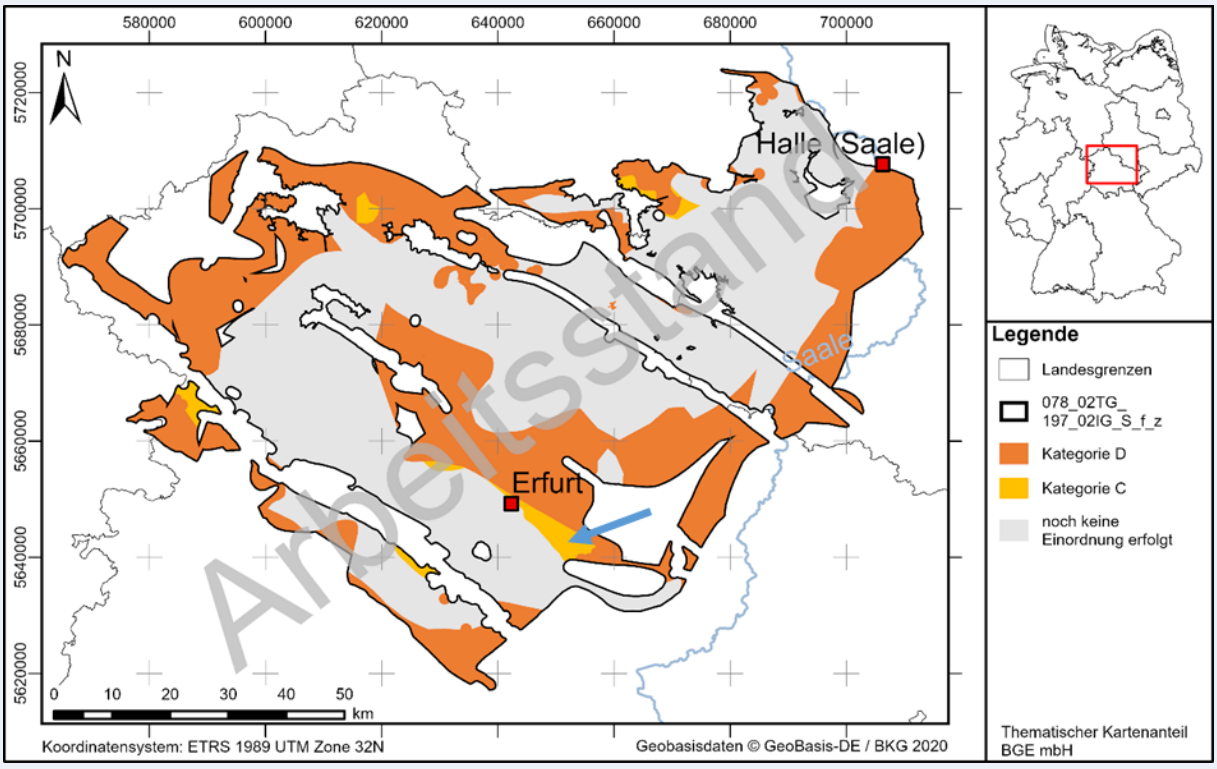


Abbildung 146: Einstufung von Gebieten in die Kategorie D und C im Untersuchungsraum des GzME „Thüringer Becken“.

Übersicht zur umfassenden Bewertung im GzME „Thüringer Becken“

Gebiete, für die noch keine Einstufung erfolgt ist, können zukünftig in der Umfassenden Bewertung noch allen Kategorien A–D zugeordnet werden. Der blaue Pfeil zeigt die Lokation des Teiluntersuchungsraums 03_03UR (Beispiel 77).

7.4 Anwendungsbeispiele zur Einstufung einzelner Gebiete in die Kategorie C

Im Folgenden werden vier Anwendungsbeispiele gezeigt, anhand derer nachvollzogen werden kann, wie Gebiete den Prüfschritt zur qualitativen Bewertung des sicheren Einschlusses nicht bestehen und in Kategorie C eingestuft werden:

- Beispiel 74 (Teiluntersuchungsraum 01_06UR im GzME „Opalinuston“) – Einstufung in Kategorie C erfolgt durch zwei „ungünstige“ und eine „weniger günstige“ Bewertung in zwei verschiedenen Anlagen.
- Beispiel 75 (Teiluntersuchungsraum 01_07UR im GzME „Opalinuston“) – Einstufung in Kategorie C erfolgt flächendifferenziert durch eine „weniger günstige“ Bewertung in Anlage 2 und anhand zusätzlicher, bautechnischer Aspekte (Berücksichtigung der Nachteile für Einlagerungsbereiche mit Tiefenlagen tiefer als 1 000 m u. GOK).
- Beispiel 76 (Teiluntersuchungsraum 04_02UR im GzME „Saxothuringikum) – Einstufung in Kategorie C erfolgt durch eine „ungünstige“ und eine „weniger günstige“ Bewertung in zwei verschiedenen Anlagen.
- Beispiel 77 (Teiluntersuchungsraum 03_03UR im GzME „Thüringer Becken“) – Einstufung in Kategorie C erfolgt durch eine „weniger günstige“ Bewertung in Anlage 2, eine flächendifferenzierte Bewertung eines Indikators in Anlage 3 sowie eine verbalargumentative Einstufung von weiteren Flächen im Teiluntersuchungsraum 03_03.

Beispiel 74: Anwendungsbeispiel im Teiluntersuchungsraum 01_06UR im GzME „Opalinuston“

Anwendungsbeispiel im Teiluntersuchungsraum 01_06UR im GzME „Opalinuston“ (01_00UR)

Der Teiluntersuchungsraum 01_06UR hat eine flächenhafte Ausdehnung von 137,5 km², befindet sich im Bundesland Baden-Württemberg und grenzt nordöstlich von Schaffhausen direkt an die Schweiz. (siehe Abbildung 87 in Kapitel 5.6). Der Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion wird durch die Opalinuston-Formation (bestehend aus Teufelsloch-Subformation und Zillhausen-Subformation) der stratigraphischen Einheit Mittlerer Jura gebildet (siehe auch Kapitel 5.6).

Die Mächtigkeit der Opalinuston-Formation variiert im Teiluntersuchungsraum 01_06UR zwischen 120 m und 130 m bei einer Tiefenlage der oberen Begrenzung zwischen 236 m und

Anwendungsbeispiel im Teiluntersuchungsraum 01_06UR im GzME „Opalinuston“ (01_00UR)

795 m u. GOK (siehe Abbildung 77 in Kapitel 5.4 und Abbildung 147). Der Indikator „Barrierenmächtigkeit“ des Kriteriums zur Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper (Anlage 2 zu § 24 StandAG) ist mit „weniger günstig“ zu bewerten (die Barrierenmächtigkeit entspricht der halben Mächtigkeit der Opalinuston-Formation). Die Tiefenlage ist flächendifferenziert zu bewerten und ist im nordwestlichen Bereich des Teiluntersuchungsraums „bedingt günstig“ (Tiefenlage flacher als 500 m u. GOK) und im südöstlichen Bereich als „günstig“ zu bewerten.

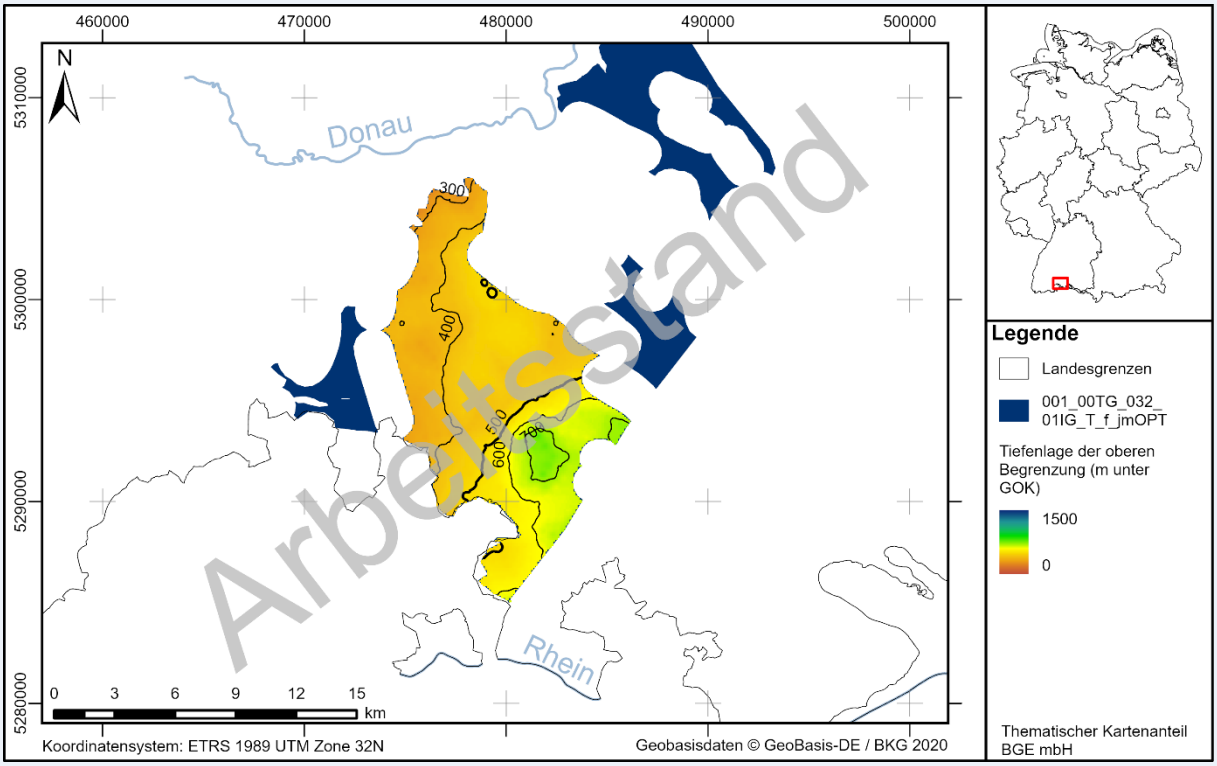


Abbildung 147: Tiefenlage der oberen Begrenzung der Opalinuston-Formation im Teiluntersuchungsraum 01_06UR.
Am Rand des Teiluntersuchungsraums befinden sich kleine Bereiche, in denen die obere Begrenzung der Opalinuston-Formation Tiefenlagen kleiner als 300 m u. GOK aufweist. Dies resultiert aus der Auflösung des 3D-Modells, d. h. der Triangulation der modellierten Fläche, und der Tatsache, dass die Tiefenlage des Tops der Opalinuston-Formation modelliert wurde, die Teilgebietsgrenze sich jedoch auf den gesamten Mittleren Jura bezieht.

Der Teiluntersuchungsraum 01_06UR befindet sich im tektonischen Großraum der Freiburg-Bonndorf-Bodensee-Scherzone (FBBS) (siehe Beispiel 62 in Kapitel 5.7.4.6). Insgesamt kann die tektonische Überprägung der FBBS als ungünstig eingestuft werden, da eine anhaltende Seitenverschiebung sowie Abschiebungen mit großen Versätzen die Gesteine sowie Sedimentgesteine nachweislich stark deformiert haben (Deichmann et al. 2000; Egli et al. 2017).

Anwendungsbeispiel im Teiluntersuchungsraum 01_06UR im GzME „Opalinuston“ (01_00UR)

Die Bewertung des Indikators „Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit“ zum Kriterium zur Bewertung der räumlichen Charakterisierbarkeit (Anlage 3 zu § 24 StandAG) ist damit als „ungünstig“ zu bewerten. Der Teiluntersuchungsraum 01_06 liegt innerhalb des miozänen Vulkanfeldes des Hegau (Schreiber & Jentzsch 2021). Dieses zeichnet sich durch das Auftreten von Vulkanschloten im Untergrund aus, die keinem regelmäßigen Muster folgen (Kapitel 5). Daher muss der Indikator „Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften“ (Anlage 3 zu § 24 StandAG) mit „ungünstig“ bewertet werden, da es sich hier um eine diskontinuierliche, nicht ausreichend genau vorhersagbare räumliche Veränderung im gesamten Endlagerbereich handelt.

Die in der Geosynthese (Kapitel 5) erarbeiteten geowissenschaftlichen Grundlagen für den Teiluntersuchungsraum 01_06UR im GzME „Opalinuston“ ergeben für die Bewertung der Anlagen 1 bis 4 zu § 24 StandAG, dass drei Indikatoren als „weniger günstig“ / „ungünstig“ und ein Indikator flächendifferenziert mit „bedingt günstig“ bewertet werden müssen (Tabelle 65). Das Prüfkriterium ist für diesen Teiluntersuchungsraum somit bereits nicht erfüllt, da die Bewertung auf Basis von zwei verschiedenen Kriterien beruht. Dadurch erfolgt für den Teiluntersuchungsraum 01_06UR eine Einstufung in die Kategorie C. Vorbehaltlich des aktuellen Arbeitsstandes wird der Teiluntersuchungsraum 01_06UR damit nicht weiterbearbeitet.

Tabelle 65: Qualitative Überprüfung des sicheren Einschlusses im Teiluntersuchungsraum 01_06UR anhand der nicht günstig bewerteten Indikatoren der Anlagen 1 bis 4 zu § 24 StandAG

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße/Indikator	Bewertung TUR 01_06UR
Anlage 2: Kriterium zur Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper		
2.1 Barrierewirksamkeit	2.1 a Barrierenmächtigkeit [m]	Weniger günstig
2.2 Robustheit und Sicherheitsreserven	2.2 a Tiefe der oberen Begrenzung des erforderlichen ewG [m u. GOK]	Flächendifferenziert: SE günstig; NW bedingt günstig
Anlage 3: Kriterium zur Bewertung der räumlichen Charakterisierbarkeit		
3.1 Ermittelbarkeit der Gesteinstypen und ihrer charakteristischen Eigenschaften im vorgesehenen Endlagerbereich, insbesondere im vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereich	3.1 b Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften	Ungünstig
	3.1 c Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit	Ungünstig

Beispiel 75: Anwendungsbeispiel im Teiluntersuchungsraum 01_07UR im GzME „Opalinuston“

Anwendungsbeispiel Tiefenlage im GzME „Opalinuston“ (01_00UR)

Der Teiluntersuchungsraum 01_07UR im GzME „Opalinuston“ hat eine flächenhafte Ausdehnung von 3 078 km², befindet sich auf der Schwäbischen Alb und in Teilen des Molassebeckens in den Bundesländern Baden-Württemberg und Bayern (siehe auch Kapitel 5.6). Er wird in Kapitel 5 detailliert beschrieben. Die jurassischen Ablagerungen fallen nördlich der Donau, im Bereich der Schwäbischen Alb, flach nach Südosten ein. Dort ist die Tiefenlage der oberen Begrenzung der Opalinuston-Formation kleiner 600 m u. GOK (Abbildung 148; siehe Kapitel 5.4). Südlich der Donau im Molassebecken erhöht sich das Einfallen, wodurch die obere Begrenzung der Opalinuston-Formation innerhalb des Teiluntersuchungsraums auf über 1 400 m u. GOK abfällt (Abbildung 148).

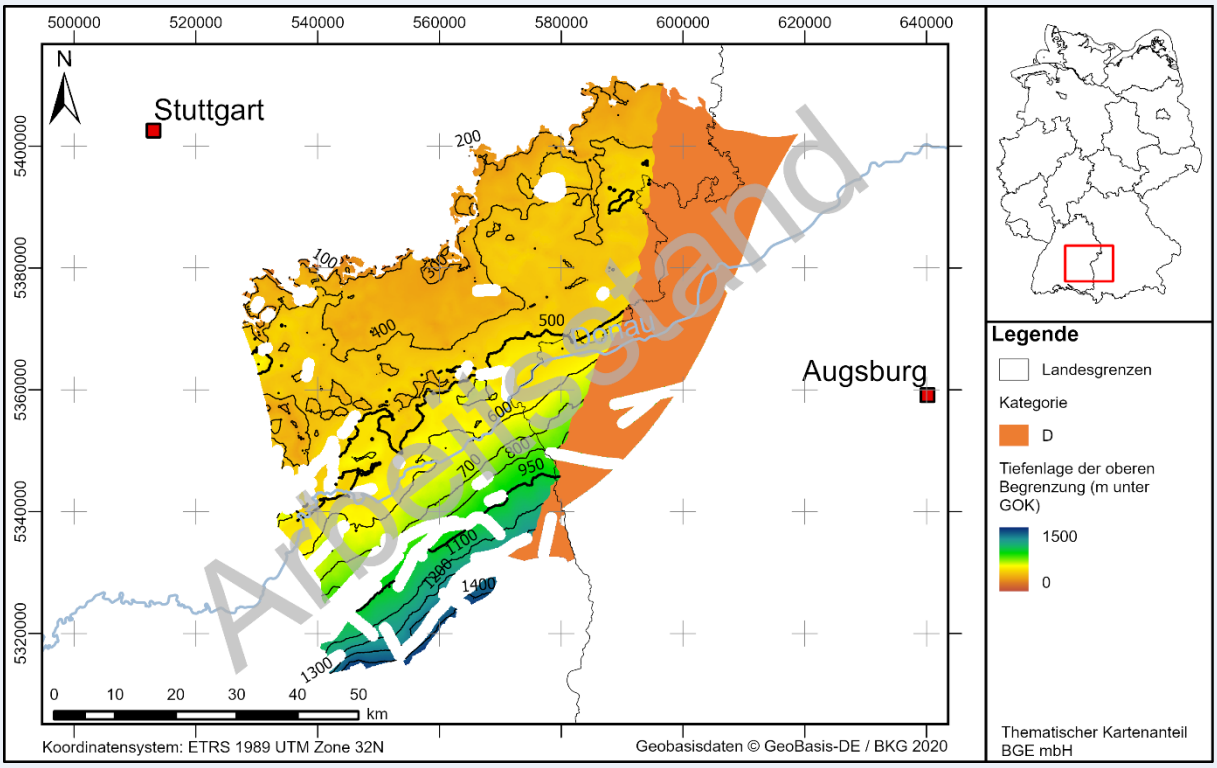


Abbildung 148: Tiefenlage der oberen Begrenzung der Opalinuston-Formation. Am nordwestlichen Rand des GzME „Opalinuston“ befinden sich kleine Bereiche (Größe im untersten einstelligen km²-Bereich), in denen die obere Begrenzung der Opalinuston-Formation Tiefenlagen kleiner als 300 m u. GOK aufweist. Dies resultiert aus der Auflösung des 3D-Modells, d. h. der Triangulation der modellierten Fläche, und der Tatsache, dass die Tiefenlage des Tops der Opalinuston-Formation modelliert wurde, die Teilgebietsgrenze sich jedoch auf den gesamten Mittleren Jura bezieht.

Im Rahmen der qualitativen Bewertung des sicheren Einschlusses werden im Teiluntersuchungsraum 01_07UR zusätzlich zu den Anlagen 1 bis 4 (zu § 24 StandAG) Informationen

Anwendungsbeispiel Tiefenlage im GzME „Opalinuston“ (01_00UR)

zum günstigen Tiefenbereich für die Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen hinzugezogen. Damit werden bautechnische Aspekte, welche sich auf die sichere Errichtung und den sicheren Betrieb eines Endlagers auswirken, frühzeitig berücksichtigt. Diese haben speziell im Tongestein durch die vergleichsweise ungünstigen gebirgsmechanischen Eigenschaften im Rahmen der Endlagerauslegung eine hohe Relevanz (Kapitel 4.2). Die Tiefenlage des Einlagerungsbereichs soll dabei nicht pauschal anhand einer festgelegten Suchtiefe (diese wurde bereits in Schritt 1 der Phase I (BGE 2020j) auf maximal 1 500 m u. GOK festgelegt) begrenzt werden, sondern in Abhängigkeit der gebirgsmechanischen Eigenschaften des Wirtsgesteins und der untersuchungsraumspezifischen Kenntnissen sicherheitsrelevanter Aspekte berücksichtigt werden.

Für den Opalinuston werden die Fragestellungen zu günstigen Tiefenbereichen für die Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen im Anhang 1 dargelegt. Bautechnisch günstig sind Tiefen kleiner als 750 m. Bis zu diesen Tiefen liegen noch entsprechende bautechnische Erfahrungen vor. Lagen tiefer als 750 m sind bautechnisch voraussichtlich machbar, jedoch liegen hier keine Erfahrungswerte vor. Sie sollten deshalb nur in Frage kommen, sofern sie anderweitig deutliche Vorteile bieten (z. B. keine negative Beeinflussung durch geogene Prozesse wie glaziale Tiefenerosion). In einem Tiefenbereich unterhalb von 1 000 m überwiegen die Nachteile der bergbaulichen Machbarkeit gegenüber dem Gewinn an Langzeitsicherheit.

Basierend auf diesen Zwischenergebnissen werden Gebiete im Teiluntersuchungsraum 01_07UR im GzME „Opalinuston“, bei denen die obere Begrenzung der Opalinuston-Formation tiefer als 950 m u. GOK (Einlagerungsbereich in 1 000 m u. GOK) liegt, in Kategorie C eingestuft (Abbildung 144 und Abbildung 148). Hierbei wird davon ausgegangen, dass die Informationen, die im Anhang 1 zusammengetragen wurden, auf die Gebiete im Teiluntersuchungsraum 01_07UR übertragbar sind. Bei der Einstufung in Kategorie C wird zusätzlich berücksichtigt, dass die Opalinuston-Formation in Anlage 2 Indikator 2.1a bereits eine weniger günstige Bewertung beim Indikator „Barrieremächtigkeit“ des Kriteriums zur Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper (Anlage 2 zu § 24 StandAG) aufweist. Zusätzlich sind im Untersuchungsraum ausreichend große Flächen vorhanden, bei denen keine oder wenige Einschränkungen bzgl. der bautechnischen Machbarkeit eines Endlagers erwartet werden können. Ob tiefere Lagen zwischen 750 m und 1 000 m u. GOK deutliche Vorteile gegenüber günstigen Tiefenlagen oberhalb 750 m u. GOK haben, kann noch nicht abgeschätzt werden. Diese Flächen werden im Rahmen der Geosynthese und in der quantitativen Analyse des sicheren Einschlusses detaillierter bearbeitet. Dabei können bautechnische Fragestellungen zur Tiefenlage in der Endlagerauslegung weiter ausdifferenziert und in der Analyse des Endlagersystems und dem darauffolgenden sicherheitsgerichteten Diskurs bewertet werden (Kapitel 8 bzw. 9). Die dementsprechend in Kategorie C eingestuften Gebiete sind in Abbildung 144 mit einem dunkelblauen Pfeil gekennzeichnet.

Beispiel 76: Anwendungsbeispiel im Teiluntersuchungsraum 04_02UR im GzME „Saxothuringikum

Anwendungsbeispiel im Teiluntersuchungsraum 04_02UR im GzME „Saxothuringikum

Im südlichen Bereich des tektonischen Großraums der Elbezone, zwischen Lausitzer Block im Nordosten und Granulit-Erzgebirgs-Block im Südwesten, befindet sich der Teiluntersuchungsraum 04_02. Dieser Teiluntersuchungsraum im östlichen Bereich des GzME „Saxothuringikum“ hat eine Ausdehnung von 6,2 km² (Abbildung 145).

Unter ca. 300 m mächtiger Bedeckung durch kreidezeitliche (Unterturon) Sand-, Ton-, und Mergelsteine stehen proterozoische (kambrische) Granite und Granodiorite an (siehe Abbildung 150). Die geologische Barriere wird aus den kristallinen Wirtsgesteinen (Granite/Granodiorite) gebildet.

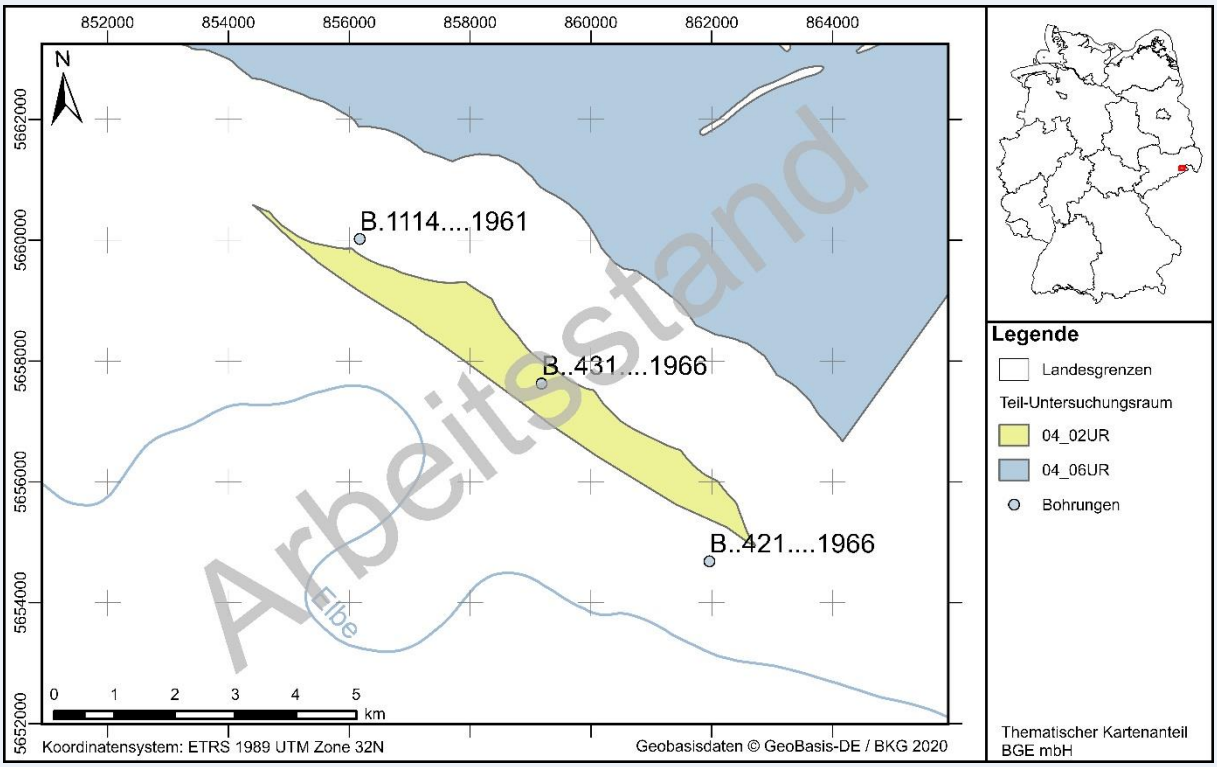


Abbildung 149: Lage der Bohrungen zur Erstellung der repräsentativen Profile des Teiluntersuchungsraums 04_02UR

Anwendungsbeispiel im Teiluntersuchungsraum 04_02UR im GzME „Saxothuringikum

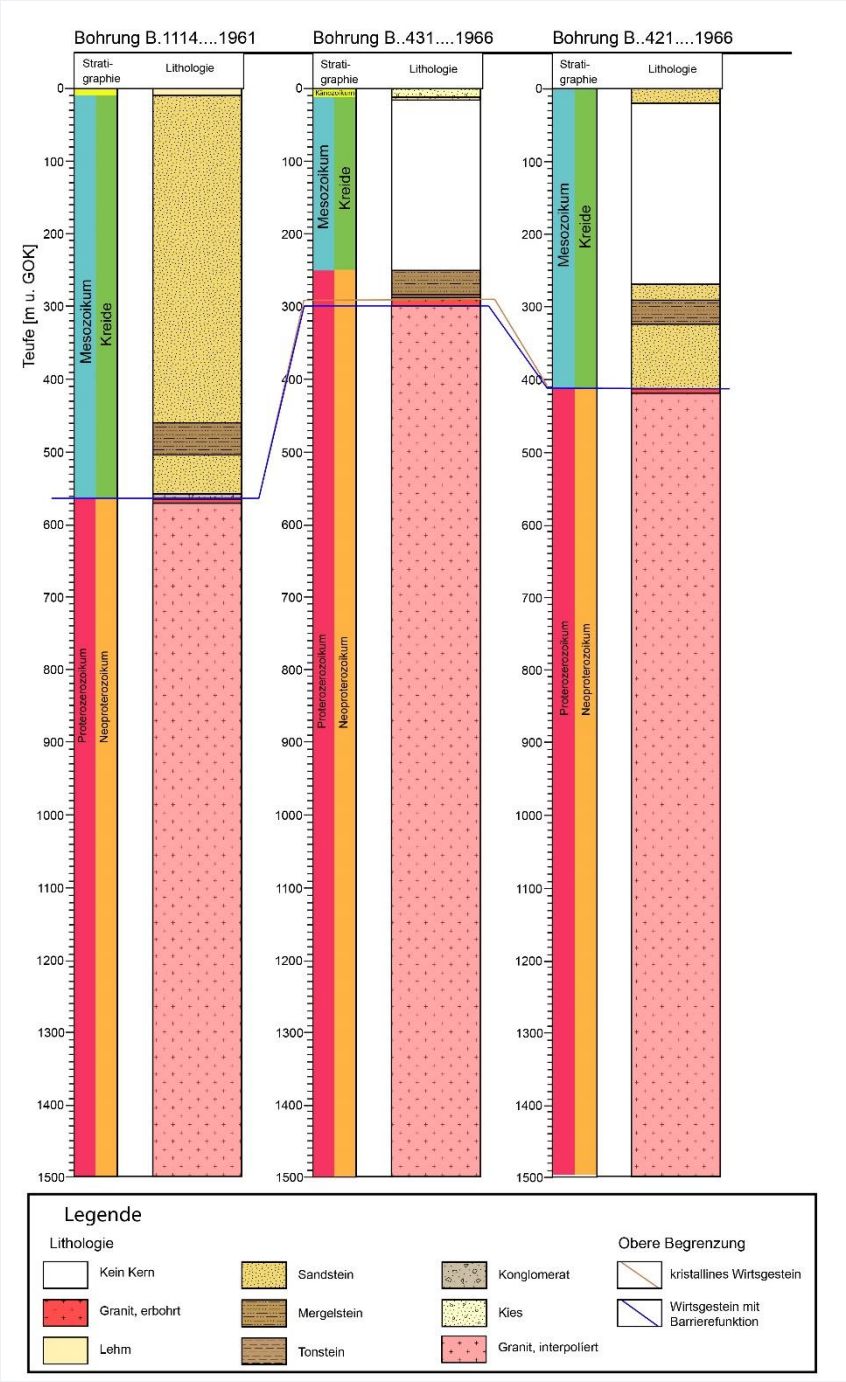


Abbildung 150: Repräsentative Profile des Teiluntersuchungsraums 04_02UR. Die Bohrungen wurden nur bis zur Oberfläche des kristallinen Wirtsgesteins abgeteuft. Das kristalline Wirtsgestein setzt sich vertikal unterhalb der Bohrungen fort und wurde entsprechend interpoliert.

Anwendungsbeispiel im Teiluntersuchungsraum 04_02UR im GzME „Saxothuringikum

Für die granitischen Gesteinseinheiten werden Barrieremächtigkeiten von 730 bis 1 000 m in einem Teufenbereich zwischen 300 m und 1500 m u. GOK ermittelt. Die Oberfläche der Granite liegt zwischen 240 m und 570 m u. GOK, die untere Begrenzung liegt tiefer als 1500 m u. GOK. Somit kann eine Tiefenlage der oberen Begrenzung der geologischen Barriere unterhalb 500 m flächendeckend als erfüllt angenommen werden. Die Bewertungen der Indikatoren „Barrieremächtigkeit“ und „Tiefe der oberen Begrenzung des erforderlichen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ des Kriteriums zur Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper (Anlage 2 zu § 24 StandAG) sind somit günstig.

Die flächenhafte Ausdehnung des Teiluntersuchungsraums 04_02UR beträgt mit 6,2 km² deutlich weniger als die zweifache Fläche des Mindestflächenbedarfs (12 km²) für kristalline Wirtsgesteine (6 km² Mindestflächenbedarf nach BT-Drs. 18/11398). Die Bewertung des Indikators „Volumen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ nach Anlage 2 zu § 24 StandAG ist somit bedingt günstig.

Die cadomischen kristallinen Wirtsgesteine des tektonischen Großraums Elbezone unterlagen insgesamt drei tektonischen Hauptphasen, zu deren Beginn die Ausbildung der Elbezone als dextrale Scherzone im Variszikum stand. Nachfolgende mesozoische und känozoische tektonische Deformationsphasen erzeugten weitere erhebliche laterale und vertikale Versätze entlang von Störungen (Linnemann & Schauer 1999; Berger et al. 2011a; LfULG 2016). Durch diese starke tektonische Überprägung der Elbezone ist der Indikator „Ausmaß der tektonischen Überprägung“ nach Anlage 3 zu § 24 StandAG als ungünstig für den Teiluntersuchungsraum 04_02UR zu bewerten (Kapitel 5.7.4.5).

Anwendungsbeispiel im Teiluntersuchungsraum 04_02UR im GzME „Saxothuringikum

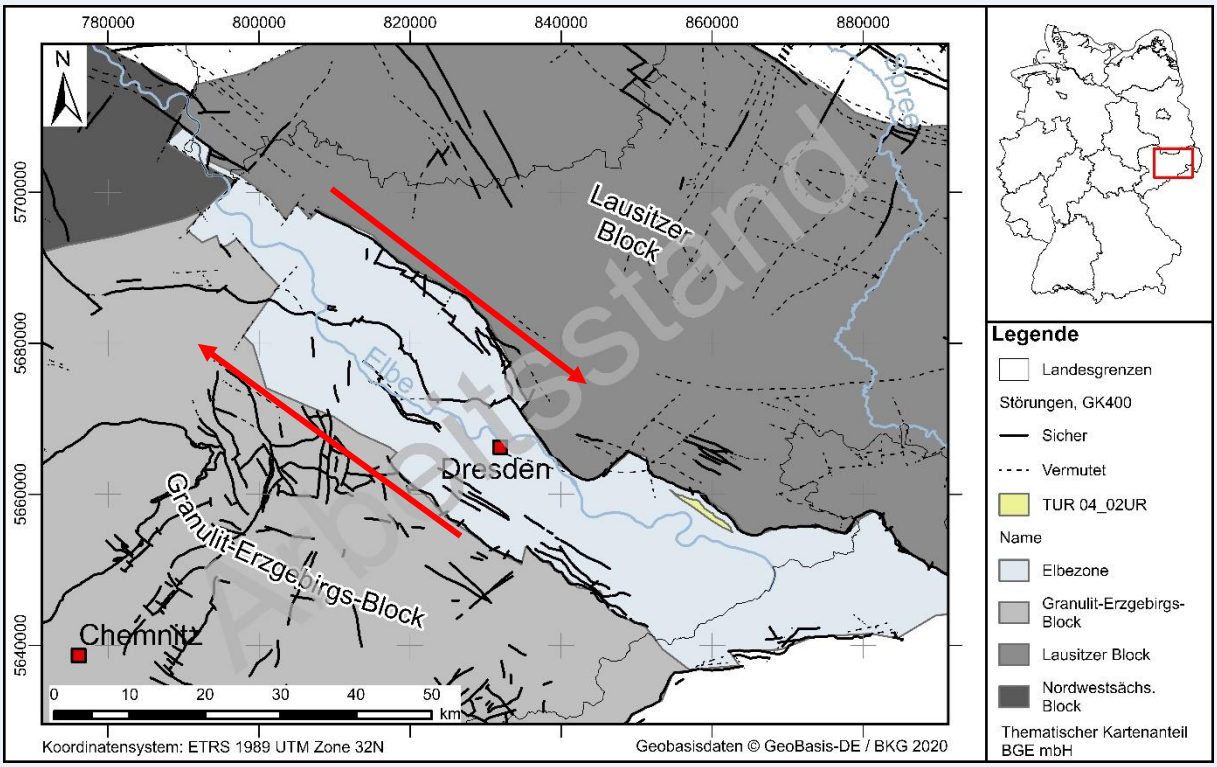


Abbildung 151: Lage des Teiluntersuchungsraums 04_02UR im tektonischen Großraum Elbezone

Aufgrund ihrer Charakteristik als cadomische Intrusivgesteine (Plutonite) mit großer räumlicher Ausdehnung ist von einer homogenen faziellen Gesteinsausbildung der Granite (Granodiorite), ähnlich zur Gesteinsausbildung der cadomischen Granodioriten des Lausitzer Blocks, auszugehen. Somit sind die Bewertungen gemäß den Indikatoren „Gesteinsfazies“, „Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften“ und „Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich“ nach Anlage 3 zu § 24 StandAG als günstig zu bewerten.

Arbeitsstand

Anwendungsbeispiel im Teiluntersuchungsraum 04_02UR im GzME „Saxothuringikum

Tabelle 66: Qualitative Überprüfung des sicheren Einschlusses im Teiluntersuchungsraum 04_02UR anhand der nicht günstig bewerteten Indikatoren der Anlagen 1 bis 4 zu § 24 StandAG

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße/Indikator	Bewertung TUR 04_02UR
Anlage 2: Kriterium zur Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper		
2.3 Volumen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs	2.3 a flächenhafte Ausdehnung bei gegebener Mächtigkeit (Vielfaches des Mindestflächenbedarfs)	Weniger günstig
Anlage 3: Kriterium zur Bewertung der räumlichen Charakterisierbarkeit		
3.1 Ermittelbarkeit der Gesteinstypen und ihrer charakteristischen Eigenschaften im vorgesehenen Endlagerbereich, insbesondere im vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereich	3.1 c Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit	Ungünstig

Die Bewertung der Anlagen 1 bis 4 zu § 24 StandAG für den Teiluntersuchungsraum 04_02 im GzME „Saxothuringikum“ ergibt, dass Indikator 3.1 c mit ungünstig und Indikator 2.3 a mit weniger günstig bewertet werden. Durch die Bewertung von zwei Anlagen im negativen Bewertungsfeld wird das Prüfkriterium für den Teiluntersuchungsraum 04_02 nicht erfüllt und es erfolgt eine Einstufung in die Kategorie C. Eine flächenhafte Darstellung der vorerst bewerteten Gebiete wird in Abbildung 145 gezeigt.

Beispiel 77: Anwendungsbeispiel im Teiluntersuchungsraum 03_03UR im GzME „Thüringer Becken“

Anwendungsbeispiel im Teiluntersuchungsraum 03_03UR im GzME „Thüringer Becken“

Die qualitative Überprüfung des sicheren Einschlusses im GzME „Thüringer Becken“ wird am Beispiel des Teiluntersuchungsraums 03_03UR gezeigt. Dieser Teiluntersuchungsraum hat eine flächenhafte Ausdehnung von 52,5 km² und befindet sich im Südostteil des Thüringer Beckens im Bereich nördlich der Thüringer-Wald-Vorsenke im Bundesland Thüringen. Im Teiluntersuchungsraum stellt das Werra-Steinsalz das Wirtsgestein mit Barrierefunktion dar (vgl. Kapitel 5.6 Beispiel 44).

Das Werra-Steinsalz erreicht im Teiluntersuchungsraum 03_03UR nach der Mächtigkeitskarte von Seidel (2013) Mächtigkeiten zwischen 100 m und 200 m. Die Bohrung E Erfurt 1/1964, welche im Teiluntersuchungsraum liegt, zeigt eine reine Steinsalzmächtigkeit von 115 m (vgl. Abbildung 152). Der Indikator „Barrierenmächtigkeit“ des Kriteriums zur Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper (Anlage 2 zu § 24 StandAG) ist daher mit weniger günstig für den gesamten Teiluntersuchungsraum 03_03UR zu bewerten.

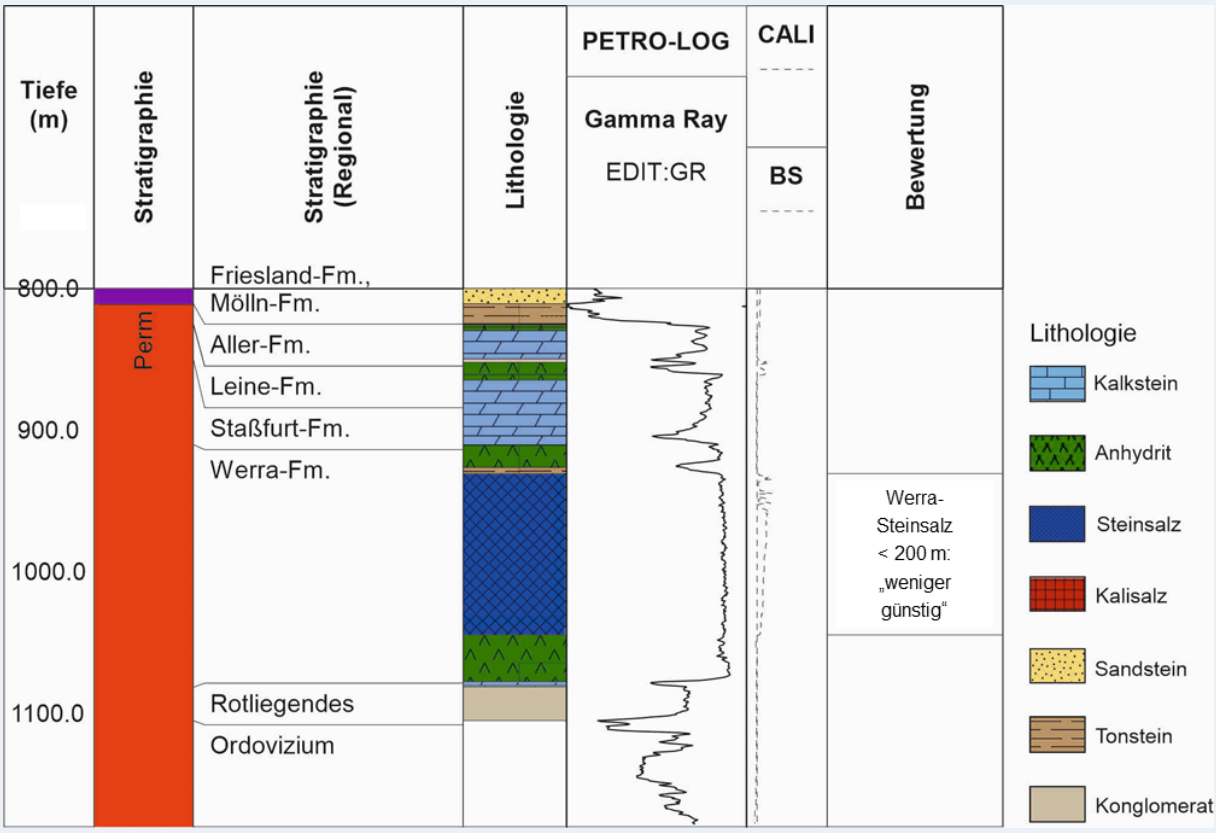


Abbildung 152: Ausschnitt aus dem Composite Log der Bohrung E Erfurt 1/1964 im Bereich des Zechstein bis Endtiefe mit der Bewertung zu Indikator 3.1 a „Barrierenmächtigkeit“

Anwendungsbeispiel im Teiluntersuchungsraum 03_03UR im GzME „Thüringer Becken“

Das Thüringer Becken ist geprägt durch Nordwest-Südost streichende Störungszonen, welche anhand seismischer Untersuchungen auch an der Zechsteinbasis nachverfolgbar sind (Seidel 2004). Die Erfurter Störungszone sowie die Steiger und die Tannrodaer Störungszonen bilden die strukturellen Grenzen des Teiluntersuchungsraums 03_03UR (vgl. Beispiel 44 in Kapitel 5.6).

Die südwestliche Begrenzung des Teiluntersuchungsraums bildet die prominente Erfurter Störungszone sowie die Steiger und Tannrodaer Störungszone. Die Erfurter Störungszone verläuft zum Teil auch innerhalb des Teiluntersuchungsraums und durchquert diesen dabei mittig in voller Länge. Im Südosten liegt ein kleiner Teil der Kleinbuchaer Störungszone ebenfalls im Teiluntersuchungsraum. Diese regionalen Störungszonen führen zu einer Zerblockung der Gesteinseinheiten innerhalb des Teiluntersuchungsraums und weisen auf eine deutliche tektonische Überprägung weiter Bereiche des Teiluntersuchungsraums hin. Bereiche, die von diesen regionalen Störungszonen negativ beeinflusst werden, werden mit bedingt günstig bewertet. Nur kleine Flächen entlang der nordöstlichen Grenze des Teiluntersuchungsraums sind voraussichtlich tektonisch weniger stark beeinflusst (Abbildung 153).

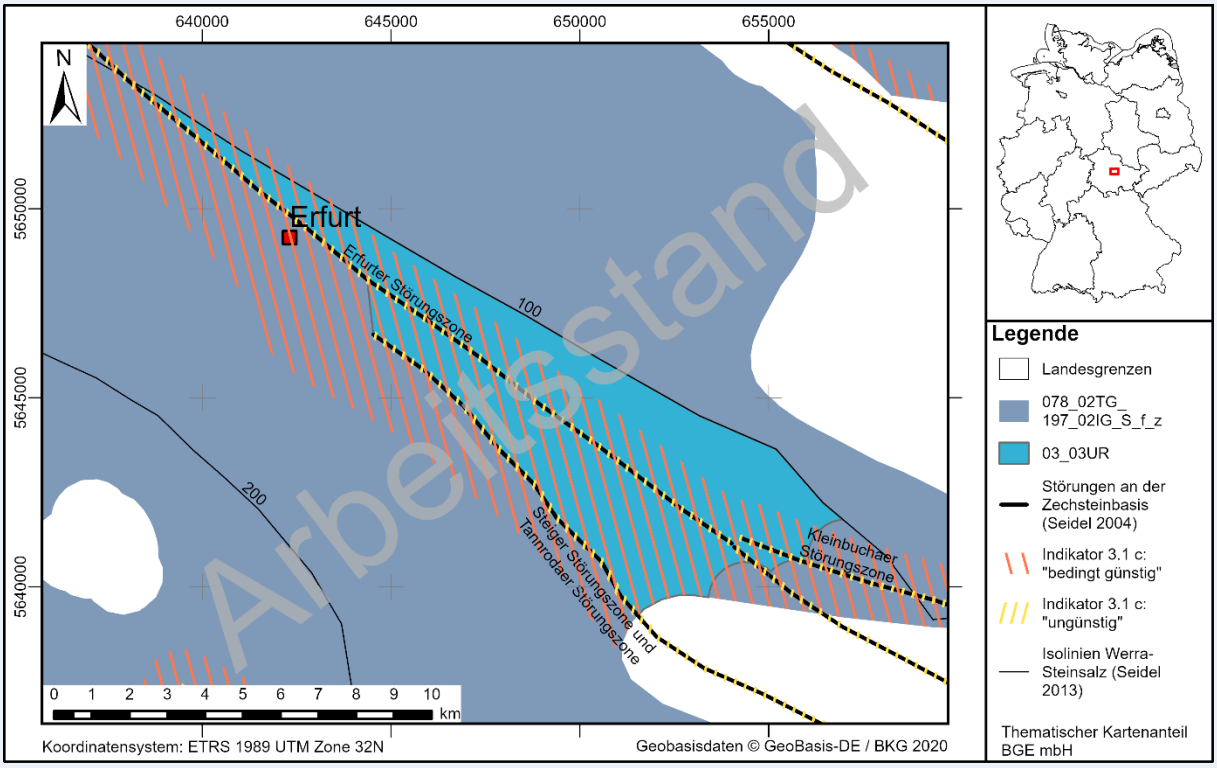


Abbildung 153: Bewertung des Indikators 3.1 c im Teiluntersuchungsraum 03_03UR mit Isolinien der Mächtigkeit des Werra-Steinsalzes (aus Seidel 2013)

Anwendungsbeispiel im Teiluntersuchungsraum 03_03UR im GzME „Thüringer Becken“

Die Bewertung des Indikators „Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit“ zum Kriterium zur Bewertung der räumlichen Charakterisierbarkeit (Anlage 3 zu § 24 StandAG) ist für den Teiluntersuchungsraum 03_03UR somit flächendifferenziert zu bewerten, wobei die überwiegende Bewertung „bedingt günstig“ ausfällt.

Die Bewertung der Anlagen 1 – 4 zu § 24 StandAG für den Teiluntersuchungsraum 03_03UR im GzME „Thüringer Becken“ ergibt, dass der Indikator 2.1 a („Barrierenmächtigkeit“) mit „weniger günstig“ und der Indikator 3.1 c („tektonische Überprägung“) flächendifferenziert, aber überwiegend „bedingt günstig“ bewertet wird (Tabelle 67). Diese Bewertungen stammen aus zwei verschiedenen Anlagen. Das Prüfkriterium ist für einen Großteil dieses Teiluntersuchungsraums somit nicht erfüllt und diese Gebiete werden in die Kategorie C eingeordnet.

Tabelle 67: Qualitative Überprüfung des sicheren Einschlusses im Teiluntersuchungsraum 03_03UR anhand der nicht günstig bewerteten Indikatoren der Anlagen 1 bis 4 zu § 24 StandAG

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße/Indikator	Bewertung TUR 03_03UR
Anlage 2: Kriterium zur Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper		
2.1 Barrierewirksamkeit	2.1 a Barrierenmächtigkeit [m]	weniger günstig
Anlage 3: Kriterium zur Bewertung der räumlichen Charakterisierbarkeit		
3.1 Ermittelbarkeit der Gesteinstypen und ihrer charakteristischen Eigenschaften im vorgesehenen Endlagerbereich, insbesondere im vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereich	3.1 c Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit	Flächendifferenziert: überwiegend bedingt günstig untergeordnet günstig, ungünstig

Die Fläche im Nordosten des Teiluntersuchungsraums, für die der Indikator 3.1 c möglicherweise günstig bewertet werden könnte, ist nur ein kleines vielfaches des Mindestflächenbedarfs und sehr lang und schmal ausgebildet (Abbildung 153). Zudem liegt sie entlang der sehr unsicheren nordöstlichen Grenze des Teiluntersuchungsraums, die die Erfüllung der Mindestanforderung „Mächtigkeit“ nachzeichnet, wodurch hier sehr geringe Steinsalz-Mächtigkeiten zu erwarten sind. Aufgrund dieser Gesamtkonfiguration erfolgt auch in dieser verbleibenden

Anwendungsbeispiel im Teiluntersuchungsraum 03_03UR im GzME „Thüringer Becken“

Fläche verbalargumentativ eine Einstufung in Kategorie C. Somit ist das Prüfkriterium für den gesamten Teiluntersuchungsraum 03_03UR nicht erfüllt und dieser wird in Kategorie C eingestuft.

8 Analyse des Endlagersystems (§ 7 EndlSiUntV)

8.1 Einleitung

In den rvSU wird auf Grundlage einer umfangreichen und, wenn möglich, räumlich differenzierten sicherheitsgerichteten Bewertung der sichere Einschluss der radioaktiven Abfälle im Endlagersystem geprüft (siehe § 2 Nr. 11 StandAG und § 10 EndlSiUntV).

Die Analyse des Endlagersystems nach § 7 EndlSiUntV wird auf Basis der Geosynthese (§ 5 EndlSiUntV, siehe Kapitel 5), des vorläufigen Sicherheitskonzeptes (§ 6 Abs. 1 EndlSiUntV, siehe Kapitel 4.1) und der vorläufigen Auslegung des Endlagers (§ 6 Abs. 2 i. V. m. 4 EndlSiUntV, siehe Kapitel 4.2) bearbeitet und bildet u. a. den Ausgangspunkt für die umfassende Bewertung des Endlagersystems (§ 10 EndlSiUntV, siehe Kapitel 9), siehe Abbildung 154.

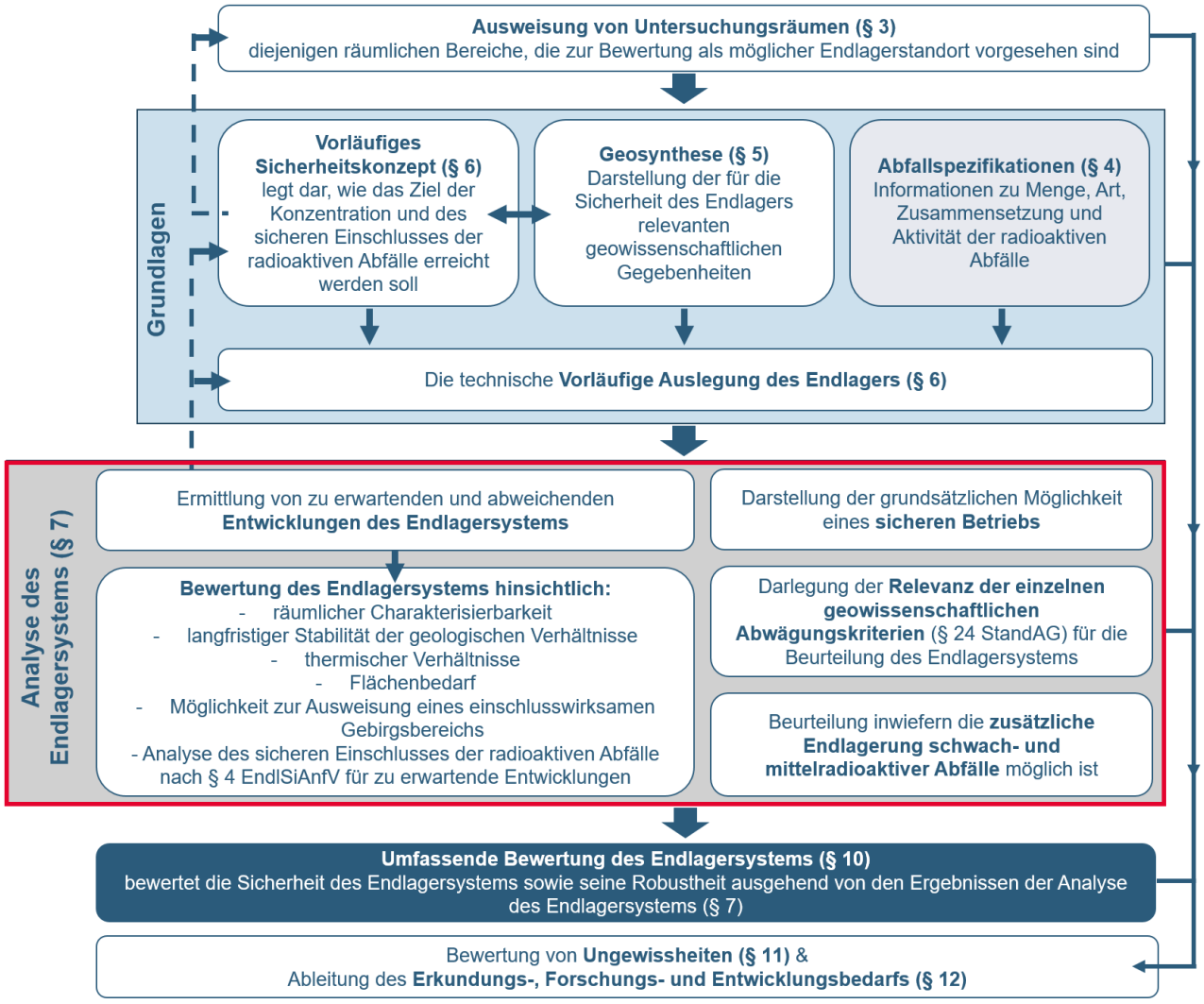


Abbildung 154: Einordnung der Analyse des Endlagersystems (§ 7 EndlSiUntV) in den Kontext der rvSU

§ 7 Abs. 6 EndlSiUntV ersetzt im Rahmen der rvSU die Absätze 1 bis 3 und 5 des § 7 EndlSiUntV. Im Rahmen der Analyse des Endlagersystems (§ 7 EndlSiUntV) sind, zusätzlich zur Ableitung der zu erwartenden und abweichenden Entwicklungen, anhand überschlägiger Abschätzungen und Analogiebetrachtungen für jeden Untersuchungsraum die in § 7 Abs. 6 Nr. 3 Buchst. a) bis e) EndlSiUntV (im folgenden Aspekte a) bis e) genannt) zu bewerten.

§ 7 Abs. 6 Nr. 3 *Buchst. a) bis f)* EndlSiUntV

a) die räumliche Charakterisierbarkeit des Endlagersystems,

b) die langfristige Stabilität der geologischen Verhältnisse,

c) die thermischen Verhältnisse im Endlagersystem,

d) der Flächenbedarf zur Realisierung des Endlagerbergwerkes,

e) die Möglichkeit zur Ausweisung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und

f) für die zu erwartenden Entwicklungen die Möglichkeit des sicheren Einschlusses der Radionuklide nach § 4 EndlSiAnfV durch Zusammenwirken verschiedener Sicherheitsfunktionen innerhalb der wesentlichen Barrieren.

In BT-Drs. 19/19291 (S. 51) wird erläutert, dass im Falle der Verwendung von numerischen Berechnungen zur Bewertung der Aspekte „*sachgerechte und dem jeweiligen Kenntnisstand entsprechende Vereinfachungen der zu Grunde liegenden Modelle*“ gemacht werden können . Die Begriffe „überschlägige Abschätzung“ und „Analogiebetrachtung“ werden in der EndlSiUntV nicht definiert. Eine Begriffsbestimmung ist daher durch die BGE formuliert worden und Teil des Glossars dieses Dokuments.

Neben der Bewertung der Aspekte und der Ableitung der zu erwartenden und abweichenden Entwicklungen umfasst die Analyse des Endlagersystems nach § 7 EndlSiUntV für die rvSU auch die Darstellung der Möglichkeit des sicheren Betriebs, die Darlegung der Relevanz der einzelnen geowissenschaftlichen Abwägungskriterien und eine Beurteilung der zusätzlichen Endlagerung von schwach- und mittelradioaktiven Abfällen (SMA).

Der Kerninhalt der Analyse des Endlagersystems ist damit eine Reihe von Beurteilungen und Bewertungen, die, unterstützt durch den Informationsgewinn, anschließend in die umfassende Bewertung nach § 10 EndlSiUntV eingehen (vgl. Abbildung 155).Hinter den in Abbildung 155 genannten Punkten sind entsprechende Arbeitsabläufe hinterlegt. Innerhalb der umfassenden Bewertung wird eine Synthese erfolgen, die auf den in § 7 EndlSiUntV erarbeiteten separaten Ergebnissen aufbaut.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

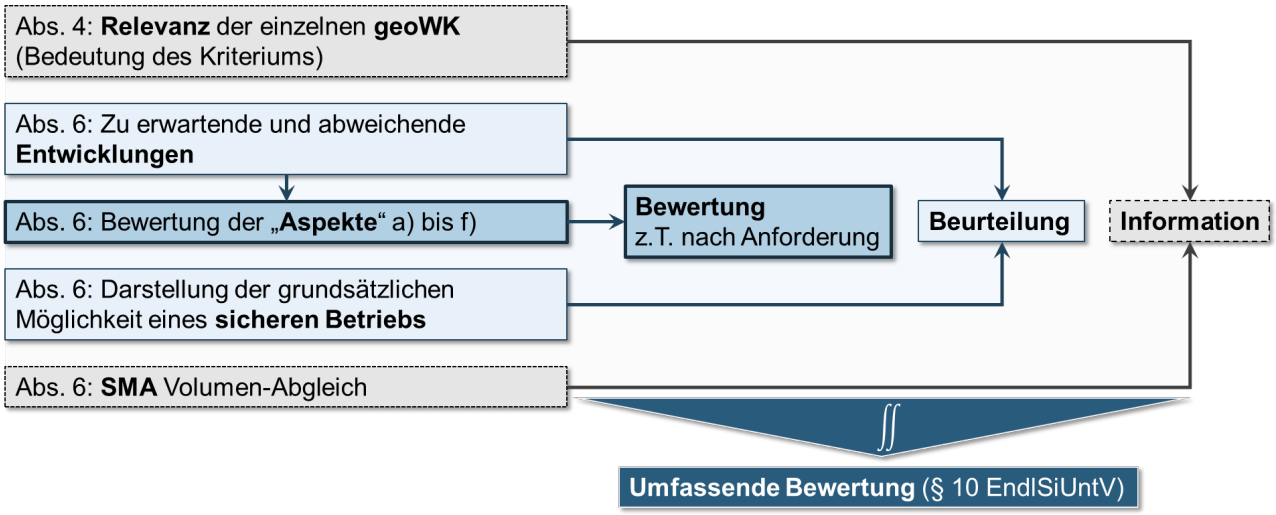


Abbildung 155: Schematischer Überblick der zu erarbeitenden Inhalte der Analyse des Endlagersystems gemäß § 7 Abs. 6 EndlSiUntV für die rvSU

Innerhalb des Workflows der rvSU kommt es aus chronologischer Sicht zwei Mal zu Bewertungen im Rahmen von § 7 EndlSiUntV (vgl. Kapitel 1.2.1). Die erste Bewertung wird in Kapitel 6 erläutert und beschreibt die qualitative Bewertung des sicheren Einschlusses. Dies beinhaltet u. a. die Bewertungen der Aspekte a) (die räumliche Charakterisierbarkeit des Endlagersystems) und b) (die langfristige Stabilität der geologischen Verhältnisse).

Das vorliegende Kapitel umfasst die Ableitung von Entwicklungen, die quantitative Bewertung des sicheren Einschlusses anhand der Aspekte e) und f) und die Bewertung des Flächenbedarfs und der thermischen Verhältnisse anhand der Aspekte c) und d). Die Analyse und Bewertung der Aspekte wird, wenn es die Sachlage zulässt und zielführend ist, flächendifferenziert erfolgen. Die Differenzierung erfolgt zweidimensional und ermöglicht es idealerweise einen Teiluntersuchungsraum kleinteilig zu bewerten. Für eine Bewertung werden die entsprechenden Parameter ggf. durch Karten visualisiert.

Darüber hinaus beinhaltet dieses Kapitel die Darstellung der Möglichkeit des sicheren Betriebs, die Darlegung der Relevanz der einzelnen geowissenschaftlichen Abwägungskriterien und eine Beurteilung der zusätzlichen Endlagerung von SMA.

Die Bearbeitungsreihenfolge der Aspekte c) bis f) ist in den nachfolgenden Kapiteln so ausgelegt, dass Aspekte, die inhaltlich aufeinander aufbauen, nacheinander, und jene, die zusammenhängen, gemeinsam betrachtet werden. Diese Reihenfolge entspricht daher nicht der Aufzählungsreihenfolge in der EndlSiUntV. Die Bearbeitungsreihenfolge mit entsprechenden Inhalten und der Verortung im Dokument ist in Abbildung 156 dargestellt.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

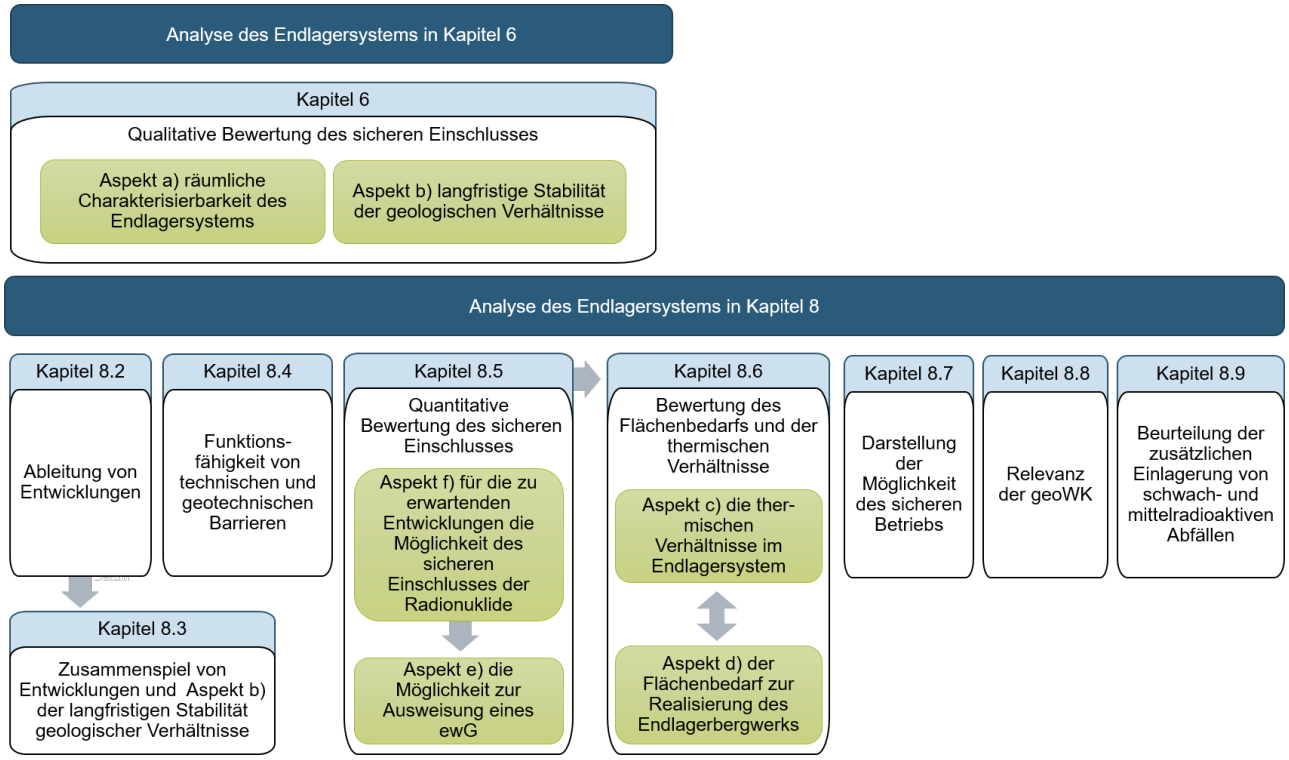


Abbildung 156: Schematische Darstellung der Inhalte des Analyse des Endlagersystems mit Fokus der in Kapitel 8 beschriebenen Arbeitsschritte und der Reihenfolge der Bearbeitung von Aspekten a) bis f)

8.2 Ableitungen von Entwicklungen

8.2.1 Zusammenfassung

In den rvSU werden erstmals im Standortauswahlverfahren mögliche künftige Entwicklungen des Endlagersystems systematisch abgeleitet. Dabei werden sogenannte zu erwartende und abweichende Entwicklungen betrachtet (§ 7 Abs. 6 Nr. 1 EndlSiUntV). Diese bilden die Grundlage für die Bewertung der Langzeitsicherheit eines Endlagersystems und basieren auf der systematischen Betrachtung von FEP-Katalogen (*Features, Events and Processes*, Deutsch: Komponenten, Ereignisse und Prozesse) in Verbindung mit den Sicherheitsfunktionen (siehe Kapitel 4.1.3). Ein FEP-Katalog ist eine systematische, gegliederte Beschreibung eines Endlagersystems und der darin bestehenden Beeinflussungen und Abhängigkeiten von Prozessen und Komponenten.

Das vorliegende Konzept beschreibt die Methodik zur Aufstellung der FEP-Kataloge für den Schritt 2 der Phase I des Standortauswahlverfahrens sowie die Vorgehensweise für die Ableitung der Entwicklungen mittels Szenarien, siehe Abbildung 157.

Im Schritt 2 der Phase I des Standortauswahlverfahrens wird ein FEP-Katalog auf Basis der FEP-Kataloge aus internationalen und nationalen Projekten sowie unter der Berücksichtigung der verfahrensspezifischen Anforderungen und Vorgaben des Standortauswahlgesetzes (StandAG) und nachfolgender Verordnungen erstellt. Es werden die geogenen Prozesse, die im Bereich der Teilgebiete in Deutschland auftreten, zusammengestellt. Dies ergibt eine geowissenschaftliche Langzeitprognose, die alle Untersuchungsräume abdeckt. Im Anschluss erfolgt ein Screening[21] pro Wirtsgestein (Steinsalz, Tongestein, Kristallin) und der sich in den Endlagersystemen ergebenden Abhängigkeiten der FEP. Das Ergebnis sind fünf wirtsgesteinsspezifische FEP-Kataloge für die jeweiligen Wirtsgesteine, wobei für Steinsalz und für das kristalline Wirtsgestein zwei Kataloge erstellt werden, um sowohl die steile, bzw. stratiforme Lagerung (Steinsalz) und die Endlagersysteme Typ 1, bzw. 2 (Kristallin) abzubilden (Kapitel 4.1). Dies ist notwendig um die spezifischen Unterschiede im Endlagersystem, welche sich aus dem Wirtsgestein in Verbindung mit einem Sicherheitskonzept und der wirtsgesteinsspezifischen Auslegung des Endlagers ergeben, berücksichtigen zu können. Die in der Phase I erarbeiteten FEP-Kataloge bieten gleichzeitig eine Grundlage für detailliertere FEP-Kataloge, die in der Phase II des Standortauswahlverfahrens zur Anwendung kommen sollen.

Im Schritt 2 der Phase I werden die wirtsgesteinsspezifischen FEP-Kataloge als Basis für eine wirtsgesteinsspezifische Ableitung der zu erwartenden und abweichenden Entwicklungen genutzt. In der wirtsgesteinsspezifischen Ableitung der Entwicklungen werden im wesentlichen Betrachtungen des maximalen Einflusses durchgeführt. Im Rahmen der zu erwartenden Entwicklungen der wirtsgesteinsspezifischen Endlagersysteme werden Sensitivitätsanalysen durchgeführt und erste Einschätzungen von Ungewissheiten getroffen. Anschließend werden die wirtsgesteinsspezifischen FEP-Kataloge auf Basis der Geosynthese und der geowissenschaftlichen Langzeitprognose mit den lokalen

[21] Der Begriff Screening bezeichnet die systematische Prüfung und Filterung eines FEP-Katalogs hinsichtlich Relevanz in einem Endlagersystem.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

Ausprägungen im Untersuchungsraum versehen und in Bezug auf Abhängigkeiten und Relevanzen der FEP bewertet. Diese Anpassung der Abhängigkeiten und Relevanz dient als Ausgangspunkt für eine Differenzbetrachtung zu den zuvor abgeleiteten wirtsgesteinsspezifischen Entwicklungen. Da die wirtsgesteinsspezifischen Ableitungen der Entwicklungen unter Einbeziehung größerer möglicher Wertespannen für verschiedene Ausprägungen durchgeführt werden und so z. B. Prozesse maximal viele Komponenten beeinflussen können, werden die untersuchungsraumspezifischen Entwicklungen eine geringere Anzahl relevanter Abhängigkeiten haben. Die so abgeleiteten untersuchungsraumspezifischen Entwicklungen werden entweder zur quantitativen Bewertung hinsichtlich der radiologischen Konsequenzen als Rechenfälle für die Modellierung formuliert, oder qualitativ bzw. verbalargumentativ im Rahmen der Bewertung des sicheren Einschlusses bewertet.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

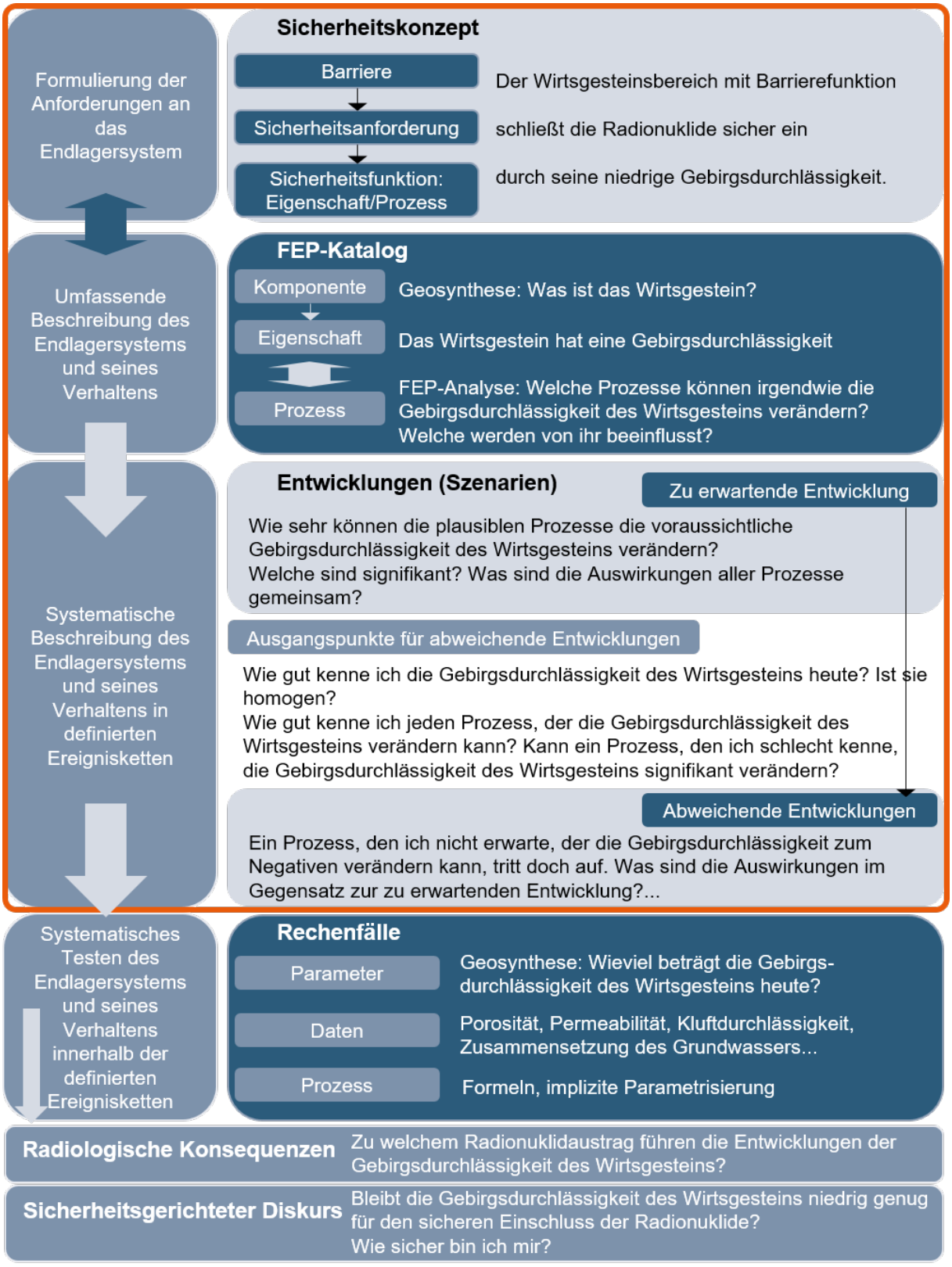


Abbildung 157 Schema der Ableitung der Entwicklungen vom Sicherheitskonzept bis zum abschließenden sicherheitsgerichteten Diskurs mit Leitfragen für jeden Arbeitsschritt. Die Schritte unterhalb des roten Kastens werden ab Kapitel 8.5 beschrieben.

8.2.2 Einleitung – Entwicklungen des Endlagersystems

Die Entwicklungen des Endlagersystems beschreiben verschiedene Szenarien für die Zukunft des Endlagersystems, ohne den Anspruch, die tatsächliche Entwicklung exakt vorherzusagen. Sie werden auf systematische Weise abgeleitet und bilden die Grundlage für die Bewertung der Langzeitsicherheit. Um die Bewertung auf eine strukturierte Art und Weise nachvollziehbar durchzuführen und zu dokumentieren, wird ein sogenannter FEP-Katalog verwendet, in dem zentral die Komponenten des Endlagersystems sowie ablaufende Prozesse beschrieben werden. Der Bezug zur Sicherheit wird dabei über die Sicherheitsfunktionen der Barrieren des Endlagersystems hergestellt (siehe Kapitel 4.1.3.3).

Dazu heißt es in BT-Drs. 19/19291, S. 29:

„Durch ein systematisches Vorgehen nach dem internationalen Stand von Wissenschaft und Technik, beispielsweise unter Einbeziehung so genannter FEP-Kataloge ('Features, Events and Processes') und der systematischen Betrachtung von Sicherheitsfunktionen soll sichergestellt werden, dass die identifizierten möglichen Entwicklungen die tatsächliche zukünftige Entwicklung des Endlagers abdecken."

Die besondere Herausforderung des Standortauswahlverfahrens in Deutschland im Vergleich zu internationalen Endlagerprojekten liegt in der Größe der im jetzigen Schritt 2 von Phase I zu betrachtenden Fläche mit 54 % der Bundesrepublik (BGE 2020g) in Verbindung mit der Betrachtung von drei unterschiedlichen Wirtsgesteinen. Vor diesem Hintergrund ist es notwendig, die Methodik zur Ableitung der Entwicklungen aufbauend auf nationalen und internationalen Projekten anzupassen. Dabei hat der Gesetzgeber bereits unterschiedliche Vereinfachungen der Methodik formuliert, die für die rvSU zulässig sind. Diese werden im folgenden Kapitel aufgegriffen.

Die Ableitung der Entwicklungen des Endlagersystems ist der erste Schritt in der Analyse des Endlagersystems in den rvSU (§ 7 Abs. 6 Nr. 1 EndlSiUntV). Die Ableitung der Entwicklungen baut dabei auf den Grundlagen auf, die mit der Ausweisung der Untersuchungsräume und der Geosynthese sowie der vorläufigen Endlagerauslegung gelegt werden (Kapitel 5; Abbildung 158 und Kapitel 4.2).

Die Kernfrage in der Analyse eines Endlagersystems besteht darin, ob die Sicherheitsfunktionen der Barrieren im Endlagersystem allen möglicherweise schädigenden Prozessen standhalten können, um einen sicheren Einschluss der Radionuklide im Endlager im gesamten Betrachtungszeitraum von einer Million Jahren zu gewährleisten.

Im übergeordneten Kontext der Standortauswahl stellt sich außerdem die Frage, welches Endlagersystem (an welchem Standort) unter Berücksichtigung seiner Entwicklungen die größten Sicherheitsreserven für den sicheren Einschluss der Radionuklide bereithält, also nicht nur sicher, sondern auch robust ist (siehe Kapitel 9).

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

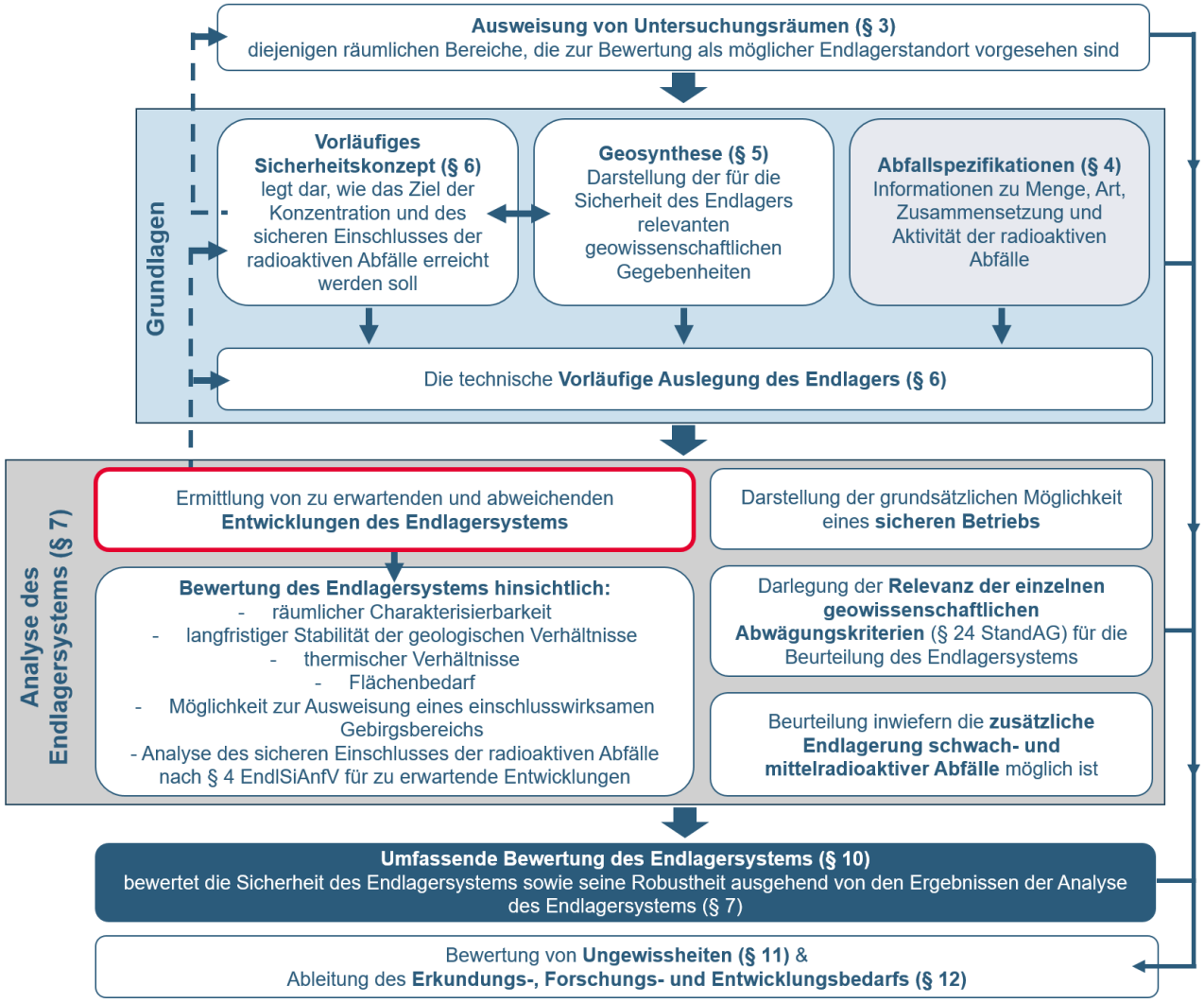


*Abbildung 158: Einordnung der Ableitung der Entwicklungen in den Kontext der rvSU*In den vSU sind dabei die zu erwartenden und die abweichenden Entwicklungen des Endlagersystems von zentraler Bedeutung um diese Fragen zu beatworten. Die EndlSiAnfV beschreibt in § 3 Abs. 2 bis 4 diese Entwicklungen folgendermaßen:

§ 3 Abs. 2 bis 4 EndlSiAnfV ***Entwicklungen des Endlagersystems***

(2) *Die für die Auslegung des Endlagers und die Bewertung der Langzeitsicherheit relevanten Entwicklungen des Endlagersystems und der geologischen Situation am Endlagerstandort innerhalb des Bewertungszeitraumes sind systematisch zu ermitteln, zu beschreiben und einzuordnen als*

1. *zu erwartende Entwicklungen oder*
2. *abweichende Entwicklungen.*

Die Einordnung ist zu begründen.

(3) *Als zu erwartende Entwicklungen einzuordnen sind diejenigen Entwicklungen, die sicher oder in der Regel eintreten werden, insbesondere hinsichtlich der geologischen und klimatischen*

Situation, der geologischen, technischen und geotechnischen Barrieren sowie der einzulagernden Abfälle.

(4) *Als abweichende Entwicklungen einzuordnen sind diejenigen Entwicklungen, die nicht zu erwarten sind, aber hinsichtlich der geologischen und klimatischen Situation, der technischen und geotechnischen Barrieren sowie der einzulagernden Abfälle eintreten können."*

Die Verordnung nennt außerdem hypothetische Entwicklungen hinsichtlich der oben genannten Punkte und Entwicklungen auf Grundlage zukünftiger menschlicher Aktivitäten (§ 3 Abs. 5 bis 6 EndlSiAnfV). Diese beiden Arten von Entwicklungen sind erst ab Phase II des Standortauswahlverfahrens zu betrachten.

In Ergänzung zum vorherigen Zitat wird für die rvSU die Ableitung der Entwicklungen in § 7 Abs. 6 Nr. 1 EndlSiAnfV präzisiert.

§ 7 Abs. 6 Nr. 1 EndlSiAnfV

„auf Basis der geowissenschaftlichen Langzeitprognose sind geogene Einwirkungen und Prozesse zu identifizieren und zu bewerten sowie daraus zu erwartende und abweichende Entwicklungen abzuleiten;"

Für die erste Ableitung der Entwicklungen innerhalb der rvSU wird hierbei der Fokus auf die geogenen Prozesse gelegt, dabei findet sowohl die Identifizierung als auch die Bewertung mittels der FEP-Methodik statt. Die Definition bzw. Identifizierung wird in der übergeordneten Zusammenstellung aller potenziell relevanten Komponenten und Prozesse (Kapitel 8.2.3.1) durchgeführt, während eine Bewertung, ob ein Prozess tatsächlich auftritt, innerhalb des FEP-Screenings (Kapitel 8.2.3.6) erfolgt.

Mit den Entwicklungen sollen die Ungewissheiten bezüglich der tatsächlichen Zukunft des Endlagersystems abgedeckt werden. Die Ungewissheiten bezüglich des Zustands des Endlagersystems nehmen zu, je weiter der betrachtete Zeitpunkt in der Zukunft liegt. Gegenüber den zu erwartenden und abweichenden Entwicklungen muss ein Endlager sicher und robust sein, alle Einflüsse, gegen die es darüber hinaus unempfindlich ist, zeigen seine darüber hinausgehende Robustheit. Zu solchen hypothetischen Entwicklungen gehört beispielsweise ein Szenario, in dem alle Barrieren komplett versagen, und die Überlegung, was in der Folge geschehen würde, und welche Umstände dahin führen könnten. Die verschiedenen Gruppen von Entwicklungen, die qualitative Wahrscheinlichkeitsstufen abbilden, sollen dabei einen Raum aufspannen, der mit großer Sicherheit alle möglichen Entwicklungen des Endlagersystems von seinem Ausgangszustand aus umhüllt (Abbildung 159). Damit sind die zu erwartenden und abweichenden Entwicklungen die Basis für die Bewertung des sicheren Einschlusses eines Endlagersystems in den rvSU.

Mit der Kategorisierung nach „zu erwarten" und „abweichend" wird gegenüber den früheren Sicherheitsanforderungen von mathematisch-abstrakten Prinzipien Abstand genommen (BT-Drs. 19/19291). Stattdessen soll die Gewichtung der Entwicklungen bei der Optimierung des

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

Endlagersystems in den Vordergrund gerückt werden (siehe Abbildung 160). Da eine Angabe von statistischen Wahrscheinlichkeiten für z. B. das Auftreten von Prozessen selten tatsächlich möglich ist, wird so explizit ein Rahmen für begründete Experteneinschätzungen geschaffen. Die verwendete Nomenklatur ist in Tabelle 68 zu finden.

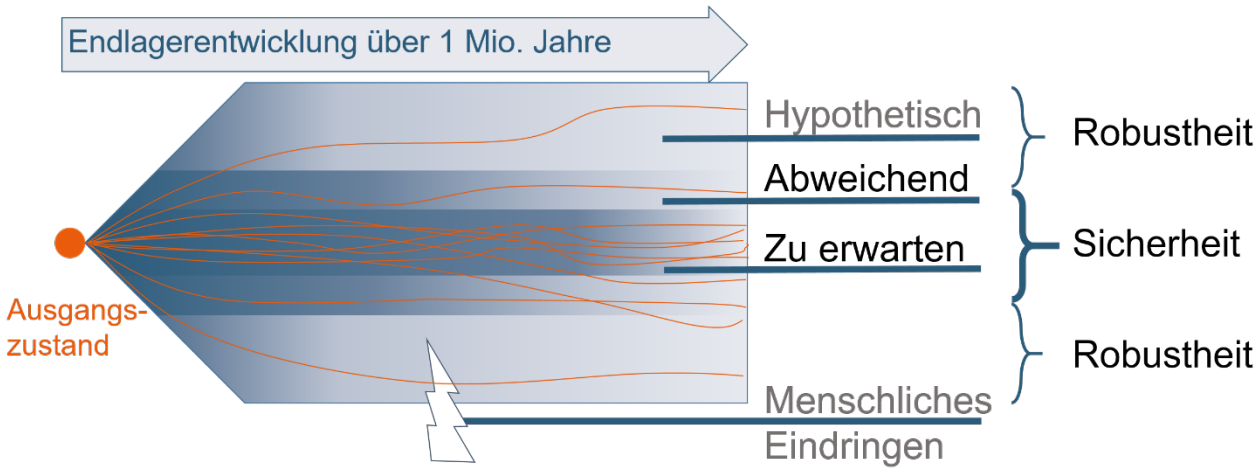


Abbildung 159: Entwicklungen im Endlagersystem.
Die Entwicklungen (orange Linien) beschreiben, wie sich das Endlagersystem von seinem Initialzustand über die nächsten eine Million Jahre entwickeln kann. In den rvSU werden die zu erwartenden und die abweichenden Entwicklungen des Endlagersystems betrachtet. Vereinfacht ist hier ein einziger Ausgangszustand gezeigt.

Im Nachgang der Analyse des Endlagersystems muss geprüft werden, ob Optimierungspotenziale vorliegen (§ 12 EndlSiAnfV). Dabei spielen die Entwicklungen eine wesentliche Rolle, da sich aus ihnen die Anforderungen an die Barrieren und ihre Sicherheitsfunktionen ergeben, die durch Standortauswahl, Sicherheitskonzept und Endlagerauslegung erfüllt werden müssen (Kapitel 4.2.9, Abbildung 160). In den rvSU werden Entwicklungen und vorläufiges Sicherheitskonzept noch parallel und unabhängig voneinander auf Basis bestehender Literatur und wirtsgesteinsspezifischer Konzepte erarbeitet. In späteren Phasen wird das vorläufige Sicherheitskonzept auf Basis der Entwicklungen standortbezogen weiterentwickelt.

Die Optimierung basiert vorrangig auf den zu erwartenden Entwicklungen, ergänzend auf den abweichenden. Die hypothetischen Entwicklungen, die in Phase II erstmals abgeleitet werden, werden nur nachrangig in die Optimierung einbezogen. In den weiterentwickelten vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (wvSU) wird dabei auf die Arbeiten der rvSU aufgesetzt. In den umfassenden vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (uvSU) in der Phase III des Standortauswahlverfahrens, findet eine weitere Anwendung der systematischen Ableitung von Entwicklungen für die potenziellen Endlagerstandorte statt.

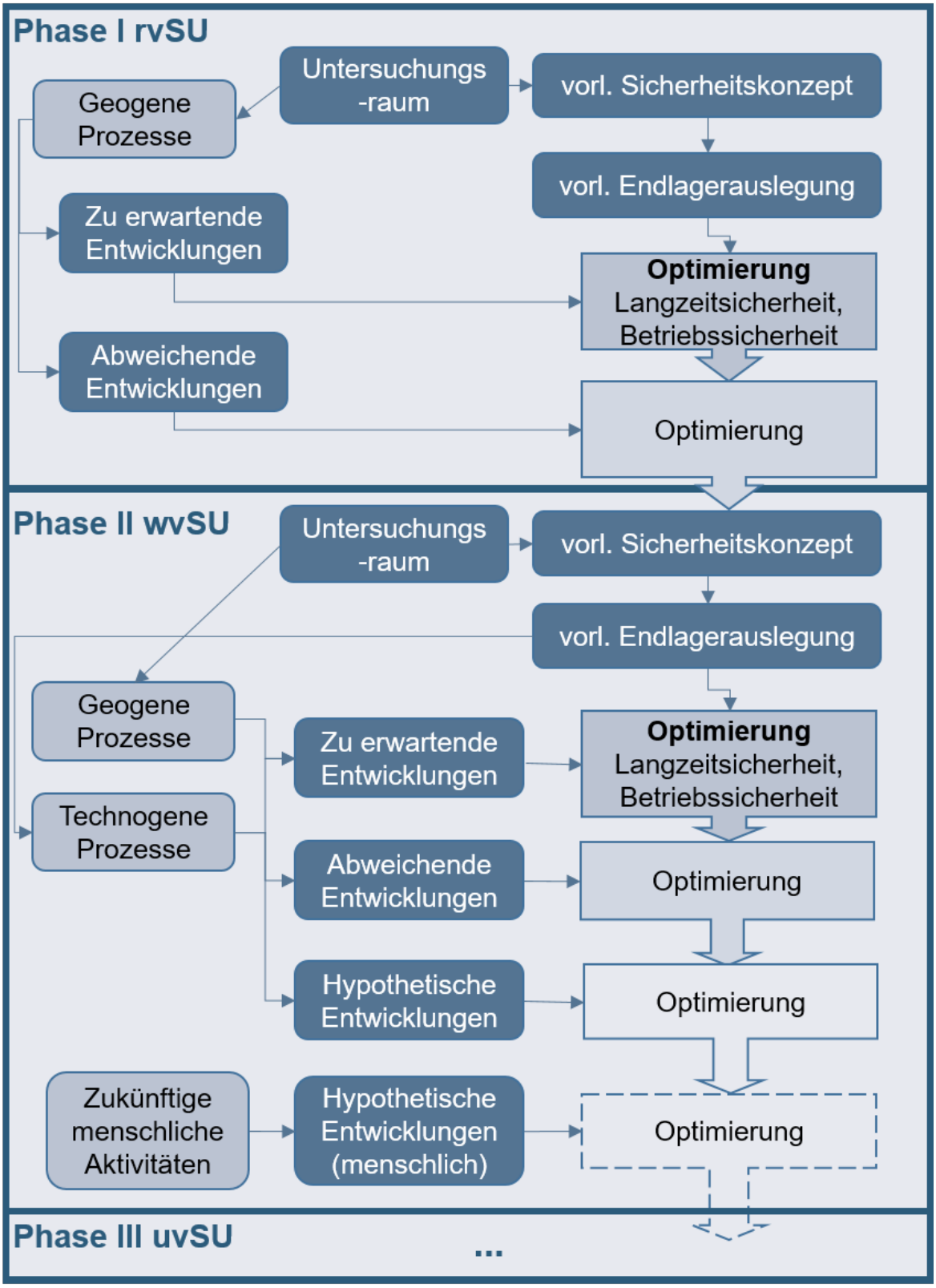


Abbildung 160: Die systematisch abgeleiteten Entwicklungen des Endlagersystems sind zentral für die schrittweise Optimierung von Sicherheitskonzept und Endlagerauslegung. Gezeigt ist der Rahmen für die Optimierung, der sich aus den Vorgaben der EndlSiAnfV und EndlSiUntV ergibt.

Bereits in Schritt 1 Phase I wurden in beschränkter Form die Entwicklungen des Endlagersystems in das Standortauswahlverfahren einbezogen. Dies erfolgte über die Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen und geowissenschaftlichen Abwägungskriterien. In mehreren Passagen, teilweise in der Begründung zum StandAG (BT-Drs. 18/11398), ist dort die Rede von „erwarteten Prozessen", z. B. im Ausschlusskriterium 5 „vulkanische Gefährdung" heißt es „es ist vulkanische Aktivität zu erwarten" (§ 22 Abs. 2 StandAG). Die Ausschlusskriterien „Aktive Störungszonen", „Seismische Aktivität" und „Vulkanische Aktivität" basieren auf geogenen Prozessen, die in der geowissenschaftlichen Langzeitprognose behandelt werden.

Wie bereits in Kapitel 5.4.4 beschrieben ist die Ableitung der Entwicklungen des Endlagersystems eine Voraussetzung für die Prüfung der Mindestanforderungen an den Erhalt der Barrierewirkung (§ 23 Abs. 5 Nr. 5 StandAG). Dort werden Eigenschaften von Komponenten (Mächtigkeit, Ausdehnung und Gebirgsdurchlässigkeit des Wirtsgesteins) genannt, die im Bewertungszeitraum nicht übermäßig verändert werden dürfen, was dem Erhalt von Sicherheitsfunktionen in den rvSU entspricht.

§ 23 Abs. 5 Nr. 5 StandAG

„5. Erhalt der Barrierewirkung

es dürfen keine Erkenntnisse oder Daten vorliegen, welche die Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, insbesondere die Einhaltung der geowissenschaftlichen Mindestanforderungen zur Gebirgsdurchlässigkeit, Mächtigkeit und Ausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs über einen Zeitraum von einer Million Jahren zweifelhaft erscheinen lassen."

Die Bewertung erfolgt im Rahmen der quantitativen Bewertung des sicheren Einschlusses (Kapitel 8.5).

Auch in den geowissenschaftlichen Abwägungskriterien wird auf die Entwicklungen des Endlagersystems Bezug genommen, beispielsweise in der Begründung zu Anlage 5 zu § 24 StandAG (Günstige gebirgsmechanische Eigenschaften): „*Bewertungsgrundlage sind die zu erwartenden Auswirkungen der Errichtung von Hohlräumen auf die Struktur und Stabilität des Wirtsgesteines."*

Die zitierte Passage soll beispielhaft illustrieren, dass Entwicklungen des Endlagersystems auch dort in die Bewertung eingehen. Die methodische Verbindung der rvSU mit der Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien wird noch erarbeitet.

In Ergänzung zum Glossar werden die wesentlichen Begriffe der FEP-Methodik und Ableitung der Entwicklungen in Tabelle 68 erläutert.

Tabelle 68: Begriffserklärungen für die FEP-Methodik und Ableitung von Entwicklungen

Begriffe	Erläuterung
Komponente	Physisch greifbarer, allgemein beschriebener Teil des Endlagersystems (z. B. Abfallbehälter)
Eigenschaft	Beschreibt eine Eigenschaft einer Komponente, z. B. die „Stoffliche Zusammensetzung“ des Abfallbehälters. Eine Komponente kann mehrere Eigenschaften haben.
Prozess	Potenziell ablaufender Prozess im Endlagersystem.
Ereignis	Ein Prozess, der in einem sehr kurzen Zeitraum auftritt. Wird in der Methodik dieses Dokumentes in Prozess aufgelöst, siehe Kapitel 8.2.3.4.
Plausibles/nicht auszuschließendes / auszuschließendes Auftreten	Qualitative Angabe, wie wahrscheinlich es ist, dass ein bestimmter Prozess auftritt, die in drei qualitative Wahrscheinlichkeitsstufen eingeordnet wird: Plausibel / nicht auszuschließen / auszuschließen.
Voraussichtliche/mögliche Ausprägung	Quantitative (Zahlenwert, Formel) oder qualitative („stark“, „hoch“) Aussage zu einem Prozess oder den Eigenschaften einer Komponente, die in zwei qualitative Wahrscheinlichkeitsstufen eingeordnet wird: Voraussichtlich / möglich.
Screening	Systematische Prüfung und Filterung eines FEP-Katalogs hinsichtlich Relevanz in einem Endlagersystem.
Ausgangszustand	Beschreibt alle Komponenten inklusive der spezifischen Werte von Eigenschaften zum Zeitpunkt des Verschlusses des Endlagerbergwerks (t = 0). Dieser dient somit als Startpunkt für die Bewertung des sicheren Einschlusses. Der Ausgangszustand kann aufgrund von Ungewissheiten neben der voraussichtlichen auch mögliche Ausprägungen haben.
Szenario	Szenario wird synonym zum Begriff Entwicklungen verwendet. *„The term “scenario” represents (and is understood as) a description of a potential specific evolution of the repository system from a given initial state.“* (Röhlig et al. 2012, S. 33). Deutsch: Der Begriff Szenario beschreibt (und wird als solche verstanden) eine potenzielle spezifische Entwicklung des Endlagersystems, ausgehend von einem Ausgangszustand.
Szenarienentwicklung	Wird synonym zum Begriff „Ableitung von Entwicklungen“ verwendet, siehe Kapitel 8.2.4.

8.2.3 FEP-Katalog

Der FEP-Katalog ist das zentrale Werkzeug für die Ableitung der Entwicklungen eines Endlagersystems. In diesem Katalog sind alle wesentlichen Komponenten und Prozesse zusammengetragen, die das Endlagersystem beschreiben und beeinflussen. Aus deren gegenseitigen Wechselwirkungen werden die Entwicklungen des Systems abgeleitet. Der Umfang des FEP-Katalogs bestimmt so den Detaillierungsgrad der Entwicklungen. Der FEP-Katalog stellt das verbindende Element zwischen den Grundlagen und der Analyse des Endlagersystems dar, indem er die Inhalte der Geosynthese und der vorläufigen Endlagerauslegung strukturiert und einer systematischen Analyse zugänglich macht (siehe Abbildung 158) (z. B. OECD-NEA 2016).

Die Abkürzung „FEP“ steht für „Features, Events and Processes“ und wird mit „Komponenten, Ereignisse und Prozesse“ übersetzt, siehe Tabelle 68. Im vorliegenden Dokument wird dennoch der Ausdruck „FEP“ genutzt, da dieser als ein eigenständiger etablierter Fachbegriff angesehen wird (z. B. im Begriff „FEP-Katalog“). Komponenten, Ereignisse und Prozesse werden folgendermaßen definiert:

- Die *Komponenten* sind physisch greifbare Teile des Endlagersystems, wie z. B. das Wirtsgestein. Sie sind durch Eigenschaften charakterisiert.
- *Ereignisse* sind Vorgänge und Veränderungen, die kurzzeitig im Vergleich zum Bewertungszeitraum sind, z. B. Erdbeben.
- *Prozesse* sind lang andauernde Vorgänge und Veränderungen, die im Bewertungszeitraum ablaufen, z. B. der Zerfall langlebiger Radionuklide.

Der FEP-Katalog für die Standortauswahl wird ausgehend von der OECD-NEA IFEP-Liste entwickelt (Organisation for Economic Cooperation and Development – Nuclear Energy Agency International Features, Events and Processes List, Capouet et al. (2019)). Darüber hinaus werden die FEP-Kataloge früherer deutscher Projekte in der Endlagerforschung wie der VSG – Vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben (Wolf 2012; Wolf et al. 2012), ANSICHT (Stark et al. 2014; Stark et al. 2016) und dem Endlagerprojekt Morsleben einbezogen. Weiterhin finden die FEP-Kataloge der internationalen Projekte zu Sicherheitsuntersuchungen in Schweden (SKB 2011a, 2011b, 2011c), in der Schweiz (Nagra 2002b, 2002a), Belgien (OECD-NEA 2018, ONDRAF/NIRAS) und Frankreich (Andra 2005d, 2005a) Berücksichtigung.

Die internationalen Projekte sind generell deutlich weiter fortgeschritten, weshalb diese Publikationen eine äußerst wichtige Quelle darstellen, auch wenn sie zumeist ein größeres Alter als deutsche Projekte haben. Sie bilden den Stand von Wissenschaft und Technik in dem Sinne ab, dass sie als Abschlussberichte von erfolgreich abgeschlossenen Verfahrensphasen oder sogar Teil von Genehmigungsanträgen nicht das Mögliche, sondern das praktisch Machbare illustrieren. Deutsche Projekte zur Endlagerung des letzten Jahrzehnts zeigen wichtige Entwicklungen in verschiedenen Forschungsfeldern auf, seit der VSG (Fischer-Appelt et al. 2013) wurde jedoch in Deutschland keine standortbezogene Sicherheitsuntersuchung vollständig durchgeführt.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

8.2.3.1 Auswahl relevanter FEP in den rvSU

Bezüglich der Auswahl der Komponenten und Prozesse, die in den rvSU zu betrachten sind, beschreibt § 7 Abs. 2 EndlSiUntV die wesentlichen Vereinfachungen, die für Phase I Schritt 2 des Standortauswahlverfahrens bei der Durchführung der rvSU getroffen werden dürfen. Dabei bezieht sich § 7 Abs. 6 Nr. 1 EndlSiUntV direkt auf die für die Ableitung der Entwicklungen wichtigen Prozesse.

§ 7 Abs. 6 Nr. 1 EndlSiUntV

„1. auf Basis der geowissenschaftlichen Langzeitprognose sind geogene Einwirkungen und Prozesse zu identifizieren und zu bewerten sowie daraus zu erwartende und abweichende Entwicklungen abzuleiten;“

Aufbauend auf Fischer-Appelt et al. (2013); Mrugalla (2011), Mrugalla (2014) und Stark (2014) wird die geowissenschaftliche Langzeitprognose als die Entwicklung eines Standorts ohne den Einfluss eines Endlagers verstanden. Sie umfasst also ausschließlich die geogenen Prozesse.

Nach § 7 Abs. 6 Nr. 2 EndlSiUntV dürfen außerdem vereinfachende Annahmen zu den technischen und geotechnischen Barrieren getroffen werden.

§ 7 Abs. 6 Nr. 2 EndlSiUntV

„2. es ist davon auszugehen, dass technische und geotechnische Barrieren ihre Funktion grundsätzlich in dem jeweils vorgesehenen Zeitraum erfüllen, sofern dies nach dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik nicht ausgeschlossen erscheint;“

Aus diesen Punkten wird gefolgert, dass die Ableitung der Entwicklungen, und damit die Auswahl der Prozesse und Komponenten in den rvSU, auf die geologische Barriere und die geogenen Prozesse, die ein Endlagersystem beeinflussen können, konzentriert ist.

Durch die in § 7 Abs. 6 EndlSiUntV getroffenen Vereinfachungen für die rvSU wird von der Durchführung einer Langzeitsicherheitsanalyse nach § 9 EndlSiUntV abgesehen. Dadurch entfällt ebenfalls die Prüfung der Integrität und Robustheit nach §§ 5 und 6 EndlSiAnfV, in der unter anderem der Erhalt der sicherheitsrelevanten Eigenschaften für die Entwicklungen des Endlagersystems (Integrität) gefordert wird. Stattdessen wird eine Bewertung der Möglichkeit des sicheren Einschlusses der Radionuklide nach § 4 EndlSiAnfV vorgegeben, welche sich in den rvSU im Kern auf den einschlusswirksamen Gebirgsbereich bzw. den Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion, der einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich aufnehmen kann, beziehen, da nach § 7 Abs. 6 Nr. 2 EndlSiUntV angenommen werden darf, dass technische und geotechnische Barrieren ihre angedachte Funktion erfüllen. Daraus kann geschlussfolgert werden, dass der Fokus der in den rvSU abgeleiteten Entwicklungen auf den Beeinflussungen der geologischen Barrieren durch geogene Prozesse liegt.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

Die Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe kommt in ihrem Abschlussbericht (BT-Drs. 18/9100, S. 291) zu dem Schluss, dass eine umfassende Ableitung von Szenarien in der frühen Phase des Standortauswahlverfahrens (vor der Standorterkundung) nicht angemessen erscheint. Stattdessen wird auf Vergleiche mit vorherigen Sicherheitsanalysen verwiesen. Dieser Vorschlag findet sich nicht in der EndlSiUntV, da nach § 7 Abs. 6 EndlSiUntV die Ableitung von zu erwartenden und abweichenden Entwicklungen bereits in den rvSU gefordert wird. Dennoch wurden entsprechende Vereinfachungen für die Durchführung der rvSU, insbesondere der Ableitung von Entwicklungen, in die EndlSiUntV aufgenommen, welche im vorangegangenen Text ausgeführt wurden. Daraus folgt die Interpretation, dass in den rvSU zwar keine vollumfängliche Ableitung der Entwicklungen stattfinden soll, aber eine Methodik erarbeitet und erste, thematisch begrenzte Entwicklungen von Endlagersystemen auf Basis der geogenen Prozesse abgeleitet werden sollen.

Die Entwicklungen der wirtsgesteinsspezifischen vorläufigen Endlagerauslegungen werden daher nur als Teil der Entwicklungen der wirtsgesteinsspezifischen Endlagersysteme untersucht, nicht aber untersuchungsraumspezifisch. Beeinflussungen von technischen/geotechnischen Komponenten werden in den untersuchungsraumspezifischen Betrachtungen nur schematisch (d. h. durch ihre räumliche Lage) erfasst, da diese Komponenten in den rvSU nur auf grundlegenden Angaben beruhen und nur in Grundzügen spezifiziert sind, sodass die Bestimmung von Wechselwirkungen und Abhängigkeiten unangemessen erscheint, siehe Begründung zu § 6 Abs. 4 EndlSiUntV (BT-Drs. 19/19291) im Folgenden:

„…sind in dieser Phase [rvSU] nur die grundlegenden Angaben zur Auslegung der Endlagersysteme erforderlich. Diese dienen als konzeptionelle Grundlage für die Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen, bedeuten aber keine irreversible Vorfestlegung für das weitere Verfahren.“

Potenzielle Beeinträchtigungen der geologischen Barriere durch die technischen und geotechnischen Komponenten werden durch den Fokus auf geogene Prozesse methodisch vernachlässigt. Gemeint sind z. B. Gasbildung im Zuge der Behälterkorrosion, die zur Rissbildung in der geologischen Barriere führen kann, oder die Entwässerung des Wirtsgesteins bei Erwärmung durch die Zerfallsprozesse im eingebrachten Abfall. Über das Sicherheitskonzept wird die Anforderung an die Auslegung der technischen und geotechnischen Komponenten gestellt, dass sie die Sicherheitsfunktionen des Wirtsgesteinsbereichs mit Barrierefunktion nicht beeinträchtigen. Ebenso wird angenommen, dass das Wirtsgestein keine Schädigung durch den Betrieb des Endlagers erfährt. Bei den Weiterentwicklungen des Sicherheitskonzepts im Verlauf des Verfahrens, die gemäß § 6 Abs. 1 EndlSiUntV erfolgen sollen, muss in späteren Phasen in Betracht gezogen werden, wie sich gegebenenfalls unvermeidbare Schädigungen des Wirtsgesteins durch Auffahrung und Betrieb auswirken und begrenzen lassen, die in dieser Phase noch vernachlässigt werden.

FEP-Kataloge werden mit einem Anspruch auf Vollständigkeit aufgestellt (Röhlig et al. 2012, S. 97). Eine umfassende Abbildung im FEP-Katalog wird in den rvSU nur im geowissenschaftlichen Themenbereich angestrebt: geogene Prozesse und geologische Barriere(n). Die Auswahl der Kompo-

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

nenten und Prozesse in einem FEP-Katalog beeinflusst direkt, welche Entwicklungen für ein Endlagersystem beschrieben werden können, da systematisch nur solche FEP berücksichtigt werden, die auch im Katalog aufgenommen wurden.

8.2.3.2 Entwicklung des FEP-Katalogs für das Standortauswahlverfahren

Die Komplexität des Standortauswahlverfahrens, gemeinsam mit den Vorgaben aus EndlSiAnfV und EndlSiUntV, erfordert methodische Neuerungen bei der Zusammenstellung des FEP-Katalogs und der Ableitung der Entwicklungen. Es müssen drei Wirtsgesteine, unterschiedliche Lagerungen sowie zwei grundlegend verschiedene Sicherheitskonzepte berücksichtigt werden. Die sich daraus ergebenden fünf wirtsgesteinsspezifischen Endlagersysteme sind:

- Tongestein in stratiformer Lagerung mit einschlusswirksamem Gebirgsbereich
- Steinsalz in steiler Lagerung mit einschlusswirksamem Gebirgsbereich
- Steinsalz in stratiformer Lagerung mit einschlusswirksamem Gebirgsbereich
- Kristallines Wirtsgestein mit einschlusswirksamem Gebirgsbereich
- Kristallines Wirtsgestein, bei dem der sichere Einschluss durch technische und geotechnische Barrieren gewährleistet wird

Mit den ausgewiesenen Teilgebieten (BGE 2020g) werden 54 % der Landesfläche Deutschlands abgedeckt. Zur Betrachtung von 90 Teilgebieten muss ein Minimum von 90 Untersuchungsräumen ausgewiesen werden. Für jeden Untersuchungsraum ist eine Analyse des Endlagersystems durchzuführen (§ 7 EndlSiUntV) und entsprechend sind jeweils die Entwicklungen abzuleiten.

Zur Bewältigung dieser Aufgabe ist ein einzelner FEP-Katalog als Ausgangspunkt aller Entwicklungen nicht ausreichend. Es soll daher ein gestaffeltes System von FEP-Katalogen aufgebaut werden, angefangen bei einer übergeordneten Zusammenstellung aller potenziell relevanten FEP (Abbildung 161 oben). Auf dieser Ebene werden ebenfalls alle geogenen Prozesse, die im Bereich der Teilgebiete in Deutschland auftreten, zusammengestellt. Dies ergibt eine geowissenschaftliche Langzeitprognose, die alle Untersuchungsräume abdeckt, beispielhaft dargestellt in Abbildung 162.

Für alle Untersuchungsräume eines Wirtsgesteins werden auf Basis der in der geowissenschaftlichen Langzeitprognose zusammengetragenen Daten die auftretenden geogenen Prozesse innerhalb eines ersten Screenings identifiziert. So werden fünf wirtsgesteinsspezifische FEP-Kataloge für die oben genannten wirtsgesteinsspezifischen Endlagersysteme abgeleitet, die auch die wirtsgesteinsspezifische Endlagerauslegung mit einbeziehen (Abbildung 161 Mitte).

Aus der durch die wirtsgesteinsspezifischen FEP-Kataloge getroffenen Vorauswahl werden die geogenen Prozesse und Komponenten für die Untersuchungsräume in den Wirtsgesteinen spezifiziert, die Endlagerauslegung findet an dieser Stelle keinen Eingang. Unter erneuter Einbeziehung der geowissenschaftlichen Langzeitprognose sowie der Geosynthese ergeben sich so innerhalb eines zweiten Screenings untersuchungsraumspezifische FEP-Kataloge (Abbildung 161 unten).

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

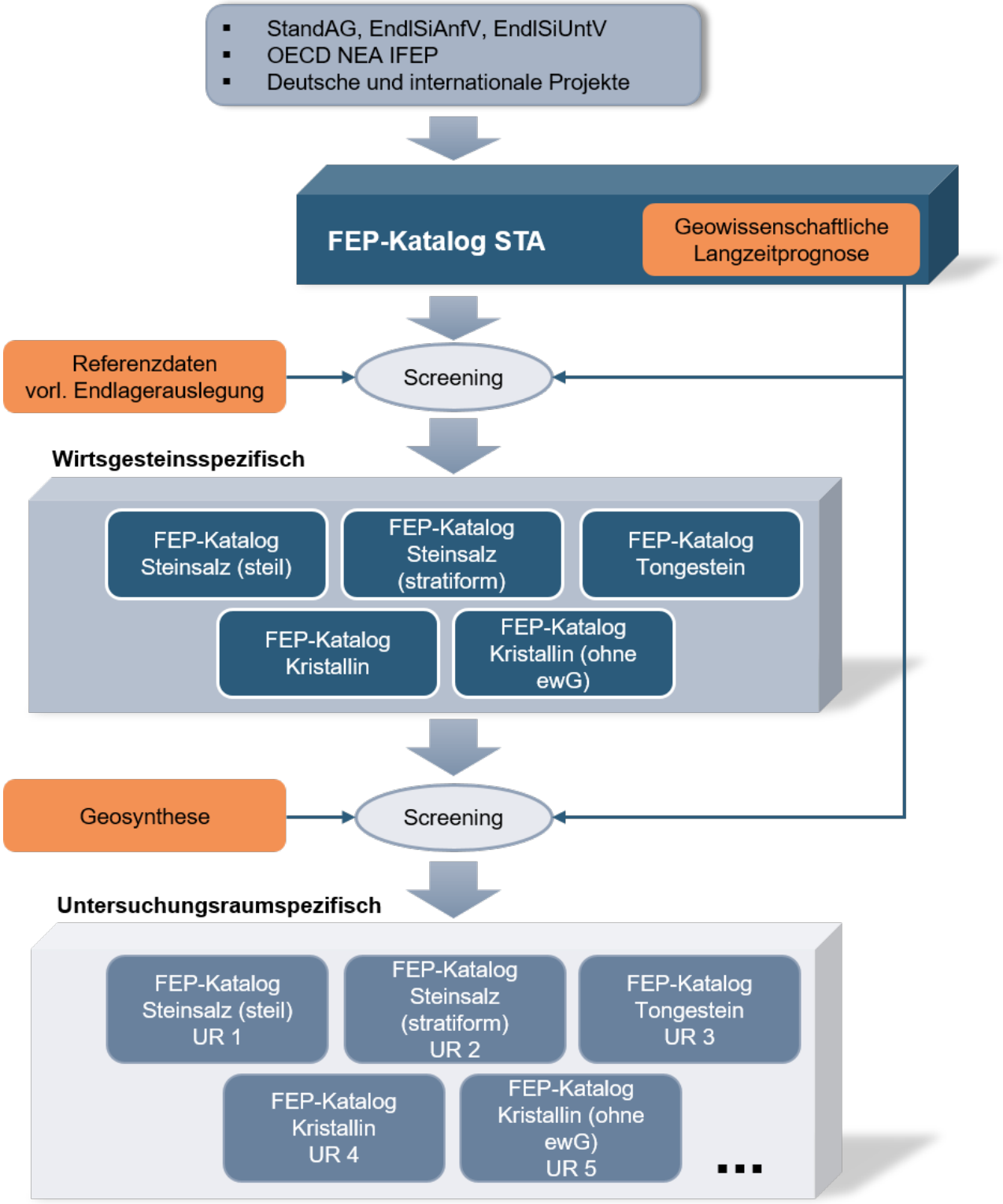


Abbildung 161: Schema zur Darstellung der unterschiedlichen FEP-Kataloge. STA steht für den BGE-Bereich Standortauswahl.

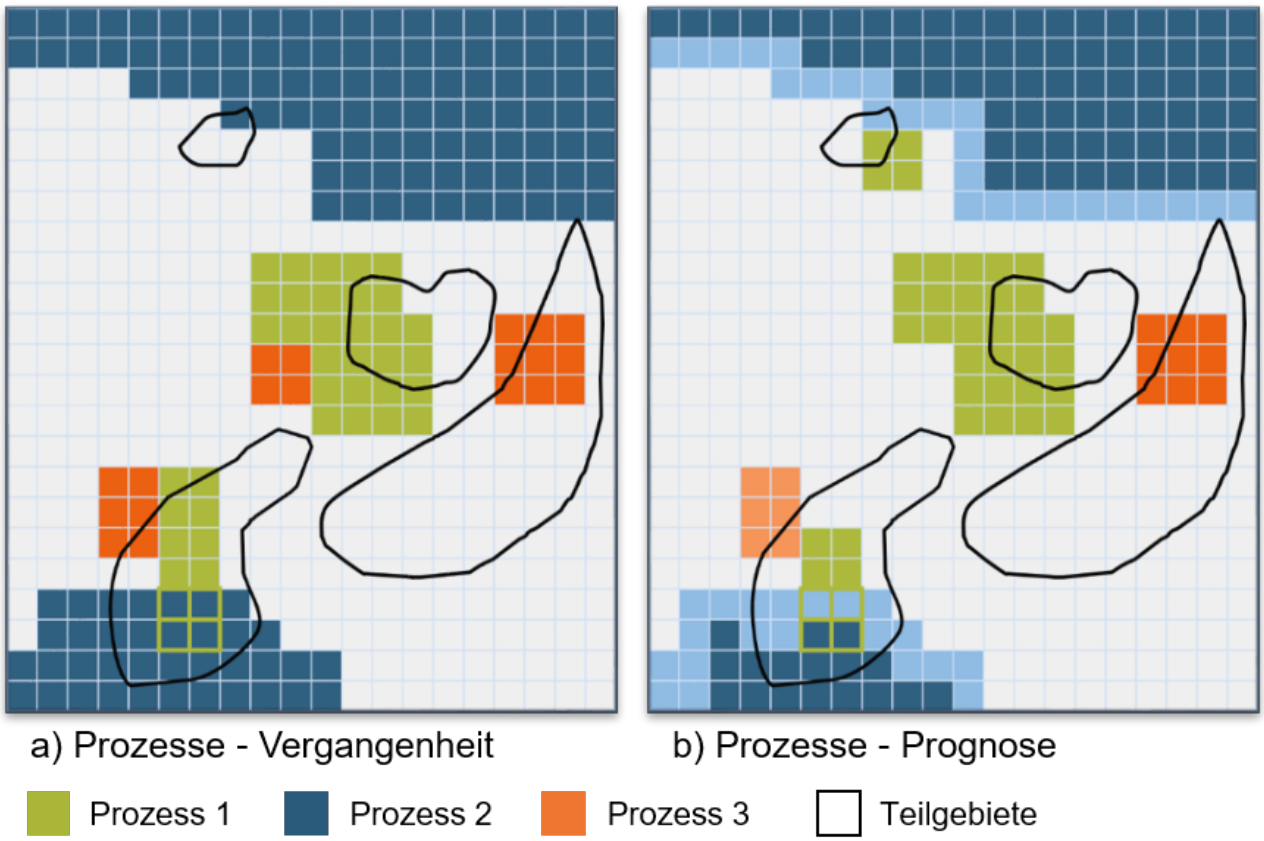


Abbildung 162: Die geowissenschaftliche Langzeitprognose fasst alle geogenen Prozesse zusammen, die im Bereich der ausgewiesenen Teilgebiete auftreten (Screening). Dazu gehört eine Beschreibung des Auftretens in der Vergangenheit (a), anhand dessen eine Prognose für die Zukunft aufgestellt wird (b). Ein Prozess kann dabei in der Vergangenheit aufgetreten sein und in der Zukunft weiterhin für die gleiche Region prognostiziert werden (Prozess 1 Mitte und unten, Prozess 2, Prozess 3 links und rechts). Prozesse können in der Zukunft auftreten, ohne in der Vergangenheit aufgetreten zu sein, wenn entsprechende Rahmenbedingungen vorliegen (Prozess 1 oben). Ein Prozess kann in der Vergangenheit aufgetreten sein, ist aber abgeschlossen und nicht Teil der Prognose (Prozess 3 Mitte). Es können mehrere Prozesse im gleichen Gebiet auftreten (Prozess 1 und 2 unten). Die Prognose kann mit Ungewissheiten behaftet sein (Prozess 2: hellblauer Rand in b, Prozess 3: blasse Farbe links in b). Das Raster dient nur der Visualisierung.

8.2.3.3 Komponenten und Eigenschaften

Im Weiteren werden „Features“ als *Komponenten* bezeichnet (Capouet et al. 2019). Ein Zustand beschreibt eine Komponente, deren Eigenschaften konkrete Werte zugeordnet sind. Der Methodik von Stark et al. (2016) folgend können Eigenschaften von Komponenten nur von Prozessen verändert werden.

Im FEP-Katalog für die rvSU besitzt jede Komponente Eigenschaften, die aus einer zuvor festgelegten Zusammenstellung ausgewählt werden. Eigenschaften bilden das Bindeglied zwischen Komponenten und Prozessen. Dabei werden die Eigenschaften der Komponenten von den Prozessen beeinflusst, wodurch eine Abhängigkeit entsteht. Diese Abhängigkeiten sind zentral für die Ableitung von Entwicklungen (siehe auch Kapitel 8.2.4).

Beispiel 78: Komponenten des FEP-Katalogs

Beispiel – Komponenten

Im FEP-Katalog des ANSICHT SÜD Projekts (Stark et al. 2016) finden sich beispielsweise folgende Komponenten, bzw. dort genannt „Komponenten des Endlagersystems“ (Auszug):

Tabelle 69: Auszug von Komponenten aus dem ANSICHT SÜD FEP-Katalog

AnSichT SÜD Komponenten
1. Abfallmatrix
2. Brennelement-Behälter
...
18. Wirtsgestein
19. Lösungen im Wirtsgestein
20. Gase im Wirtsgestein
21. Nebengebirge
22. Lösungen im Nebengebirge
23. Gase im Nebengebirge
...

Diese Komponenten müssen für das jeweilige Projekt angepasst werden. So werden in den rvSU die technischen Barrieren im Endlagersystem nur auf wirtsgesteinsspezifischer Ebene betrachtet, nicht jedoch auf untersuchungsraumspezifischer.

Ob ein Prozess eine Eigenschaft einer Komponente beeinflusst, hängt in der Regel von der jeweiligen Ausprägung des Prozesses und der Eigenschaft (Zahlenwert oder qualitative Einordnung) ab. Dies wird im FEP-Screening der entsprechenden Stufe der Methodik festgestellt (siehe Kapitel 8.2.3.6). Sobald einer Eigenschaft einer Komponente ein Zahlenwert zugeordnet wird, hat sie

einen Zustand angenommen. Unter Einwirkung von Prozessen kann sich der Zustand einer Komponente im Bewertungszeitraum ändern (Abbildung 163). Die gemeinsame Betrachtung aller Komponenten zu einem bestimmten Zeitpunkt im Bewertungszeitraum ist der Zustand des Endlagersystems.

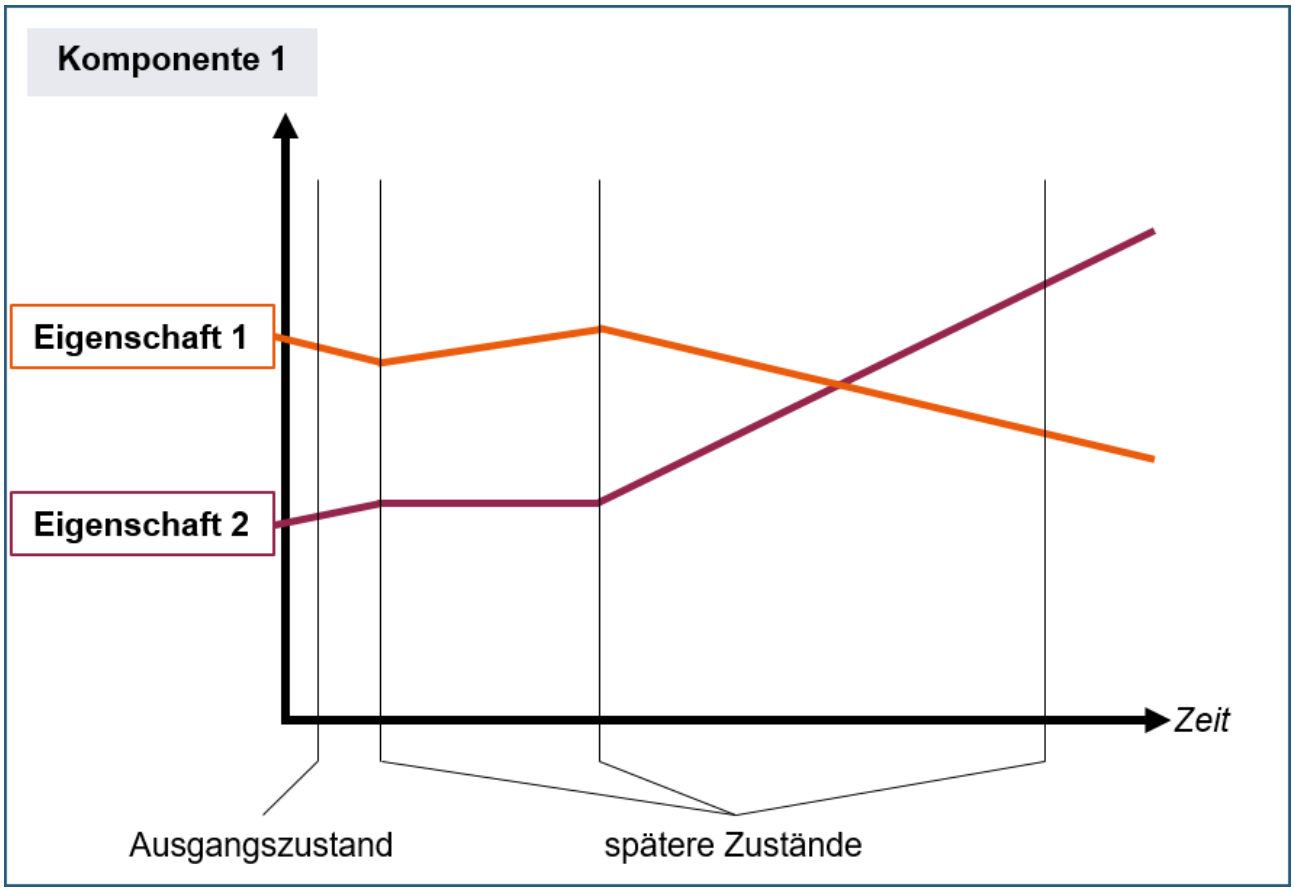


Abbildung 163: Durch Änderungen der Werte ihrer Eigenschaften können Komponenten im Bewertungszeitraum verschiedene Zustände durchlaufen

8.2.3.4 Ereignisse und Prozesse

Unter dem Begriff *Prozesse* werden sowohl Ereignisse als auch Prozesse verstanden, die im Endlagersystem bzw. Endlagerbereich auftreten können. Innerhalb der Methodik des Standortauswahlverfahrens werden in Anlehnung an Stark et al. (2016) Ereignisse und Prozesse in einer Kategorie zusammengefasst, da die Unterscheidung der beiden lediglich auf ihrer Dauer beruht.

Dabei werden in der Ableitung der Entwicklungen nur Prozesse berücksichtigt, die im FEP-Katalog gelistet sind. Prozesse werden für die rvSU in die Kategorien „geogene Prozesse“ und „technogene und sonstige Prozesse“ eingeteilt.

Die Liste der geogenen Prozesse orientiert sich dabei an den Prozessen, die in deutschen Vorgängerprojekten in der geowissenschaftlichen Langzeitprognose betrachtet wurden (Mrugalla 2011, 2014; Stark 2014), außerdem an den Untergruppen „1.2 Geological Factors“ und „1.3 Climatic Factors“ der OECD-NEA FEP-Gruppe „1. External Factors“ (Capouet et al. 2019).

Geogene Prozesse umfassen exogene Prozesse (z. B. Erosion) und endogene Prozesse (z. B. Diagenese). Das Auftreten dieser Prozesse ist unabhängig von der Existenz des Endlagers und beschreibt die Entwicklung eines möglichen Endlagerstandorts ohne Endlager. Demzufolge kann der Einfluss der geogenen Prozesse auf die Sicherheitsfunktionen der Barrieren im Endlagersystem nur durch die Anpassung von Standort und Tiefenlage optimiert werden (Standortänderung bewirkt andere Ausprägung von z. B. glazialer Erosion, Änderung der Tiefenlage bewirkt andere Ausprägung von z. B. Diagenese).

Unter die „sonstigen und technogenen Prozesse“ fallen beispielsweise diejenigen Prozesse, die Mobilisierung und Transport der Radionuklide beschreiben, wie auch allgemein physikalische oder chemische Prozesse (Wärmestrom, Lösung/Fällung), sowie Prozesse, die die Entwicklung technischer Barrieren beeinflussen. Technogene Prozesse beschreiben diejenigen Prozesse, die erst durch das Vorhandensein des Endlagerbergwerks am Standort auftreten können. Sie sind abhängig von der technischen Auslegung des Endlagers. Der Einfluss der technogenen Prozesse auf die Sicherheitsfunktionen im Endlagersystem kann durch die Anpassung der Endlagerauslegung optimiert werden.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

Beispiel 79: Geogene Prozesse im FEP-Katalog

Beispiel – Prozesse

In der OECD-NEA IFEP-Liste finden sich beispielsweise folgende geogene Prozesse(Auszug):

Tabelle 4 Auszug von Prozessen aus der OECD-NEA IFEP-Liste

OECD-NEA IFEP Events and Processes	deutsche Übersetzung
1.2.5 Magmatic and volcanic activity	Magmatische und vulkanische Aktivität
1.2.6 Metamorphism	Metamorphose
1.2.8 Regional erosion and sedimentation	Regionale Erosion und Sedimentation
1.2.9 Diagenesis	Diagenese
1.2.11 Salt dissolution	Salzauflösung

Die Auswahl der Prozesse muss für das jeweilige Vorhaben angepasst werden, teilweise kann es sinnvoll sein, auch die Definition zu spezifizieren. So wird in den rvSU vorausgesetzt, dass die technischen Barrieren im Endlagersystem allen Prozessen standhalten, die möglicherweise den Erhalt der Sicherheitsfunktionen der Barrieren oder Wirtsgesteins beeinträchtigen könnten. Damit können solche Prozesse wie verstärkte Korrosion der Behälter durch Mikroben und die zugehörigen FEP im FEP-Katalog der rvSU vernachlässigt werden.

8.2.3.5 Verknüpfung zwischen Sicherheitsfunktionen und Komponenten und Prozessen

Um den Fokus der Szenarienentwicklung auf die sicherheitsrelevanten Aspekte innerhalb der Methodik zu lenken, ist es unerlässlich, eine Verknüpfung zwischen den im Sicherheitskonzept aufgestellten Sicherheitsfunktionen und den Komponenten und Prozessen innerhalb der FEP-Methodik zu schaffen.

Die Sicherheitsfunktionen der im Sicherheitskonzept definierten Barrieren finden sich als Eigenschaften von Komponenten in der FEP-Methodik wieder (Abbildung 164). Der Komponente „Wirtsgestein“ wird z. B. die Eigenschaft „Gebirgsdurchlässigkeit“ zugeschrieben, die im Sicherheitskonzept als Sicherheitsfunktion ausgewiesen ist. Der Erhalt der Sicherheitsfunktion(en) der Barriere ist daher über die Entwicklung der entsprechenden Eigenschaften in der Methodik erfassbar gemacht. Ein Prozess, der beispielsweise die Gebirgsdurchlässigkeit des Wirtsgesteins beeinflusst (Kapitel 8.2.3.6), hätte damit eine potenzielle sicherheitsrelevante Auswirkung, welche in einer Entwicklung beschrieben werden kann.

Auch wenn hier von der Komponente „Wirtsgestein“ gesprochen wird ist noch offen, ob diese so im FEP-Katalog definiert wird. Da das Wirtsgestein über den Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion, der einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich aufnehmen kann, oft hinausgeht, kann es stattdessen sinnvoll sein, dies über zwei getrennte Komponenten abzubilden.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

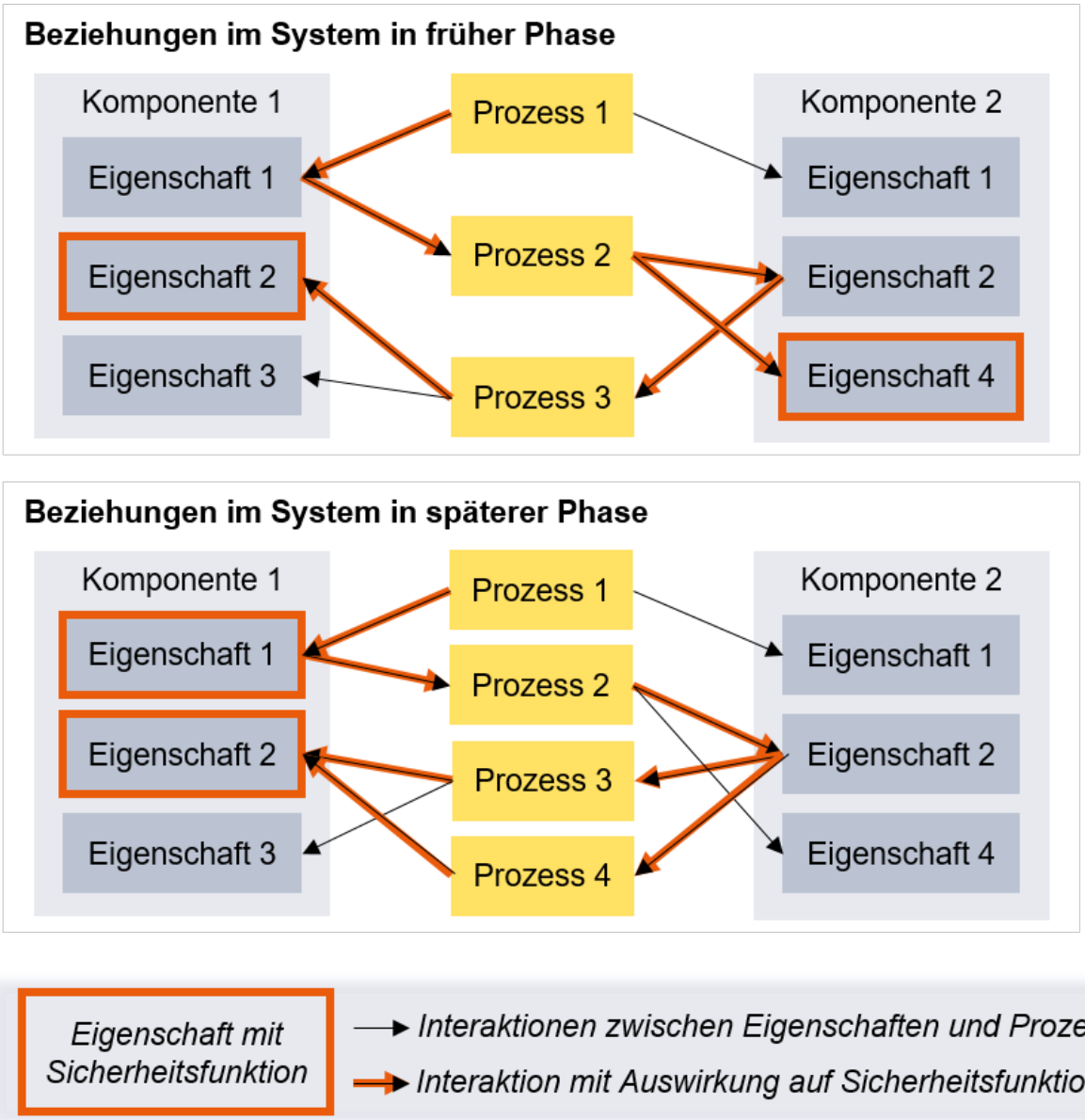


Abbildung 164 *Veranschaulichung der im FEP-Katalog dokumentierten Beeinflussungen zwischen Prozessen und den Eigenschaften von Komponenten.*
Diese machen es möglich, direkte und indirekte Auswirkungen (rote Pfeile) auf Sicherheitsfunktionen (rote Kästen) zu identifizieren. Manche Komponenten erfüllen nur in bestimmten Zeiträumen Sicherheitsfunktionen. Durch die Entwicklung des Systems können Wechselwirkungen über die Zeit an Signifikanz für die Sicherheit gewinnen oder verlieren.

Für eine umfängliche Abbildung der Sicherheitsfunktionen in der FEP-Methodik ist es wichtig, einen Schritt einzuführen, in dem die entsprechenden Verknüpfungen zwischen Hauptsicherheitsfunktionen und Sicherheitsfunktionen und damit Eigenschaften der Komponenten hergestellt werden. Da die Entscheidung über eine solche Verknüpfung erheblich für die Ableitung der Entwicklungen ist, sollte im Dienste der Nachvollziehbarkeit eine entsprechende Dokumentation geführt werden und zur fachlichen Absicherung extern zur Diskussion gestellt werden (siehe auch Kapitel 8.2.3.9).

Sicherheitsfunktionen sind nach § 2 Nr. 8 EndlSiAnfV definiert als:

§ 2 Nr. 8 EndlSiAnfV

„eine Eigenschaft einer Komponente des Endlagersystems oder ein im Endlagersystem ablaufender Prozess, die oder der sicherheitsrelevante Anforderungen an ein sicherheitsbezogenes System oder Teilsystem oder an eine Einzelkomponente erfüllt;“

Aus dieser Definition ist ersichtlich, dass es sich bei Sicherheitsfunktionen nicht nur um Eigenschaften von Komponenten, sondern auch um Prozesse handeln kann. Im Rahmen dieser Methodik wird jedoch davon ausgegangen, dass jeder Prozess, der eine Sicherheitsfunktion darstellen kann, ebenso durch die Eigenschaft einer Komponente abgebildet werden kann. Beispielweise wird der Prozess „Sorption“ durch die Sorptionskoeffizienten der Komponente bestimmt.

Beispiel 80: Beispiel zur Verknüpfung von Hauptsicherheitsfunktionen und Eigenschaften im FEP-Katalog

Beispiel zur Verknüpfung von Hauptsicherheitsfunktionen und Eigenschaften im FEP-Katalog

Tabelle 70: Beispiel zur Verknüpfung von Hauptsicherheitsfunktionen und Eigenschaften im FEP-Katalog

Sicherheitskonzept	FEP-Methodik
Hauptsicherheitsfunktion	**Sicherheitsfunktion – Eigenschaften von Komponenten**
Erhalt der Barrierewirkung	Gebirgsdurchlässigkeit
…	…

8.2.3.6 FEP-Screening

Das FEP-Screening wird an zwei Punkten auf dem Weg zur Ableitung der Entwicklungen durchgeführt und resultiert in der Aufstellung der wirtsgesteinsspezifischen und untersuchungsraumspezifischen FEP-Kataloge (Abbildung 161), auf deren Grundlage die Szenarienentwicklung stattfindet. Der Begriff Screening bezeichnet die systematische Prüfung und Filterung eines FEP-Katalogs hinsichtlich Relevanz in einem Endlagersystem.

Dieser Arbeitsschritt ist in drei Unterpunkte gegliedert. Zuerst werden die entsprechenden Ausprägungen der Komponenten und Prozesse hinterlegt, anschließend folgt eine Einschätzung bezüglich der Auftretens von Prozessen. Der Begriff „Auftreten“ wird für die meisten Prozesse und Komponenten als verständlicher empfunden als der Begriff der „bedingten Eintrittswahrscheinlichkeit“ (z. B. Beuth et al. 2012). Jedoch ist der Begriff „Auftreten“ breiter zu verstehen und nicht rein auf das

räumliche Auftreten beschränkt. Im letzten Schritt wird geprüft, ob eine Abhängigkeit, bzw. Beeinflussung, zwischen den Komponenten und Prozessen besteht. Das Zusammenwirken von Komponenten und Prozessen wird so definiert, dass Komponenten üblicherweise über Prozesse miteinander interagieren (Capouet et al. 2019):

„Features typically interact with one another via processes and in some cases events.“[22]

Um diese Abhängigkeit zu prüfen, werden alle Eigenschaften einer Komponente den Prozessen unter Berücksichtigung der Ausprägungen in Form einer Matrix gegenübergestellt und

1. geprüft, ob die Eigenschaft von dem Prozess beeinflusst wird, und
2. ob der Prozess von der Eigenschaft beeinflusst wird.

So wird festgestellt, ob zwischen einer Komponente und einem Prozess eine Abhängigkeit besteht oder nicht. Die Entscheidung, ob eine Abhängigkeit besteht, wird in vielen Fällen subjektiv geprägt sein und wird dementsprechend dokumentiert sowie zur Diskussion gestellt (siehe Kapitel 8.2.3.9).

8.2.3.7 Wirtsgesteinsspezifische FEP-Kataloge

Grundlage der für die rvSU abzuleitenden Entwicklungen ist eine Zusammenstellung aller für die Phase I des Standortauswahlverfahrens relevanten Komponenten und Prozesse, die sich durch die spezifischen Vorgaben der EndlSiAnfV und EndlSiUntV ergeben (siehe Kapitel 8.2.3.1). Dabei wird der FEP-Katalog der OECD-NEA, die International FEP List (IFEP), als Ausgangspunkt gewählt sowie ein Abgleich mit den Projekten VSG und ANSICHT vorgenommen.

Aus dem übergeordneten FEP-Katalog aller für die Phase I des Standortauswahlverfahrens relevanten FEP wird mit Hilfe der geowissenschaftlichen Langzeitprognose und Referenzdaten ein FEP-Screening durchgeführt (Abbildung 165). Das Ergebnis dieses Screenings sind fünf separate, wirtsgesteinsspezifische FEP-Kataloge: Steinsalz (steil), Steinsalz (stratiform), Tongestein, Kristallin (mit einschlusswirksamem Gebirgsbereich) und Kristallin (ohne einschlusswirksamen Gebirgsbereich/ mit sicherem Einschluss durch technische und geotechnische Barrieren), siehe auch Abbildung 161. Die FEP-Kataloge werden in einer Datenbank aufgestellt (dazu mehr in Kapitel 8.2.3.9).

Die geowissenschaftliche Langzeitprognose enthält die wesentlichen Informationen zu den Ausprägungen der geogenen Prozesse in Deutschland. Diese Ausprägungen werden in die fünf FEP-Kataloge übertragen, wobei die Spanne der Werte mit der räumlichen Verteilung der Teilgebiete des entsprechenden Wirtsgesteins abgeglichen wird. Des Weiteren erfolgt an dieser Stelle eine Berücksichtigung der vorläufigen Endlagerauslegung. Anschließend folgt für jeden der Kataloge ein Screening auf Relevanz und Abhängigkeiten der Prozesse, siehe auch Abbildung 165. Dadurch wird eine zu erwartende Entwicklung für jedes wirtsgesteinsspezifische Endlagersystem aufgestellt, die an vielen Punkten noch unscharf ist. Dennoch können auf Basis dieser wirtsgesteinsspezifischen zu erwartenden Entwicklungen Sensitivitätsanalysen und Signifikanzuntersuchungen zur Relevanz von Parametern und Prozessen angestoßen werden.

[22] Deutsch: „Komponenten interagieren typischerweise über Prozesse miteinander, in manchen Fällen über Ereignisse.“

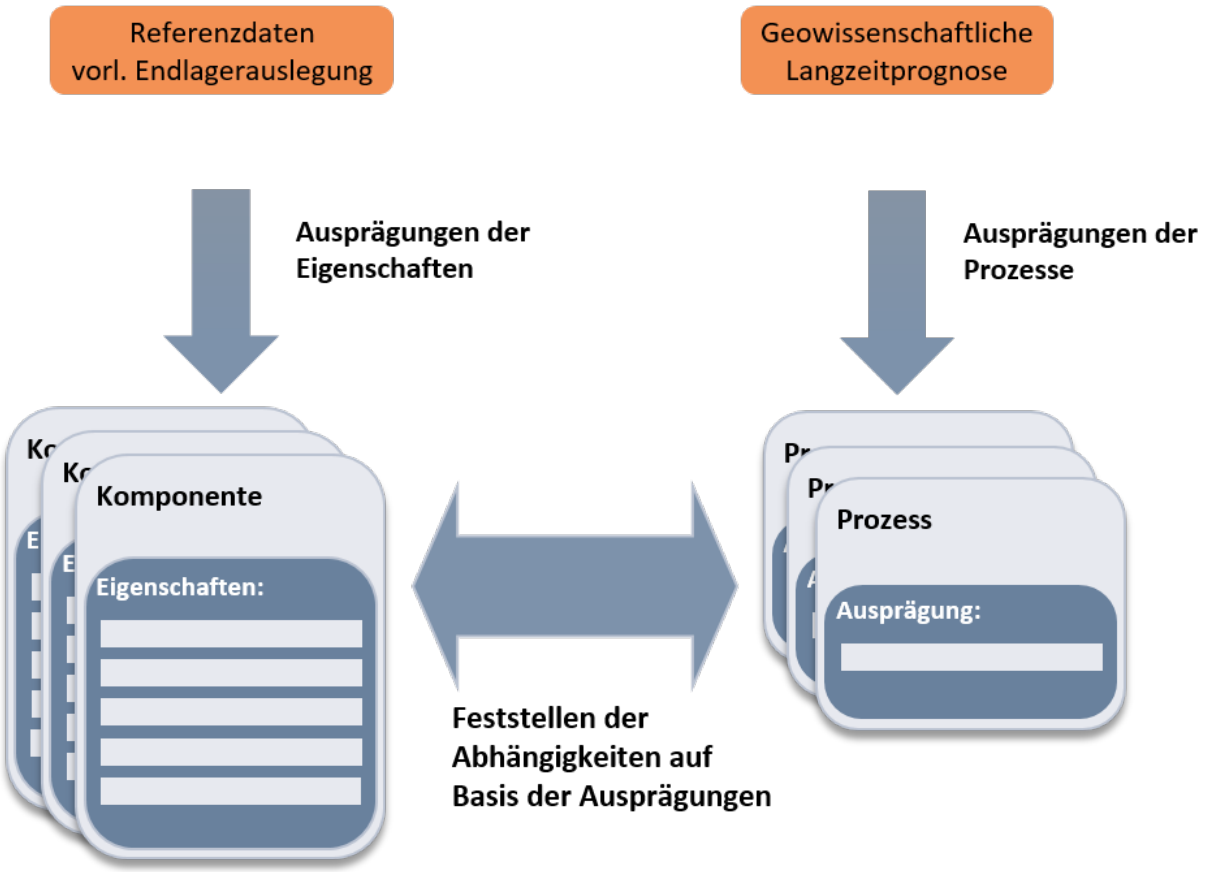


Abbildung 165: Schematische Darstellung des wirtsgesteinsspezifischen FEP-Screenings

Beispiel 81: Auftreten von Prozessen

Beispiel – Auftreten

Der folgende Auszug aus dem IFEP-Katalog der OECD-NEA (Capouet et al. 2019) enthält die folgenden Prozesse:

- Magmatische und vulkanische Aktivität
- Metamorphose
- Regionale Erosion und Sedimentation
- Diagenese
- Salzauflösung
- Meeresspiegeländerungen
- Menschliche Einflüsse auf das Klima
- Mikrobielles Wachstum und Schwinden [Abfallform]

Für die rvSU wird eine sichere Auslegung der technischen Komponenten angenommen. Menschliche Aktivitäten sind nicht Teil der Betrachtungen, die in den rvSU vorgenommen werden. Der Prozess der Metamorphose läuft in der Regel bei höheren Temperaturen und Drücken ab, als sie im Suchbereich zwischen 300 und 1500 m auftreten, wobei es einen Übergangsbereich zur Diagenese gibt. Diese Prozesse können also zusammengefasst werden. Damit reduziert sich obiger Auszug auf (Auszug aus „FEP-Katalog STA“ in Abbildung 161):

- Meeresspiegeländerungen
- Magmatische und vulkanische Aktivität
- Diagenese und Metamorphose
- Regionale Erosion und Sedimentation
- Salzauflösung

Für ein wirtsgesteinsspezifisches Endlagersystem im Tongestein wird für alle Untersuchungsräume im Tongestein das Auftreten der Prozesse geprüft. Die Teilgebiete werden dabei als zusammenhängende Fläche betrachtet. Bei den hier beispielhaft gezeigten Prozessen führt dies zu keiner Änderung („Wirtsgesteinsspezifisches Endlagersystem – FEP-Katalog Tongestein“ in Abbildung 161).

Für einen Untersuchungsraum, wie beispielsweise das GzME „Opalinuston“ (01_00UR), fallen durch die geographische und geologische Situation die Prozesse „Meeresspiegeländerungen“ und „Salzauflösung“ weg, da das Gebiet tief im Binnenland liegt und keine Salzvorkommen auftreten (Stark 2014). Es ergibt sich folgende Untersuchungsraum-spezifische Liste (Auszug, „Untersuchungsraum – FEP-Katalog Tongestein“ in Abbildung 161):

- Magmatische und vulkanische Aktivität
- Diagenese und Metamorphose
- Regionale Erosion und Sedimentation

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

Beispiel 82: Ausprägung von Prozessen und Komponenten

Beispiel – Ausprägung

Für einen Untersuchungsraum wie das GzME „Opalinuston“ (01_00UR) müssen plausible und nicht auszuschließende Prozesse und Komponenten mit ihrer lokalen Ausprägung beschrieben werden. Plausible Prozesse und Komponenten können dabei eine voraussichtliche und eine mögliche Ausprägung haben. Für nicht auszuschließende Prozesse und Komponenten werden nur voraussichtliche Ausprägungen berücksichtigt, siehe auch Kapitel 8.2.4.

Tabelle 71: Auftreten und Ausprägung von Prozessen und Komponenten im Opalinuston

FEP	Auftreten	voraussichtliche Ausprägung	mögliche Ausprägung
(Prozess) magmatische und vulkanische Aktivität	nicht auszuschließen (Schreiber & Jentzsch 2021)	vulkanische Gänge dringen im Westen des UR in die Sedimentgesteine ein	-/-
(Prozess) Diagenese und Metamorphose	nicht auszuschließen	Kontaktmetamorphose im Kontext von Vulkanismus	-/-
(Prozess) regionale Erosion und Sedimentation	nicht auszuschließen (Stark 2014)	z. B. schwach (rückschreitende Erosion im Schichtstufenland im Westen des UR)	z. B. stark (rückschreitende Erosion und tiefe linienhafte Einschnitte im Westen des UR)
(Komponente) Wirtsgestein Tongestein	plausibel	voraussichtliche Werte	mögliche Werte
(Komponente) Deckgebirge	plausibel	voraussichtliche Werte	mögliche Werte
(Komponente) Wirtsgestein Steinsalz	auszuschließen	-/-	-/-

8.2.3.8 untersuchungsraumspezifische FEP-Kataloge

Die in Kapitel 8.2.3.5 beschriebenen wirtsgesteinsspezifischen FEP-Kataloge bilden die Grundlage für die untersuchungsraumspezifischen Betrachtungen. Dazu wird für jeden Untersuchungsraum ein separater FEP-Katalog auf Basis des entsprechenden Wirtsgesteins mit untersuchungsraumspezifischen Daten angepasst. Hierfür werden Informationen aus der geowissenschaftlichen Langzeitprognose sowie aus der Geosynthese genutzt. Anschließend folgt für jeden der Kataloge ein Screening in dem die Relevanz und Abhängigkeiten der Prozesse angepasst wird (Abbildung 166). Dabei müssen nur Abhängigkeiten solcher FEP betrachtet werden, deren Ausprägung sich grundlegend gegenüber der wirtsgesteinsspezifischen verändert hat. Diese werden mit Hilfe der Datenbank entsprechend gekennzeichnet.

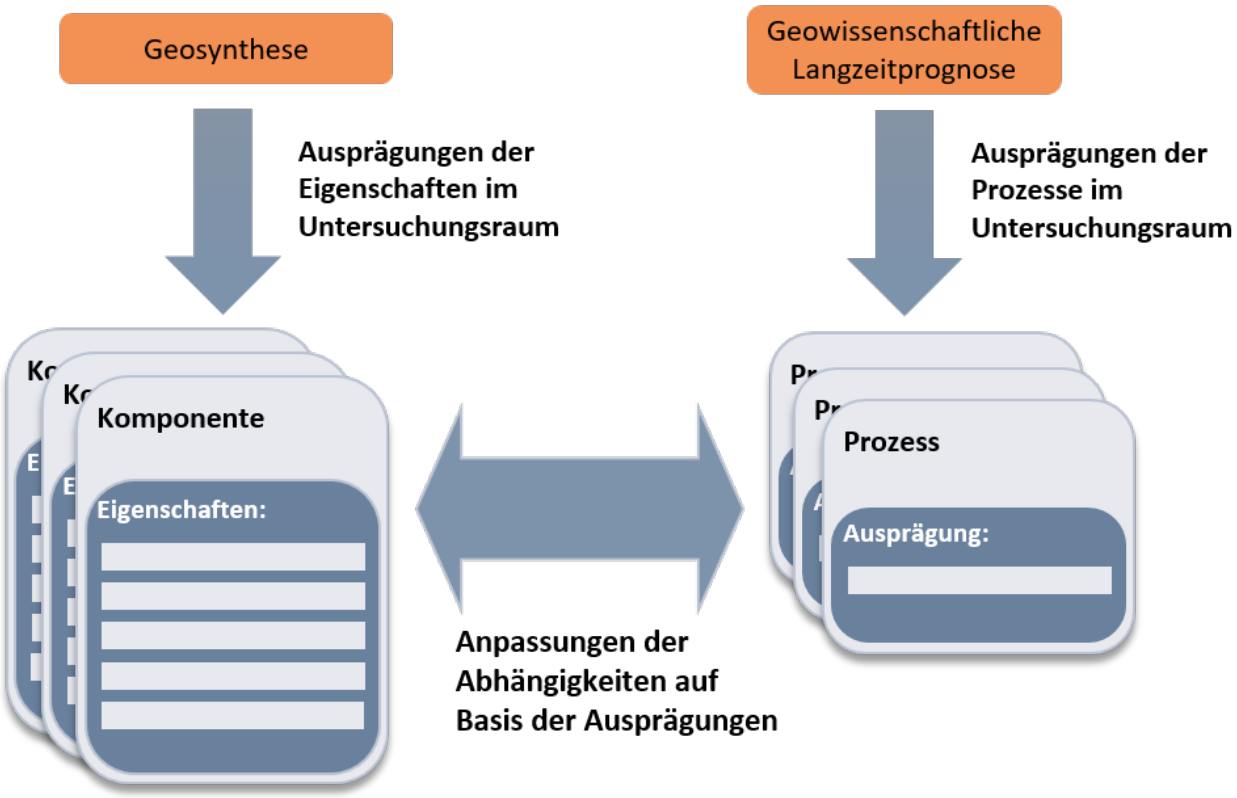


Abbildung 166: Schematische Darstellung des untersuchungsraumspezifischen Screenings

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

Beispiel 83: Wirtsgesteinsspezifische und untersuchungsraumspezifische Beeinflussungen im Endlagersystem

Beispiel – Wirtsgesteinsspezifische und untersuchungsraumspezifische Beeinflussungen im Endlagersystem

Aus dem FEP-Katalog für ein wirtsgesteinsspezifisches Endlagersystem im Tongestein werden die Entwicklungen des wirtsgesteinsspezifischen Endlagersystems abgeleitet. Das Auftreten der Prozesse wird dabei für die Fläche aller Untersuchungsräume im Tongestein zusammen beurteilt, um mit den Entwicklungen des wirtsgesteinsspezifischen Endlagersystems einen Rahmen für die untersuchungsraumspezifischen Entwicklungen abzustecken, insbesondere hinsichtlich der Extrema. Die Ausprägung der Prozesse wird im wirtsgesteinsspezifischen Fall so gewählt, wie es maximal im Bereich der Untersuchungsräume plausibel möglich ist (Abbildung 167).

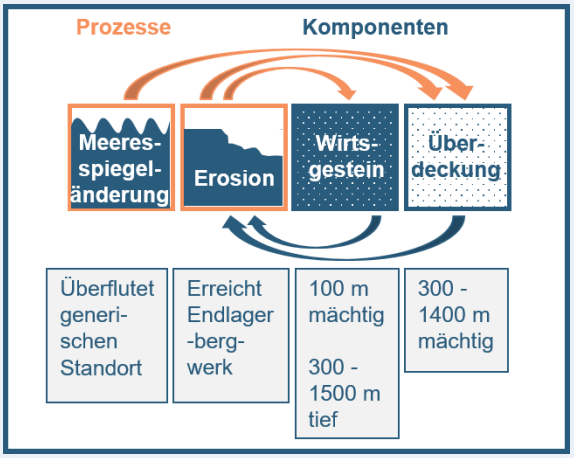


Abbildung 167: Auftreten und Ausprägung von Prozessen und Komponenten im wirtsgesteinsspezifischen Endlagersystem für Tongestein

Die so etablierten Zusammenhänge werden auf einen spezifischen Untersuchungsraum übertragen, hier GzME „Opalinuston“ (01_00UR). Dies erfolgt automatisiert in der Datenbank. Dann werden Auftreten und Ausprägung mittels Informationen aus der Geosynthese auf die lokalen Gegebenheiten angepasst (Abbildung 168).

Beispiel – Wirtsgesteinsspezifische und untersuchungsraumspezifische Beeinflussungen im Endlagersystem

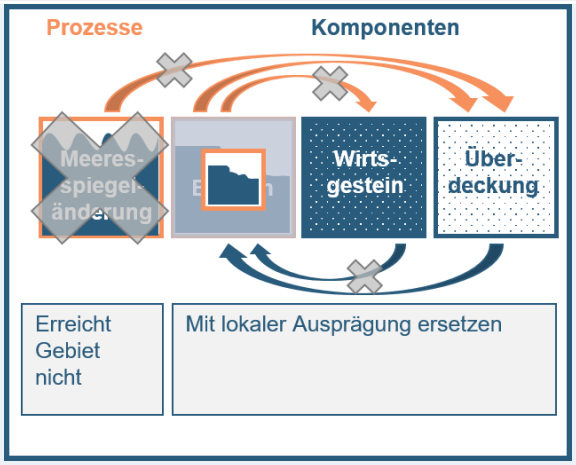


Abbildung 168: Anpassung von Auftreten und Ausprägung von Prozessen und Komponenten für das untersuchungsraumspezifische Endlagersystem

Die Beeinflussungen oder Abhängigkeiten von Prozessen und Komponenten im GzME „Opalinuston“ (01_00UR) sind gegenüber dem wirtsgesteinsspezifischen Endlagersystem reduziert (Abbildung 169). Die Ortsdaten sind Stark (2014) entnommen.

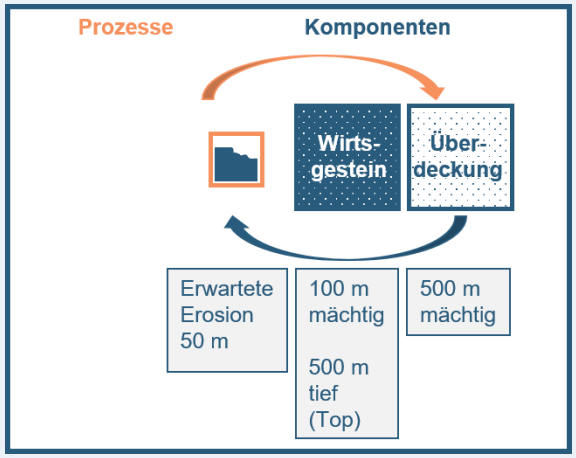


Abbildung 169: Auftreten und Ausprägung von Prozessen und Komponenten im untersuchungsraumspezifischen Endlagersystem

8.2.3.9 Qualitätsmanagement und Nachvollziehbarkeit

Um die Nachvollziehbarkeit der Szenarienentwicklung zu gewährleisten, ist es notwendig, neben der hier beschriebenen Methodik auch die technische Infrastruktur bereitzuhalten, die in der Lage ist, die zahlreichen Verknüpfungen zu dokumentieren. Dies geschieht mit der eigens für diesen Zweck entwickelten Datenbank.

Wie in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben, stellt der große Umfang der Arbeiten hohe Anforderungen an die Dokumentation.

Es wird angestrebt, diese Dokumentation mittels eines webbasierten Informationssystems (Datenbank mit Benutzeroberfläche) durchzuführen. Aus dieser Datenbank sollen alle Grundlagen (Eingangsparameter) für die Analyse des sicheren Einschlusses im Endlagersystem unter Berücksichtigung der zukünftigen Entwicklungen ableitbar sein, so beispielsweise für numerische Simulationen, die einen Teil dieser Analyse darstellen können (Kapitel 8.5). Die Notwendigkeit für eine Datenbank ergibt sich außerdem aus den Abhängigkeiten (Verknüpfungen, Verlinkungen) zwischen den Elementen: so werden zum Beispiel die Abfallspezifikationen einmalig zusammengestellt, sind jedoch für jede Analyse pro Untersuchungsraum notwendig (siehe Abbildung 158). Ein Prototyp einer Datenbank, die für die Durchführung der rvSU im Schritt 2 der Phase I des Standortauswahlverfahrens genutzt werden soll, wird zurzeit erstellt.

Es ist notwendig, die Abhängigkeiten innerhalb der FEP-Datenbank (Kapitel 8.2.3.6) von jeweils fachlich qualifizierten Expertengruppen erstellen zu lassen. Dies kann sowohl BGE-intern als auch in Zusammenarbeit mit externen Fachexperten geschehen. Zur Nachvollziehbarkeit sollen nicht nur die Feststellungen von gegenseitiger Einflussnahme von Prozessen und Komponenten begründet werden, sondern auch die Feststellung von fehlenden Beeinflussungen.

Im Rahmen der Erarbeitung der FEP-Kataloge (Kapitel 8.2.3) soll ein Audit anhand der OECD-NEA IFEP-Liste erfolgen. Es soll tabellarisch zu jedem Element der IFEP-Liste festgehalten werden, welches Element im FEP-Katalog für das Standortauswahlverfahren ihm entspricht. Wenn ein Element der IFEP-Liste nicht aufgenommen wurde, ist dies zu begründen. Es ist geplant, die FEP-Kataloge in Kombination mit der Audit-Tabelle von externen Gutachtern auf eventuelle Inkonsistenzen, fachliche Qualität und gegebenenfalls unzulässige Vereinfachungen prüfen zu lassen.

Eine Vorgehensweise für eine Qualitätskontrolle der abgeleiteten Entwicklungen muss noch erarbeitet werden; es ist jedoch die Prüfung vorgesehen, ob die abgeleiteten Entwicklungen alle relevanten Prozesse des FEP-Katalogs beinhalten. Minimale Anforderung an die Qualitätskontrolle sind 4-Augen-Prüfungen bei allen Eintragungen in die Datenbank.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

8.2.4 Ableitung von Entwicklungen

Dieses Kapitel beschreibt die erstmalige Ableitung von Entwicklungen in den rvSU, die sich in dieser Phase des Standortauswahlverfahrens im Wesentlichen auf die geologische Umgebung eines Endlagers beschränkt. Technische Aspekte werden dabei vereinfacht behandelt (siehe Kapitel 8.2.3.1).

Die zentralen Elemente zur Bewertung der Langzeitsicherheit eines potenziellen Endlagerstandortes sind die Entwicklungen des Endlagersystems. Bei den wvSU und uvSU sind sie als Basis für die Bewertung der Integrität und Robustheit innerhalb der Langzeitsicherheitsanalyse heranzuziehen. Innerhalb der, in der aktuellen Phase I des Standortauswahlverfahrens durchzuführenden, rvSU bilden die Entwicklungen die Basis für die Bewertung des sicheren Einschlusses nach § 7 Abs. 6 EndlSiUntV. Der Anspruch bei der Ableitung von Entwicklungen ist dabei aber nicht die tatsächliche Zukunft des Endlagers und seiner Umgebung vorherzusagen, sondern systematisch schlüssige Möglichkeiten für potenzielle Entwicklungen zu ermitteln und diese anhand von qualitativen Wahrscheinlichkeitsstufen klassifiziert aufzuzeigen, mit dem Ziel, systematisch die tatsächliche Entwicklung des Endlagersystems abzudecken. Im Rahmen der rvSU wird die Betrachtung von zu erwartenden und abweichenden Entwicklungen gefordert. Nicht zu betrachten sind hypothetische Entwicklungen und Entwicklungen aufgrund zukünftiger menschlicher Aktivitäten.

Die Entwicklungen werden mittels der international üblichen Methodik der systematischen Szenarienentwicklung abgeleitet (OECD-NEA 2016). Die zu erwartenden Entwicklungen entsprechen dabei den üblicherweise verwendeten *reference scenarios* (auch *base scenario, normal scenario, reference evolution*), während die abweichenden Entwicklungen den *alternative scenarios* (auch *altered evolution*) entsprechen (OECD-NEA 2016). Zwecks Übersichtlichkeit wird im Folgenden in erster Linie der Begriff „Entwicklung“ verwendet, der Begriff „Szenario“ ist dazu synonym zu verstehen.

Eine systematische Vorgehensweise ist von besonderer Bedeutung (Röhlig et al. 2012), um eine konsistente Einstufung der qualitativen Wahrscheinlichkeit über eine Vielzahl von zu betrachtenden Untersuchungsräumen zu gewährleisten. Dies wird zum einen über die nachvollziehbare strukturierte Vorgehensweise bei der Aufstellung der FEP-Kataloge erreicht (Kapitel 8.2.3), zum anderen durch festgelegte Ausgangspunkte, von denen aus Szenarien abgeleitet werden, die dann in ihrer Gesamtheit die Entwicklungen abdecken. Beuth et al. (2016, S. 681) stellen in diesem Zusammenhang fest:

„Die Ableitung von Szenarien unter Zugrundelegung einer systematischen Vorgehensweise beinhaltet keinen inhärenten Automatismus, der die sicherheitsrelevanten Szenarien selbstständig generiert oder identifiziert.“

Damit soll zum Ausdruck gebracht werden, dass bei aller Systematik die Perspektive und das Wissen der Bearbeitenden die Ableitung von Entwicklungen bestimmen. Gleichzeitig findet bei der Szenarienentwicklung eine umfassende Zusammenschau von Beeinflussungen und Signifikanzen statt, die auf die wissenschaftliche Expertise der Bearbeitenden angewiesen ist und nicht automatisiert werden kann.

In Abbildung 170 wird die systematische Einordnung von zu erwartenden und abweichenden Entwicklungen dargestellt. Dabei sind vier Pfade zu unterscheiden, von denen nur einer (Nr. 1) in die

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

zu erwartende Entwicklung führt. Die Kombination der voraussichtlichen Ausprägung von Prozessen und Komponenten (solange sie sich nicht gegenseitig ausschließen, z. B. Sedimentation vs. Erosion oder inkompatible Ausprägungen von Eigenschaften von Komponenten) ergibt die zu erwartende Entwicklung. Dabei kann es mehr als eine voraussichtliche Ausprägung geben, um z. B. zukünftige klimatische Entwicklungen zu erfassen, die gleich wahrscheinlich erscheinen (Begründung zu § 3 Abs. 3 EndlSiAnfV, BT-Drs. 19/19291). Abweichende Entwicklungen ergeben sich äquivalent dazu und werden durch drei Kombinationspfade erreicht (Nr. 2, 3, und 4). Bei Pfad Nr. 2 wird die voraussichtliche Ausprägung der plausiblen Prozesse mit möglichen Ausprägungen von Komponenten kombiniert; Pfad Nr. 3 kombiniert die voraussichtliche Ausprägung der Komponenten mit möglichen Ausprägungen von plausiblen Prozessen; Pfad Nr. 4 kombiniert die nicht auszuschließenden Prozesse mit den möglichen Ausprägungen der Komponenten.

Wenn verschiedene Entwicklungen absehbar zu gleichen Konsequenzen für die Sicherheit des Endlagersystems führen, können sie als Gruppe bearbeitet werden. Sicherheitsrelevante Entwicklungen müssen dahingehend geprüft werden, ob sie unabhängig voneinander auftreten können.

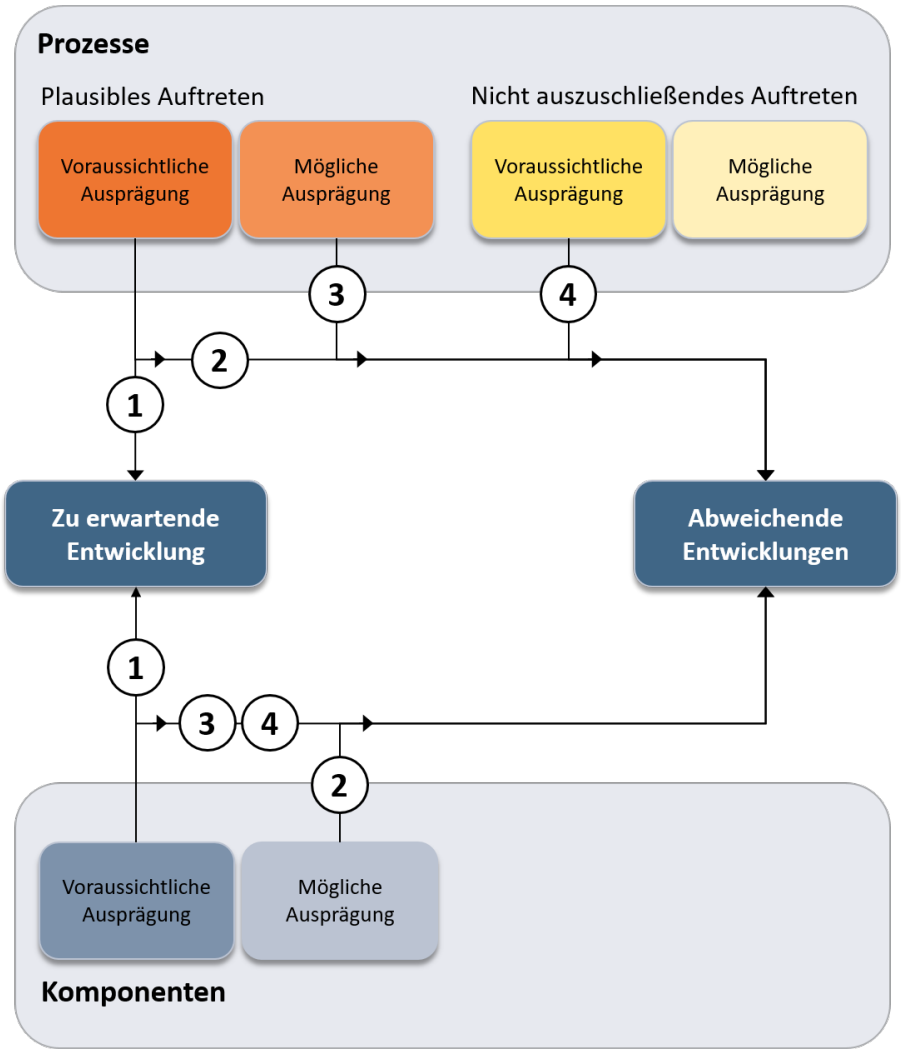


Abbildung 170: Schematische Darstellung zur Einordnung der Wahrscheinlichkeiten von Entwicklungen

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

8.2.4.1 Ausgangspunkte der Ableitung von Entwicklungen

Die Ausgangspunkte der Szenarienentwicklung liegen in potenziellen Beeinträchtigungen von Sicherheitsfunktionen bestimmter Barrieren sowie in regulatorischen Vorgaben zum Erhalt der Barrierewirkung gemäß § 23 Abs. 5 Nr. 5 StandAG.

In der Szenarienentwicklung wird in der Regel zwischen einem Top-Down- und einem Bottom-Up-Ansatz unterschieden. Bei einem Top-Down-Ansatz liegt der Ausgangspunkt bei einer sicherheitsrelevanten Komponente (in der Regel einer Barriere) oder einem sicherheitsrelevanten Prozess, während bei einem Bottom-Up-Ansatz ein beliebiger Prozess als Ausgangspunkt gewählt wird, um zu untersuchen, ob dieser die Sicherheit eines Endlagersystems potenziell gefährdet (Uhlmann 2016).

Der Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion ist von wesentlicher Bedeutung für die Betrachtung des sicheren Einschlusses für das Endlagersystem Typ 1 in den rvSU. Dieser Fokus spiegelt sich auch in den Ausgangspunkten für die Ableitung der Entwicklung wider. Ausgehend von § 7 Abs. 6 Nr. 1 EndlSiUntV sind die geogenen Prozesse Ausgangspunkt für die Ableitung zunächst der zu erwartenden Entwicklungen. Dies entspricht einem Bottom-Up-Ansatz in der Szenarienentwicklung, der die vielfältigen und vor allem die von außen auf das Endlagersystem einwirkenden Prozesse bis zu den für die Langzeitsicherheit relevanten Sicherheitsfunktionen der Barrieren verfolgt (z. B. OECD-NEA 2016, S. 44).

Da sich ohne eine Eingrenzung sehr viele mögliche Szenarien ergeben können, bietet sich eine Fokussierung auf solche Szenarien an, die eine Aussage über die Sicherheit eines Endlagersystems ermöglichen können. Diese Eingrenzung wird über die Sicherheitsfunktionen der Barrieren vorgenommen (OECD-NEA 2013, S. 36), siehe auch Kapitel 8.2.3.5.

Da nach § 23 StandAG die zu erwartende Entwicklung des Wirtsgesteinsbereichs mit Barrierefunktion und somit der wesentlichen Barriere für die Bewertung der Erfüllung der Mindestanforderungen einbezogen werden soll (§ 23 Abs. 5 Nr. 3 StandAG minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, Nr. 5 Erhalt der Barrierewirkung), ist es sinnvoll, den Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion, der einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich aufnehmen kann, als primären Ansatzpunkt zu wählen und potenzielle Beeinträchtigungen der ausgewiesenen Sicherheitsfunktionen zu prüfen. Die Entwicklung der Barrieren auf diese Weise zu betrachten („Was kann zur Beeinträchtigung dieser Barriere führen?“) entspricht einem Top-Down-Ansatz (z. B. OECD-NEA 2016, S. 44).

Bei der Ableitung der Entwicklungen soll eine hinreichend abdeckende Betrachtung erreicht werden, in der sich die beiden Ansätze ergänzen, wie es international üblich ist (z. B. OECD-NEA 2016, S. 62).

Ergänzend kann es beispielsweise notwendig werden, den Transport der Radionuklide als Ausgangspunkt aufzunehmen, da der Radionuklidtransport aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich heraus nach § 4 EndlSiAnfV ein wichtiger Maßstab für die Qualität des sicheren Einschlusses ist. Werden die Entwicklungen des Radionuklid-Transports nicht als Ausgangspunkt gewählt, ist es auch nur bedingt möglich, aus der Ableitung der Entwicklungen heraus einwirkende Komponenten zu benennen, die bei der Optimierung des Endlagersystems angepasst werden könnten.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

Um die Entwicklungen eingängig strukturiert aufzuzeigen, nutzten vorrangegangene Projekte Teilsysteme, wie z. B. „Nahfeld“ oder „Strecken und Schächte“ etc. (Wolf 2012). Aufgrund der Tatsache, dass sich die Szenarienentwicklung innerhalb der rvSU auf die geologische Barriere beschränkt, wird zum jetzigen Zeitpunkt auf eine solche systematische Einteilung verzichtet. Für die Entwicklungen der wirtsgesteinsspezifischen Endlagersysteme könnte eine nach Teilsystemen gegliederte Beschreibung sinnvoll sein. Für die untersuchungsraumspezifischen Untersuchungen sollte dies nicht erforderlich sein.

8.2.4.2 Wirtsgesteinsspezifische Entwicklungen

Die wirtsgesteinsspezifischen Entwicklungen basieren auf den wirtsgesteinsspezifischen FEP-Katalogen, siehe Kapitel 8.2.3.7. Die zu erwartende Entwicklung wird ausgehend von den geogenen Prozessen beschrieben. Diese Betrachtung hat neben dem Aufzeigen von potenziellen Beeinträchtigungen von Sicherheitsfunktionen das Ziel, zum allgemeinen Systemverständnis beizutragen. Sie umfasst außerdem eine grobe Beschreibung des Endlagers in dem entsprechenden Wirtsgestein.

Abweichende Entwicklungen ergeben sich aus der Kombination von Auftreten und Ausprägung von Prozessen und Komponenten gemäß Abbildung 170 und setzen an den Sicherheitsfunktionen der Komponenten an.

Die Entwicklung des Endlagersystems wird in Anlehnung an SKB (2011a, S. 64) in zeitliche Phasen geteilt, die mit immer fernerer Zukunft größer und unschärfer werden. Die Einteilung der betrachteten zeitlichen Phasen basiert im Wesentlichen auf dem zeitlichen Wirkungsbereich der Sicherheitsfunktionen der Barrieren. Eine sich wahrscheinlich anbietende Aufteilung könnte wie folgt aussehen:

Die erste Phase beschreibt die Entwicklung zu Beginn des Bewertungszeitraumes, in der sich die natürlichen Gleichgewichte am Standort nach der Auffahrung des Endlagers neu einstellen. Gleiches geschieht für die thermische Entwicklung des Endlagersystems, insbesondere durch den Wärmeaustrag der Abfälle (vgl. Kapitel 4.2.8.5). Sie endet mit dem Abschluss des aktuellen Interglazials.

Die zweite Phase beschreibt die Entwicklungen im Übergang zum nächsten Glazial, das nächste Glazial, und den Übergang ins nächste Interglazial.

Die letzte Phase beschreibt überschlägig die Entwicklungen bis zum Ende des Bewertungszeitraums.

Die zu erwartende Entwicklung eines Gebiets umfasst Änderungen des Endlagersystems in vielerlei Hinsicht. Es ist sinnvoll, diese nach ihren wesentlichen Beziehungen gegliedert zu behandeln. Die in Abbildung 171 gezeigte Reihenfolge (klimatisch – thermisch – mechanisch – hydrogeologisch – geochemisch) entspricht der Gliederung in der Reference Evolution (entspricht in etwa der zu erwartenden Entwicklung) im schwedischen Projekt SR-Site (SKB 2011b). Für jede Entwicklungsphase werden die Vorgänge im Endlagersystem diskutiert. Die Entwicklung wird dabei „Bottom-up“, das heißt in diesem Fall chronologisch und den Auswirkungen einzelner Prozesse folgend, diskutiert. Klimatische Änderungen beeinflussen thermische Entwicklungen, thermische Entwicklungen können mechanische Folgen haben, mechanische Änderungen (z. B. eine Rissbildung) kann wie-

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

derum Einfluss auf die Grundwasserbewegungen nehmen, die wiederum die geochemische Entwicklung beeinflussen. Zwischen thermischen, mechanischen, hydrogeologischen und geochemischen Entwicklungen kann es wechselseitige Beeinflussungen geben, die klimatische Entwicklung wird jedoch von außerhalb eines Untersuchungsraums beeinflusst. In manchen Untersuchungsräumen kann die klimatische Entwicklung weniger relevant sein, und auch sonst können Prozesse klimaunabhängig sein. Diese werden separat betrachtet.

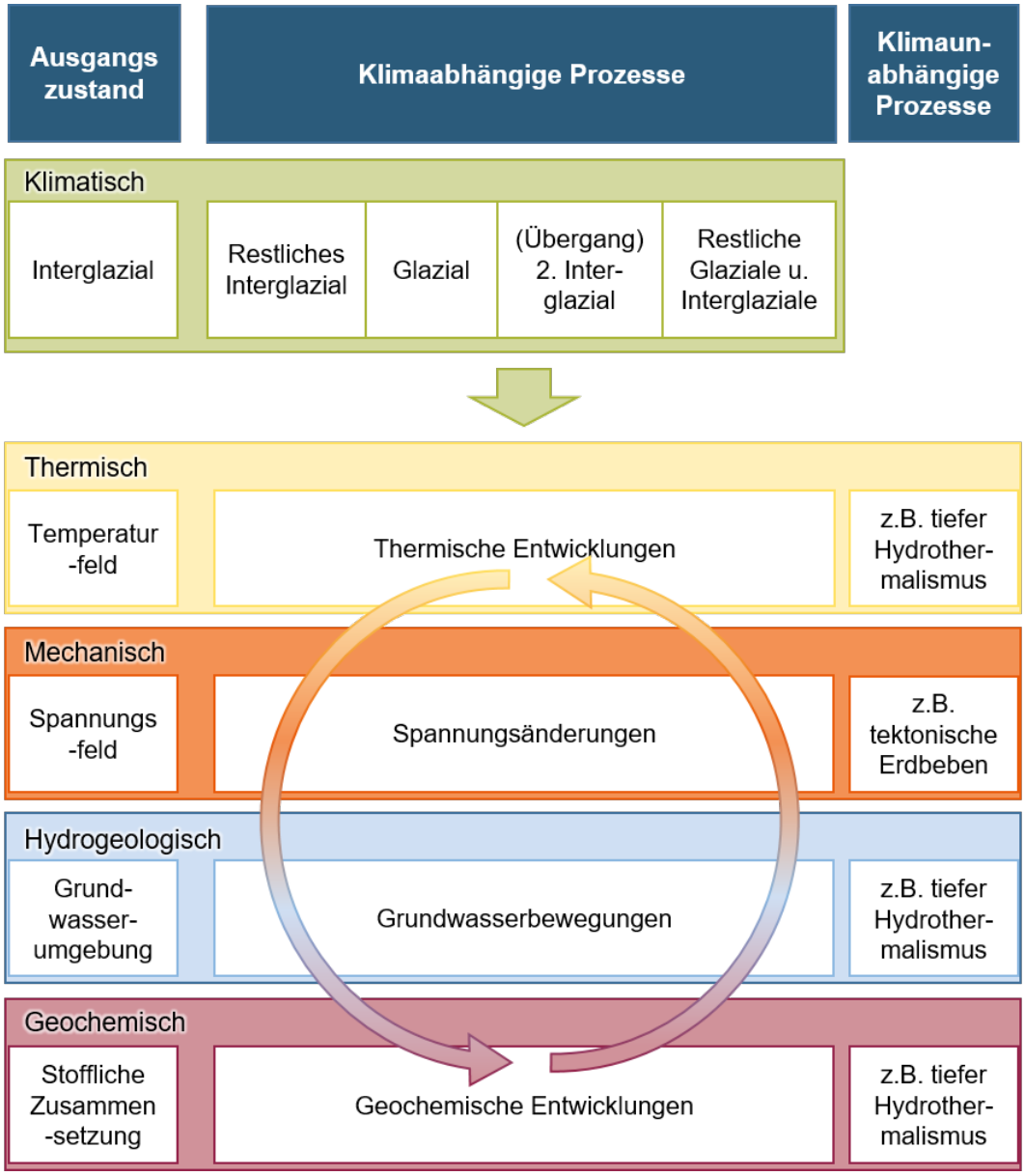


Abbildung 171: Mögliche Betrachtungsreihenfolge von Themenfeldern innerhalb der Beschreibung der Entwicklung eines Endlagersystems, geordnet nach Klimaphasen, mit getrennter Diskussion klimaunabhängiger Prozesse

Beispiel 84: Entwicklung eines wirtsgesteinsspezifischen Endlagersystems in Steinsalz in steiler Lagerung

Beispiel – Entwicklung eines wirtsgesteinsspezifischen Endlagersystems in Steinsalz in steiler Lagerung

Detaillierte Beschreibung von Abbildung 172.

a) Ausgangszustand zu Beginn des Bewertungszeitraums. Der generische Salzstock liegt über einer Sockelstörung, im Deckgebirge des Salzstocks befinden sich Scheitelstörungen. Über dem Salzstock verläuft eine quartäre Rinne. Sowohl in der Rinne als auch in einer sandigen Schicht im Deckgebirge fließt Grundwasser. Im Salzstock liegt unter einer Salzschwebe von 300 m (rot schraffiert) der Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion (blaue Form, „WbB“ in der Abbildung). Im Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion liegt ein einschlusswirksamer Gebirgsbereich mit Endlager. Das Endlager sowie seine Tageszugänge (hier als Schacht dargestellt) sind verfüllt und verschlossen. Gesteinsschichten: z – Zechstein, tr – Trias, j – Jura, kr – Kreide, t – Tertiär, q – Quartär.

b) Beginn des Bewertungszeitraums. Durch den radioaktiven Zerfall entsteht Wärme, die konduktiv aus dem Endlager abgeführt wird. Der Versatz im Endlagerbauwerk konvergiert, Spannungen bauen sich ab.

c) Eine Klimaänderung führt zu sinkenden Atmosphärentemperaturen und so zu Permafrost in den obersten Gesteinsschichten. Die Wärmeproduktion durch den radioaktiven Zerfall ist abgeklungen, das Endlagerbauwerk steht im Gleichgewicht mit seiner Umgebung. Der Permafrost bringt den Grundwasserfluss oberflächennah zum Erliegen (vgl. Mrugalla 2011).

d) Der generische Salzstock wird von einem Gletscher überfahren. Der Gletscher isoliert den Untergrund thermisch. Die Veränderungen der Auflast führen zur Störungsreaktivierung im Deckgebirge des Salzstocks (vgl. Huster et al. 2020). Die Auflast durch den Gletscher führt zu erneuter Salzmobilisierung und Aufstiegsbewegungen des Salzstocks. Durch hohe Drücke unterhalb des Gletschers und die thermische Isolation erreicht das Grundwasser unter dem Gletscher nicht mehr den Gefrierpunkt und fließt wieder (vgl. Mrugalla 2011).

e) Der Gletscher schmilzt ab. Die Massenbewegungen durch das mobilisierte Salz haben einerseits Deformationen im Gestein im Aufstiegsbereich, andererseits oberflächennahe Risse im Abwanderungsbereich hervorgerufen (vgl. Hardt et al. 2021). Schmelzwässer unter hohen Drücken vertiefen die existierende glaziale Rinne. Es kommt zu Subrosion am Top der Salzstruktur, das Endlager ist durch die Salzschwebe davon räumlich getrennt.

Beispiel – Entwicklung eines wirtsgesteinsspezifischen Endlagersystems in Steinsalz in steiler Lagerung

f) Ein weiteres Interglazial. Das Endlager ist verformt, die Schachtverfüllung teilweise erodiert. Es sind neue Oberflächengewässer entstanden, das hydrogeologische Regime in den oberflächennahen Schichten ist verändert (vgl. Mrugalla 2011).

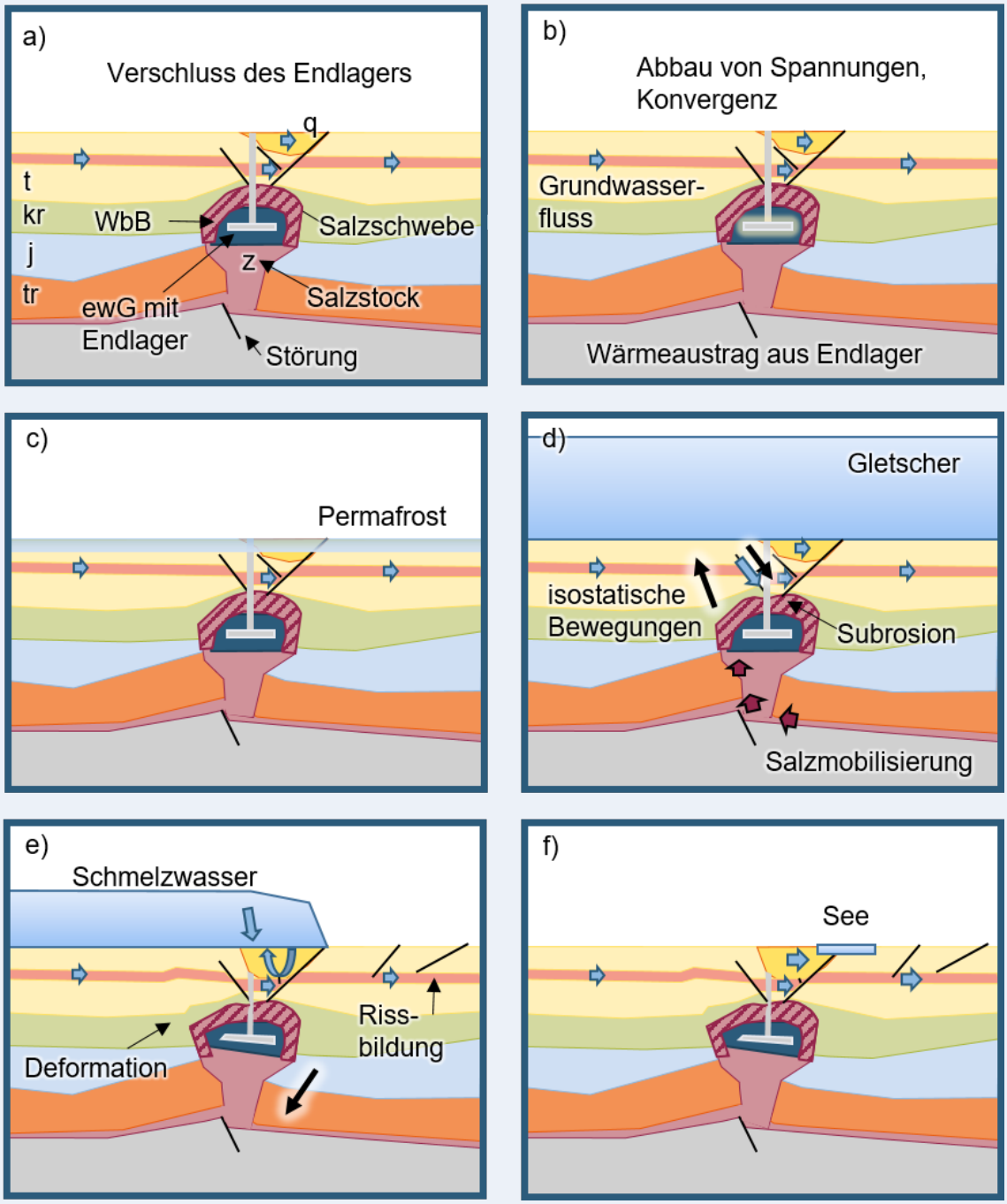


Abbildung 172: Bespielhafte Entwicklung für ein Endlagersystem mit dem Wirtsgestein Steinsalz in steiler Lagerung (nähere Beschreibung im Text)

8.2.4.3 Von wirtsgesteinsspezifischen zu untersuchungsraumspezifischen Entwicklungen

Die untersuchungsraumspezifischen Entwicklungen basieren auf den untersuchungsraumspezifischen FEP-Katalogen, siehe Kapitel 8.2.3.8, werden aber von den wirtsgesteinsspezifischen Entwicklungen abgedeckt. Die untersuchungsraumspezifischen Entwicklungen sind also eine Verfeinerung der wirtsgesteinsspezifischen Entwicklungen in einer Region. Wenn sich die Ausprägung von Prozessen oder Komponenten oder das Auftreten innerhalb eines Untersuchungsraums von den wirtsgesteinsspezifischen unterscheidet, kann dies in den untersuchungsraumspezifischen Entwicklungen berücksichtigt werden. Dabei können Entwicklungen, die z. B. von geogenen Prozessen ausgehen, für einen Untersuchungsraum unberücksichtigt bleiben, wenn dieser Prozess untersuchungsraumspezifisch nicht mehr relevant ist.

Bei den untersuchungsraumspezifischen Entwicklungen stehen somit vor allem ihre Differenzen zur wirtsgesteinsspezifischen zu erwartenden Entwicklung im Fokus. Dies soll vorbereitend dem späteren Vergleich verschiedener Gebiete dienen.

Auf die Betrachtung der Entwicklung des Endlagers wird hierbei verzichtet, da aus der vorläufigen Endlagerauslegung in den rvSU für den Untersuchungsraum kein höherer Detailgrad als in der Ableitung der Entwicklung der wirtsgesteinsspezifischen Endlagersysteme erreicht wird.

Beispiel 85: Entwicklung eines untersuchungsraumspezifischen Endlagersystems, Anwendungsbeispiel GzME „Salzstock Bahlburg (02_00UR)

Beispiel – Entwicklung eines untersuchungsraumspezifischen Endlagersystems GzME „Salzstock Bahlburg (02_00UR)

Der in Abbildung 173 gezeigten Entwicklung für das GzME „Salzstock Bahlburg“ (02_00UR) sei vorangestellt, dass es sich hierbei nicht um das Ergebnis einer systematischen Herleitung einer zu erwartenden Entwicklung handelt, da der Fokus auf der Methodenentwicklung liegt. Die dafür notwendigen grundlegenden Arbeiten wie z. B. die Erstellung des FEP-Katalogs sind hier im Methodendokument vorgestellt, aber noch nicht durchgeführt. Betrachtet wird die Interaktion der Geosphäre mit einer Auswahl geogener Prozesse. Die gezeigten Prozesse werden absehbar im Gebiet 02_00UR als plausibel eingestuft, ihre voraussichtliche Ausprägung ist aber zum aktuellen Zeitpunkt noch nicht bestimmt. Sie können im Gebiet 02_00UR schwächer oder stärker ausfallen als im Beispiel dargestellt. Es können außerdem noch weitere Prozesse auftreten, deren Auswirkungen im Endlagersystem berücksichtigt werden müssen. Die Skizze ist nicht maßstäblich.

Im Gegensatz zur Entwicklung des wirtsgesteinsspezifischen Endlagersystems ist hier kein Endlagerbauwerk Teil der Entwicklung. Stattdessen wird die Entwicklung des Wirtsgesteinsbereichs mit Barrierefunktion untersucht, für den danach die Endlagerauslegung konkretisiert wird (Kapitel 8.6.2). Die Unterabbildung a) zeigt den Ausgangszustand basierend auf der Geosynthese. Die Unterabbildungen b) bis d) zeigen die potenziell zu erwartende Entwicklung des Gebiets, ausgehend von Mrugalla (2011).

Beispiel – Entwicklung eines untersuchungsraumspezifischen Endlagersystems GzME „Salzstock Bahlburg (02_00UR)

Detaillierte Beschreibung von Abbildung 173:

a) Ausgangszustand zu Beginn des Bewertungszeitraums. Der Salzstock Bahlburg liegt über einer Sockelstörung, im Deckgebirge des Salzstocks befinden sich Scheitelstörungen. Über dem Salzstock verläuft eine quartäre Rinne. Diese Informationen stammen aus der Geosynthese. Es wird angenommen, dass in den Rinnensedimenten Grundwasserfluss besteht, das hydrogeologische Regime im Gebiet ist noch nicht näher bekannt. Im Salzstock liegt unter einer Salzschwebe von 300 m (rot schraffiert) der Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion (blaue Form, „WbB“ in der Abbildung). Im Gegensatz zum generischen Salzstock wird hier nicht von einem Grundwasserleiter in der Überdeckung ausgegangen. Gesteinsschichten: z – Zechstein, tr – Trias, j – Jura, kr – Kreide, t – Tertiär, q – Quartär.

b) Eine Klimaänderung führt zu sinkenden Atmosphärentemperaturen (entspricht c) in Abbildung 172) und damit zu Permafrost in den obersten Gesteinsschichten und bringt den Grundwasserfluss dort zum Erliegen (vgl. Mrugalla 2011).

c) Der Salzstock wird von einem Gletscher überfahren (entspricht d) in Abbildung 172). Der Gletscher isoliert den Untergrund thermisch. Die Veränderungen der Auflast führen zur Störungsreaktivierung im Deckgebirge des Salzstocks (vgl. Huster et al. 2020). Der Gletscher hat eine geringe Mächtigkeit als in der zu erwartenden Entwicklung des generischen Salzstocks, die Auswirkungen sind damit geringer. Die Auflast durch den Gletscher kann zu Salzmobilisierung und schwachen Aufstiegsbewegungen des Salzstocks führen. Durch hohe Drücke unterhalb des Gletschers und die thermische Isolation erreicht das Grundwasser unter dem Gletscher nicht mehr den Gefrierpunkt und fließt wieder (vgl. Mrugalla 2011).

d) Der Gletscher schmilzt ab (entspricht e) in Abbildung 172). Die Massenbewegungen durch das mobilisierte Salz können einerseits geringe Deformationen im Gestein, andererseits oberflächennahe Risse hervorrufen (vgl. Hardt et al. 2021), allerdings in geringerem Ausmaß als in der zu erwartenden Entwicklung des generischen Salzstocks. Schmelzwässer unter hohen Drücken vertiefen die existierende glaziale Rinne, weniger als über dem generischen Salzstock. Es kann zu Subrosion am Top der Salzstruktur kommen, geringer als beim generischen Salzstock, der Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion wäre durch die Salzschwebe davon räumlich getrennt.

Beispiel – Entwicklung eines untersuchungsraumspezifischen Endlagersystems GzME „Salzstock Bahlburg (02_00UR)

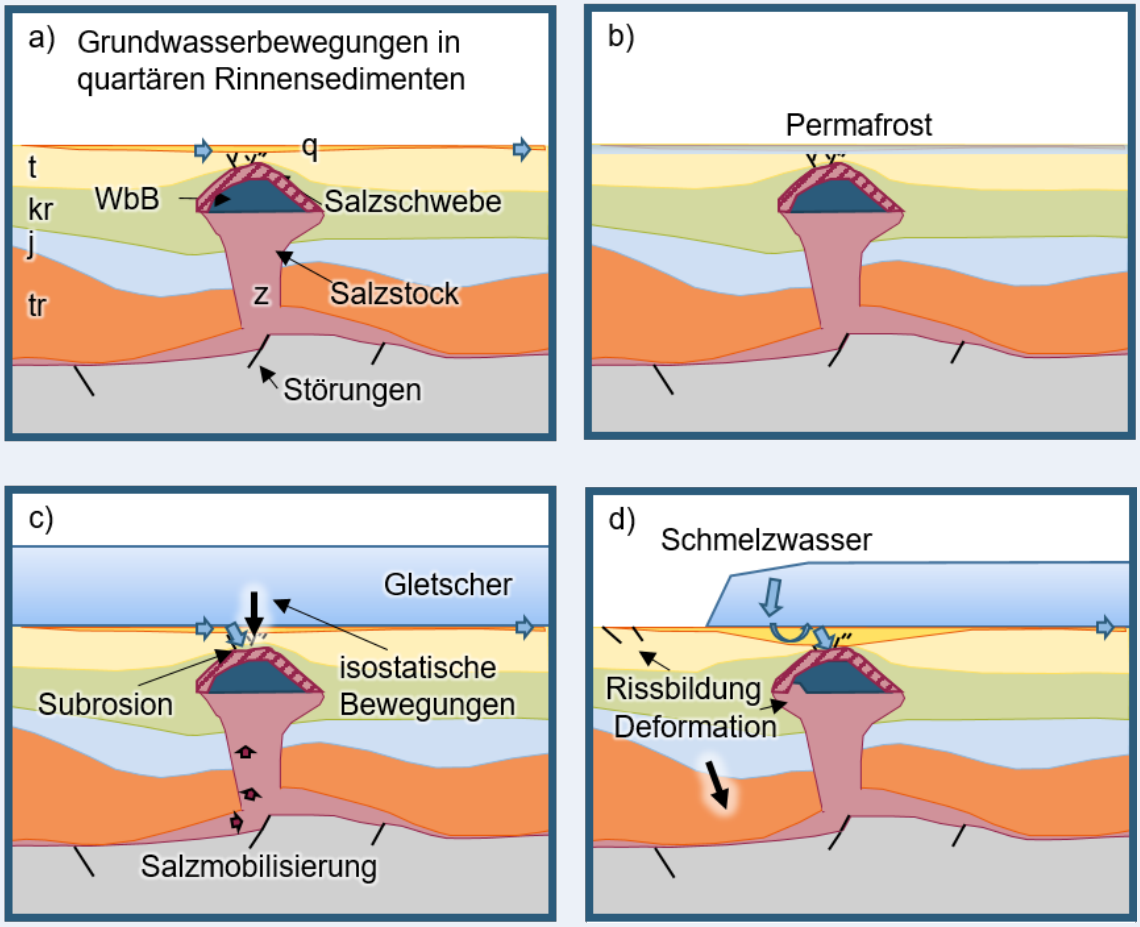


Abbildung 173: Bespielhafte Entwicklung für ein Endlagersystem mit dem Wirtsgestein Steinsalz in steiler Lagerung für das GzME „Salzstock Bahlburg“ (schematische Darstellung ohne Maßstab).
Grundsätzlich werden die gleichen Prozesse wie in der wirtsgesteinsspezifischen Entwicklung, die in Abbildung 172 dargestellt ist, zu erwarten sein. Aus der grundsätzlich schwächeren ortspezifischen Ausprägung der Prozesse ergeben sich weniger oder keine sicherheitsrelevanten Auswirkungen.

Beispiel 86: Entwicklung eines untersuchungsraumspezifischen Endlagersystems GzME „Opalinuston“ (01_00UR)

Beispiel – Entwicklung eines untersuchungsraumspezifischen Endlagersystems GzME „Opalinuston“ (01_00UR)

Wie im vorigen Beispiel ist hier eine „zu erwartende Entwicklung“ für das GzME „Opalinuston“ (01_00UR) skizziert, die nicht aus einer systematischen Ableitung entstanden ist, da der Fokus auf der Methodenentwicklung liegt. Die gezeigten Prozesse werden absehbar im Gebiet 01_00UR als plausibel bzw. nicht auszuschließen eingestuft, ihre voraussichtliche Ausprägung ist aber zum aktuellen Zeitpunkt noch nicht bestimmt. Betrachtet wird die Interaktion der Geosphäre mit einer Auswahl geogener Prozesse. Sie können im Gebiet 01_00UR schwächer oder stärker ausfallen als im Beispiel dargestellt. Es können außerdem noch weitere Prozesse auftreten, deren Auswirkungen im Endlagersystem berücksichtigt werden müssen. Die Skizze ist nicht maßstäblich.

Die Entwicklung soll für den gesamten Untersuchungsraum abgeleitet werden, dabei wird das Wirken von Prozessen im Untersuchungsraum räumlich differenziert. Die Unterabbildungen b) und c) zeigen die potenziell zu erwartende Entwicklung (ausgehend von Stark 2014), Unterabbildung d) eine abweichende Entwicklung (ausgehend von Schreiber & Jentzsch 2021).

a) Ausgangszustand zu Beginn des Bewertungszeitraums (Informationen aus der Geosynthese und Stark (2014)). Das Wirtsgestein Opalinuston liegt in einem sedimentären Schichtpaket, das nach Südosten einfällt. Der Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion, der einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich aufnehmen kann, beginnt ab einer Tiefe von 300 m unter Geländeoberkante (darüber rot schraffiert). Über dem Wirtsgestein Opalinuston liegen im Gebiet die oberjurassischen Karbonatabfolgen. Durch das Einfallen des gesamten Schichtpakets und die Abfolge der unterschiedlich erosionsresistenten Gesteine bildet sich westlich des Untersuchungsraums eine topographische Stufe im Gelände, die auf der Westseite steil abfällt.

   Im Südosten des Untersuchungsraums bilden die Sedimente des Molassebeckens das obere Deckgebirge, dort ist die Topographie flacher. Am Rand des Molassebeckens liegen Störungen, die teilweise als aktiv eingestuft sind und damit ein Ausschlusskriterium erfüllen. Sie sind von einer Pufferzone umgeben, in der kein einschlusswirksamer Gebirgsbereich ausgewiesen werden kann (rot schraffiert). Im Westen des Untersuchungsraums haben vulkanische Gesteine beim Aufstieg den Opalinuston durchschlagen.

   Wasser fließt an der Oberfläche von topographisch höheren in tiefere Bereiche. Dargestellt ist beispielhaft ein Fluss, der von der Höhe abfließt und in einen zweiten Fluss einmündet, der parallel zu Geländestufe fließt. Im Untergrund fließende Wässer haben Karststrukturen in den oberjurassischen Kalksteinen entstehen lassen.

Beispiel – Entwicklung eines untersuchungsraumspezifischen Endlagersystems GzME „Opalinuston“ (01_00UR)

b) Glazial und Übergang ins nächste Interglazial. Gletscher des Alpenlands können den Untersuchungsraum aus Süden/Südosten überfahren. Die Änderung der Auflast kann existierende Störungen reaktivieren. Insbesondere beim Rückzug der Gletscher kann es zur Bildung glazialer Rinnen kommen. In der Vergangenheit sind diese im Molassebecken entstanden (Reinhardt et al. 2017), ihr künftiges Auftreten wäre dort plausibel und ist aktuell Bestandteil eines Forschungsprojekts (BGE 2021e). Verstärkte Grundwasserbewegungen können zur Bildung von neuen Karststrukturen führen. Oberflächengewässer ändern ihren Verlauf, was insbesondere zu Erosion oder lokal zu Sedimentation führen kann. Auch dies ist Teil eines laufenden Forschungsprojekts (BGE 2021f).

a) Künftige Interglaziale und klimaunabhängige Prozesse auf langen Zeitskalen. Künftige Interglaziale können mit teilweise erhöhten Niederschlägen einhergehen. Der Untersuchungsraum liegt in einem tektonischen Gebiet, das vertikal gehoben wird (Stark 2014). Phasenweise kann es zu verstärkter Erosion kommen, so auch am westlichen Steilrand der Schichtstufe (vgl. Beispiel in Kapitel 5.4.4) und durch Einschnitte von Oberflächengewässern. Durch die Abtragung des Deckgebirges verändert sich die relative Lage des Opalinustons zur Geländeoberkante. Wenn dies Teil der zu erwartenden Entwicklung ist, muss der Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion, der einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich aufnehmen kann, zur Erfüllung der Mindestanforderungen lokal auf einen tieferen Bereich als für den Ausgangszustand beschränkt werden und lateral einen größeren Abstand zur ursprünglichen Lage der Schichtstufe einhalten.

c) Abweichende Entwicklung, in der Vulkanismus im Westen des Untersuchungsraums auftritt. Nach Schreiber & Jentzsch (2021) kann lokal „mit geringer Wahrscheinlichkeit“ Vulkanismus im Untersuchungsraum in den nächsten einer Million Jahren wieder aufleben. Das Auftreten von Vulkanismus könnte damit statt als „plausibel“ als „nicht auszuschließen“ eingestuft werden. Damit ergibt sich eine abweichende Entwicklung, in der lokal Magma aufsteigt. Die Auswirkungen auf den Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion müssen dann im Rahmen der abweichenden Entwicklung diskutiert werden.

Beispiel – Entwicklung eines untersuchungsraumspezifischen Endlagersystems GzME „Opalinuston“ (01_00UR)

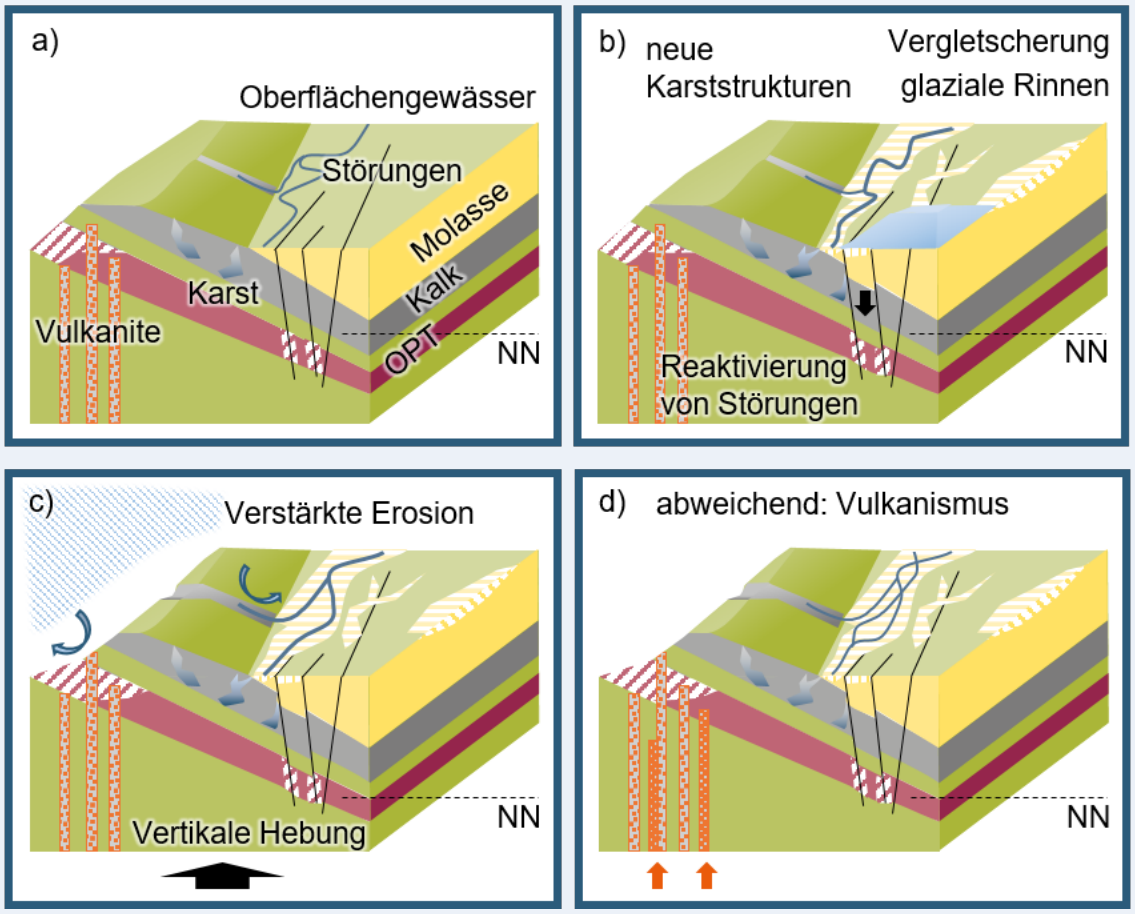


Abbildung 174: Modellvorstellung der räumlichen Differenzierung in der zu erwartenden Entwicklung in b) und c) und einer abweichenden Entwicklung in d) am Beispiel des GzME „Opalinuston“ (01_00UR, schematische Darstellung ohne Maßstab).

Blick von Süden nach Norden (Westen links, Osten rechts). „NN“ zeigt Lage von Normalnull an.

Untersuchungsraumspezifisch abgeleitete Entwicklungen werden im Anschluss auf die Teiluntersuchungsräume (wenn vorhanden) übertragen. Wie bereits an anderer Stelle erwähnt, kann es dabei notwendig werden, innerhalb der Teiluntersuchungsräume Grenzen zu ziehen. Abbildung 175 illustriert die mögliche Diskrepanz zwischen Konfigurationen, die für die Ableitung der Entwicklungen im Untersuchungsraum relevant sind, und dem Schnitt der Teiluntersuchungsräume. Ein Untersuchungsraum kann z. B. anhand von Störungen in Teiluntersuchungsräume eingeteilt sein (Kapitel 5.7), jedoch kann sich beispielsweise die räumliche Konfiguration (Mächtigkeit, Tiefenlage etc.) unabhängig davon verändern. Für die Ableitung der Entwicklung des Untersuchungsraums kann

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

also die Wahl repräsentativer Konfigurationen unabhängig von den Teiluntersuchungsräumen sinnvoll sein, insbesondere, wenn sonst die gleiche Konstellation von Konfiguration und Prozessen mehrfach für mehrere Teiluntersuchungsräume diskutiert werden müsste. Im Beispiel enthalten Teiluntersuchungsräume 1, 2, 3, 4 und 5 Bereiche, in denen Prozess 1 auf Konfiguration 2 trifft, die sich ergebende Entwicklung müsste auf Teiluntersuchungsraum-Basis fünfmal beschrieben werden.

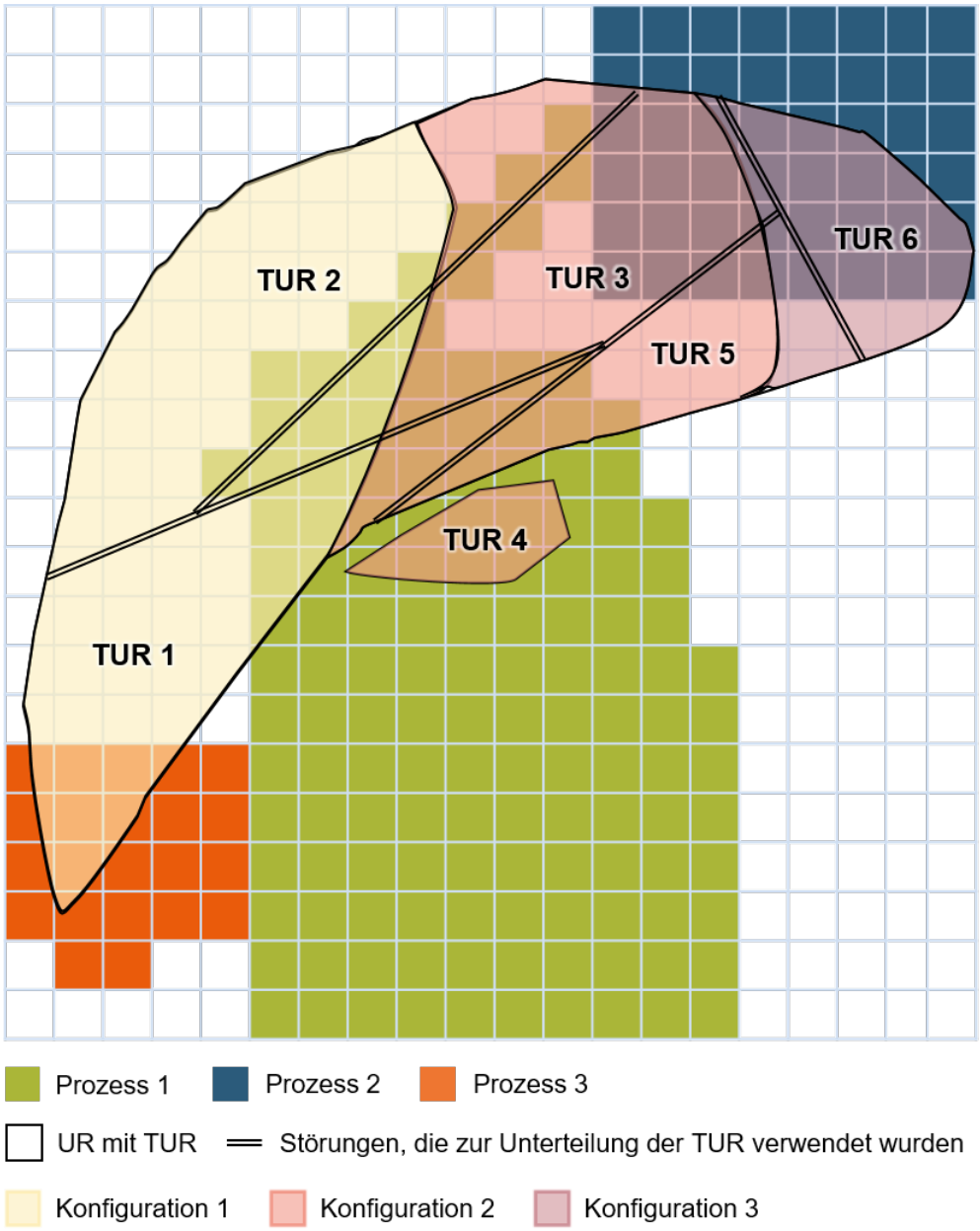


Abbildung 175: Die räumlichen Zusammenhänge, die für die Ableitung der Entwicklungen relevant sind, sind voraussichtlich nicht deckungsgleich mit den Teiluntersuchungsräumen innerhalb eines Untersuchungsraums.
Das Raster dient nur der Visualisierung.

8.2.5 Ergebnisse der Szenarienentwicklung

8.2.5.1 Umgang mit Ungewissheiten

Die Ableitung von Szenarien mit dem Ziel, die zukünftige Entwicklung des Endlagersystems abzubilden, ist eng mit Ungewissheiten verknüpft, OECD-NEA (2016, S. 9) beschreibt Szenarien dazu wie folgt:

„Scenarios arise from uncertainties caused, for example, by the randomness or unpredictability of certain events, the natural variability of geological media and the biosphere, incomplete characterisation of features and processes and the couplings between them and the limited possibility to forecast distant-future biospheres and human habits. Taken together, such uncertainties imply a broad range of possible evolutions of a disposal system, or scenarios, over the very long timescales considered in safety assessment.“[23]

Eine detaillierte Beschreibung hinsichtlich der Umsetzung zur Betrachtung von Ungewissheiten gemäß § 11 EndlSiUntV findet in Kapitel 10 statt.

8.2.5.2 Formulierung von Rechenfällen

Aus den Entwicklungen können Rechenfälle abgeleitet werden. Das bedeutet, dass die verbale Beschreibung der Entwicklungen in mathematisch/numerisch lösbare Aufgaben übersetzt wird. Die Rechenfälle werden im Anschluss als Grundlage für Berechnungen des möglichen Radionuklidaustrags aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich genutzt. Ungewissheiten bei der Parametrisierung der unterschiedlichen Ausprägungen von Komponenten und Prozessen werden über Parametervariationen abgebildet (siehe Kapitel 8.5.4). Dabei stehen die Sicherheitsfunktionen des Endlagersystems im Fokus (Beispiel 87).

[23]Deutsch: „Szenarien ergeben sich aus Ungewissheiten, welche z. B. durch die Zufälligkeit oder Unvorhersagbarkeit bestimmter Ereignisse, der natürlichen Variabilität geologischer Medien und der Biosphäre, unvollständige Charakterisierung von Komponenten und Prozessen und deren Abhängigkeiten untereinander oder der beschränkten Möglichkeit in ferner Zukunft liegende Biosphären und menschliches Verhalten vorherzusagen, hervorgerufen werden können. In der Summe implizieren diese Ungewissheiten einen breiten Bereich möglicher Entwicklungen eines Endlagersystems, bzw. Szenarien, über die sehr langen Zeiträume die in einer Sicherheitsuntersuchung betrachtet werden.“

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

Beispiel 87: Zusammenhänge zwischen Sicherheitskonzept, FEP-Katalog und Rechenfällen

Beispiel – Zusammenhänge zwischen Sicherheitskonzept, FEP-Katalog und Rechenfällen

Tabelle 72: Beispiel für die Verknüpfung von Hauptsicherheitsfunktionen, Eigenschaften im FEP-Katalog und Parametern in den Rechenfällen

Sicherheitskonzept	FEP-Methodik	Rechenfälle
Hauptsicherheitsfunktion	**Sicherheitsfunktion – Eigenschaften**	**Parameter**
Erhalt der Barrierewirkung	Gebirgsdurchlässigkeit	Permeabilität Kluftdurchlässigkeit
…		

Rechenfälle, die aus der wirtsgesteinsspezifischen Szenarienentwicklung abgeleitet werden, dienen dazu, allgemeine Zusammenhänge zu untersuchen und dabei diejenigen Prozesse und Eigenschaften zu identifizieren, die besonders sicherheitsrelevant sind. Auf diese Weise wird eine Wissensbasis aufgebaut, die die Übertragung von auf allgemeiner Ebene festgestellten Zusammenhängen in einzelne Untersuchungsräume ermöglichen soll.

Die zu erwartende Entwicklung des Endlagerbauwerks wird nur in den Entwicklungen der wirtsgesteinsspezifischen Endlagersysteme betrachtet. Auch dabei sind numerische Berechnungen vonnöten. Diese bauen auf der vorläufigen Endlagerauslegung auf. Die im Kapitel 4.2.8 beschriebenen Arbeiten zum Zusammenhang zwischen thermischer Entwicklung und Flächenbedarf haben einen anderen Fokus, können aber als methodisch analog betrachtet werden.

Für die Untersuchungsräume/Teiluntersuchungsräume ist eine abschätzende Berechnung des Radionuklidaustrags vorgesehen (mehr dazu in Kapitel 8.5.3). Die Ungewissheiten, die diesem anhaften, werden im FEP-Katalog mit dokumentiert. Die Fortpflanzung der Ungewissheiten bezüglich einzelner Eigenschaften von Komponenten im Endlagersystem bis zum Radionuklidaustrag lässt sich entlang der Verknüpfungen im FEP-Katalog nachvollziehen (Beispiel 89 und Beispiel 89).

Die konkrete Umsetzung bzw. Abstraktion in Modelle wird als separater Schritt in Kapitel 8.5 beschrieben, sie beinhaltet generell eine Fokussierung auf die wichtigsten Fälle. Um die Anzahl der weitergeführten Fälle handhabbar zu halten, muss also ihre Signifikanz für die Sicherheit betrachtet werden. Dabei können z. B. Prinzipien der statistischen Versuchsplanung angewendet werden.

Beispiel 88: Ableitung von Rechenfällen

Beispiel – Ableitung von Rechenfällen aus der zu erwartenden Entwicklung des Endlagersystems in einem Untersuchungsraum

In diesem Beispiel soll ein fiktiver, rechteckiger Untersuchungsraum betrachtet werden (Abbildung 176).

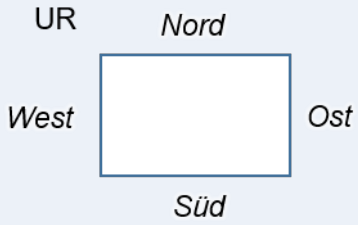


Abbildung 176: Fiktiver Untersuchungsraum

Ausgangszustand des Untersuchungsraums: Die Mächtigkeit des Wirtsgesteinsbereichs mit Barrierefunktion nimmt im Untersuchungsraum graduell von Westen nach Osten ab. Die Änderung der Mächtigkeit kann als sieben diskrete Werte formuliert werden, die für einen Bereich des Untersuchungsraums repräsentativ sind (Abbildung 177).

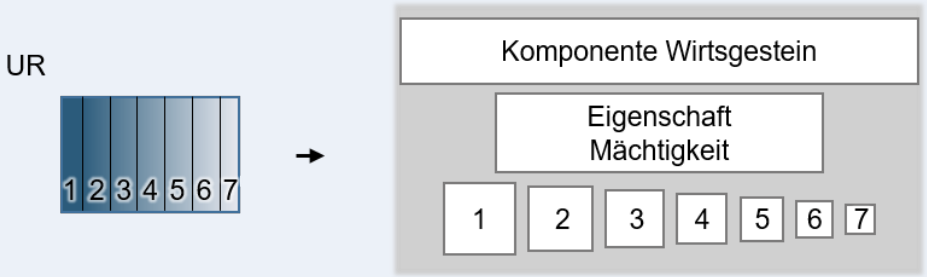


Abbildung 177: Mächtigkeit des Wirtsgesteins im Untersuchungsraum (stärkere Farbe entspricht größerer Mächtigkeit) und repräsentative diskrete Werte (größeres Symbol entspricht größerer Mächtigkeit)

Ausgangszustand: Lithologische Änderungen im Untersuchungsraum führen zu einer graduellen Abnahme der Gebirgsdurchlässigkeit des Wirtsgesteins von Norden nach Süden. Die Änderung der Gebirgsdurchlässigkeit kann als fünf diskrete repräsentative Werte formuliert werden (Abbildung 178)

Beispiel – Ableitung von Rechenfällen aus der zu erwartenden Entwicklung des Endlagersystems in einem Untersuchungsraum

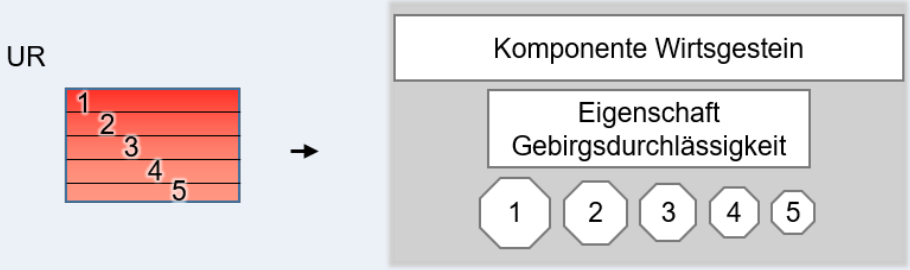


Abbildung 178: Gebirgsdurchlässigkeit des Wirtsgesteins im Untersuchungsraum (stärkere Farbe entspricht größerer Gebirgsdurchlässigkeit) und repräsentative diskrete Werte (größeres Symbol entspricht größerer Gebirgsdurchlässigkeit).

Da sich Mächtigkeit und Gebirgsdurchlässigkeit in diesem Beispiel unabhängig voneinander im Untersuchungsraum ändern, können alle Werte frei kombiniert werden. Gibt es keine weiteren Einflüsse hängt der Radionuklidaustrag am Rand des Wirtsgesteinsbereichs mit Barrierefunktion nur von dessen Mächtigkeit und Gebirgsdurchlässigkeit ab. Es ergeben sich 35 Kombinationen und damit 35 mögliche Werte für den Radionuklidaustrag am Rand des Wirtsgesteinsbereichs mit Barrierefunktion (Abbildung 179).

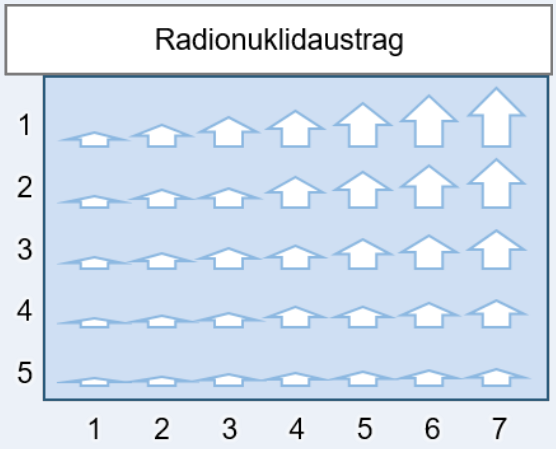


Abbildung 179: Radionuklidaustrag in Abhängigkeit der räumlich variablen Mächtigkeit und Gebirgsdurchlässigkeit (Norden ist oben).

Bei dem so bestimmten Radionuklidaustrag ist die **räumliche** Variabilität der Eigenschaften im Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion im Untersuchungsraum berücksichtigt, aber noch nicht die **zeitliche Entwicklung**.

Im Untersuchungsraum des Beispiels wirkt im Bewertungszeitraum ein Prozess - Erosion. Dafür muss für den Ausgangszustand ergänzt werden, dass die Mächtigkeit des Deckgebirges überall gleich ist.

Die Entwicklung umfasst direkte und indirekte Auswirkungen des Prozesses.

Beispiel – Ableitung von Rechenfällen aus der zu erwartenden Entwicklung des Endlagersystems in einem Untersuchungsraum

Direkte Auswirkung: Die Erosion des Deckgebirges führt im Süden des Gebietes zu einer Verringerung der Mächtigkeit des Deckgebirges (Abbildung 180).

Indirekte Auswirkung: Die dadurch erzeugte Entlastung kann zur Öffnung von Entlastungsklüften im Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion führen.

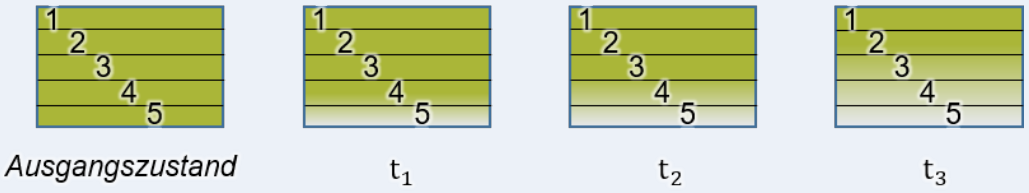


Abbildung 180: Erosion verringert von Süden her die Mächtigkeit des Deckgebirges. Dargestellt sind drei aufeinanderfolgende Zeitschritte (Zeitpunkt t_1, t_2, t_3) nach dem Ausgangszustand. Stärkere Farbe entspricht größerer Mächtigkeit.

Um zu prüfen, **ob** es tatsächlich zur Entstehung von Entlastungsklüften kommt, sind Informationen zum Spannungsfeld und zum Deformationsverhalten der Gesteine notwendig, sowie der Betrag der Erosion. Für dieses Beispiel wird eine einfache Annahme getroffen, um nur einen Fall weiter zu betrachten: Wenn die Mächtigkeit des Deckgebirges kleiner wird, wird die Gebirgsdurchlässigkeit des Wirtsgesteins größer.

Die Gebirgsdurchlässigkeit des Wirtsgesteins wird von Süden her nach und nach (gleichmäßig) erhöht, bis beim letzten betrachteten Zeitpunkt (t_3) nur noch ganz im Norden eine etwas höhere Gebirgsdurchlässigkeit vorliegt, im Rest des Untersuchungsraums jedoch der gleiche Wert erreicht wurde (Abbildung 181).

Beispiel – Ableitung von Rechenfällen aus der zu erwartenden Entwicklung des Endlagersystems in einem Untersuchungsraum

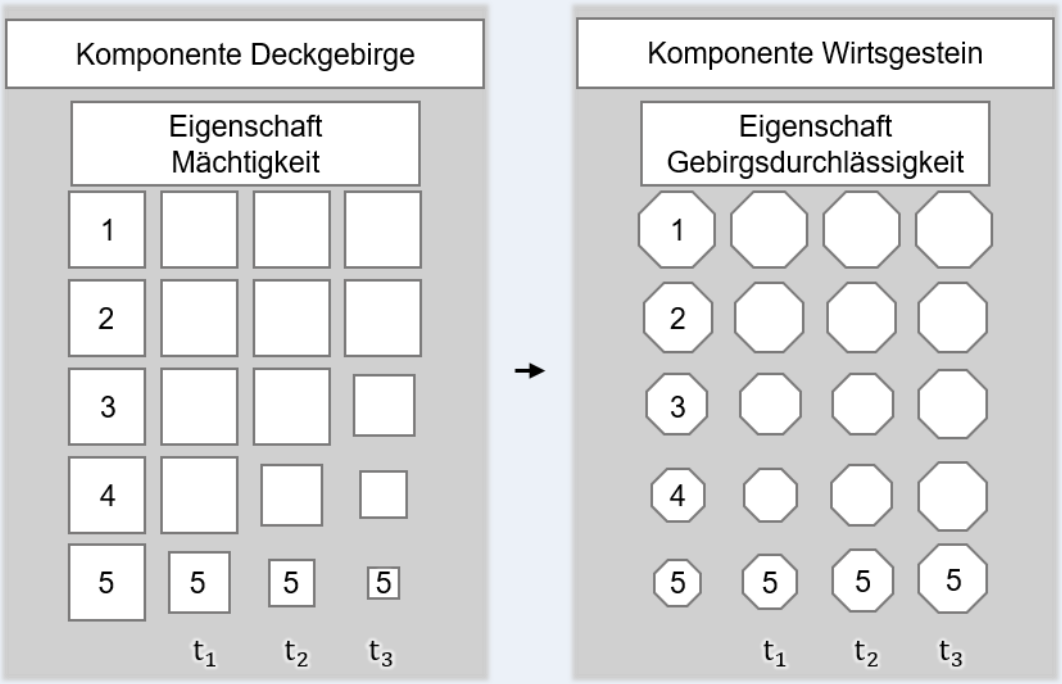


Abbildung 181: Aufgrund der Erosion verringert sich lokal die Mächtigkeit des Deckgebirges, was lokal zu einer Erhöhung der Gebirgsdurchlässigkeit des Wirtsgesteins führt.
Die erste Spalte zeigt jeweils die von Nord (erste Zeile) nach Süd (letzte Zeile) variierende Ausprägung. Die Spalten 2 bis 4 stellen jeweils die zeitliche Änderung für die Zeitpunkte t_1, t_2 und t_3 dar. Zum letzten Zeitpunkt ist die Gebirgsdurchlässigkeit beinahe im ganzen Untersuchungsraum gleich (Zeile 2 bis 5).

Da der Radionuklidaustrag von der Gebirgsdurchlässigkeit abhängt, kann für jeden Zeitschritt der Austrag räumlich aufgelöst bestimmt werden (Abbildung 182)

Beispiel – Ableitung von Rechenfällen aus der zu erwartenden Entwicklung des Endlagersystems in einem Untersuchungsraum

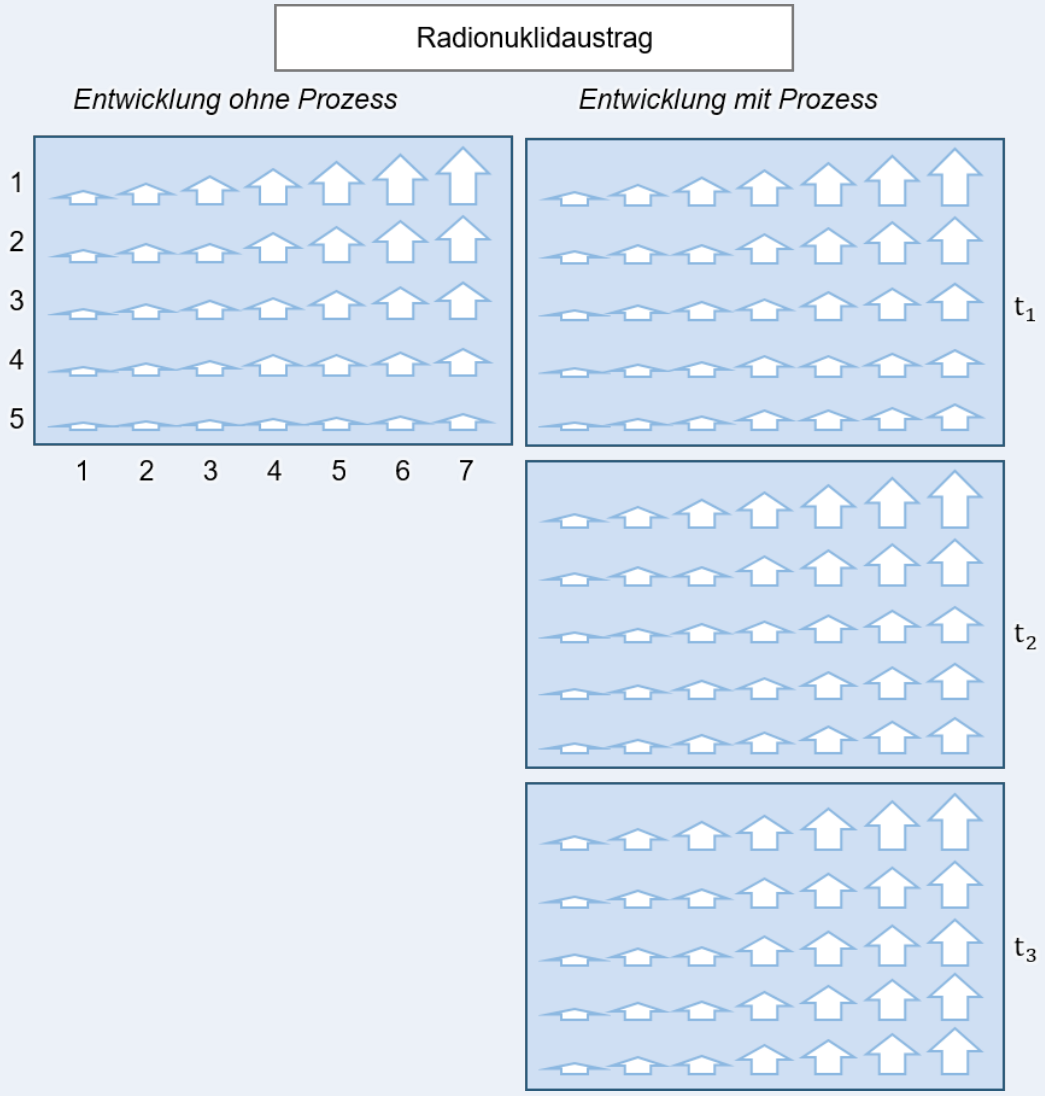


Abbildung 182: Der Radionuklidaustrag ist nicht nur im Raum variabel, sondern zusätzlich über die Zeit

Der Radionuklidaustrag ist insgesamt (integral) im Südwesten des Untersuchungsraums am geringsten, obwohl er sich mit der Zeit deutlich erhöht, da dort besonders günstige Ausgangsbedingungen herrschten (höchste Mächtigkeit und geringste Gebirgsdurchlässigkeit des Wirtsgesteinsbereichs mit Barrierefunktion).

Dies bedeutet, dass im Untersuchungsraum dort besonders große Sicherheitsreserven bestehen.

Ob der Südwesten des Untersuchungsraums damit der bestmögliche Standort im Untersuchungsraum ist muss allerdings unter Berücksichtigung weiterer Rahmenbedingungen abgewogen werden und lässt sich nicht automatisiert ableiten.

Beispiel – Ableitung von Rechenfällen aus der zu erwartenden Entwicklung des Endlagersystems in einem Untersuchungsraum

Wie oben bereits erwähnt gibt es weitere denkbare Fälle, die zu Variationen im Radionuklidaustrag führen können. Die Erosion könnte andere Beträge haben, anders räumlich wirken, die Bildung von Entlastungsklüften kann mehr oder weniger stark ausgeprägt sein (oder gar nicht stattfinden), und darüber hinaus können Mächtigkeit und Gebirgsdurchlässigkeit des Wirtsgesteinsbereichs mit Barrierefunktion zusätzlich zur großen räumlichen Variabilität noch mit statistischen Schwankungen belegt sein. Es kann daher hilfreich sein, nicht jeden möglichen Fall rechnerisch zu behandeln, sondern einige abdeckende auszuwählen – ähnlich, wie zu Beginn repräsentative Werte für verschiedene Bereiche des Untersuchungsraums ausgewählt wurden. So kann für einzelne Aspekte einer Entwicklung die Anzahl an Berechnungen auf ein handhabbares Maß reduziert werden, um insgesamt eine größere Bandbreite von Entwicklungen behandeln zu können (Abbildung 183).

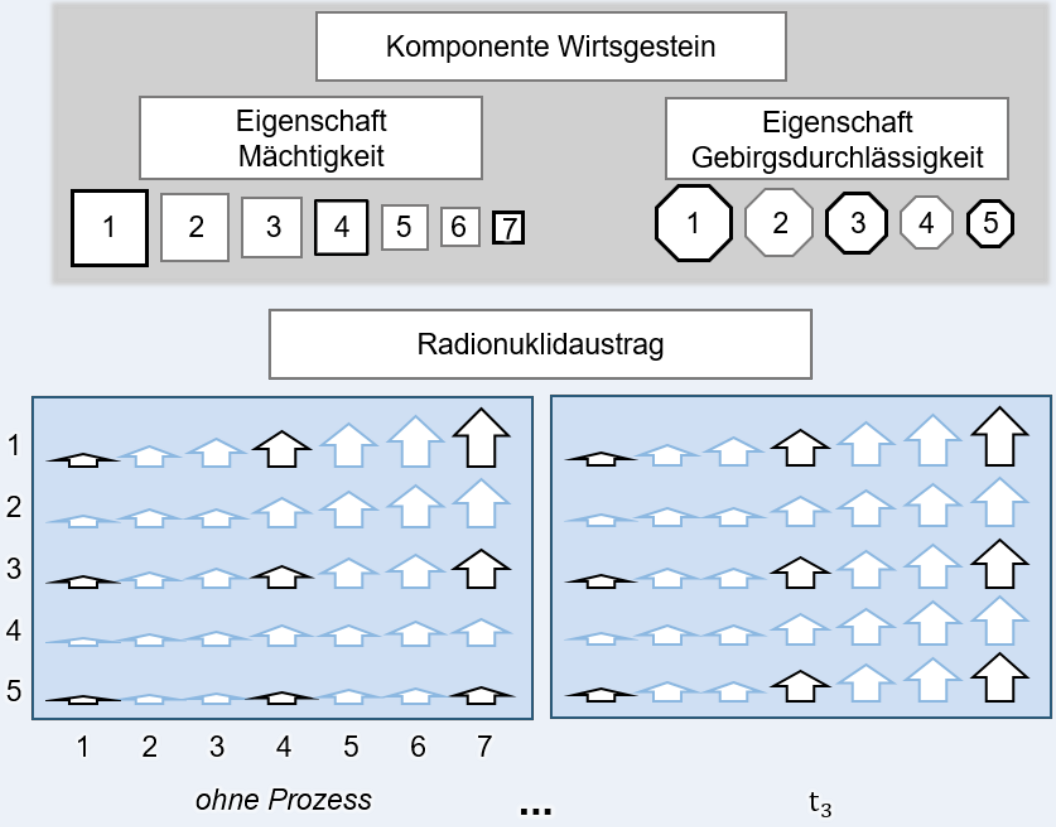


Abbildung 183: Um zu einer abdeckenden Aussage zu gelangen muss es nicht notwendig sein, aus allen Kombinationen von Mächtigkeit und Gebirgsdurchlässigkeit einen Radionuklidaustrag zu berechnen.
Stattdessen können beispielsweise jeweils das Minimum, das Maximum und der Mittelwert oder Median betrachtet werden (Symbole schwarz umrandet).

Beispiel 89: Fortpflanzung von Ungewissheiten bezüglich einer Eigenschaft

Beispiel – Fortpflanzung von Ungewissheiten bezüglich einer Eigenschaft

Abbildung 184 zeigt eine mögliche Ableitung von mehreren Rechenfällen, die mit Konsequenzen für den Radionuklidaustrag verbunden sind, wie sie beispielsweise in der Entwicklung des wirtsgesteinsspezifischen Endlagersystems im Tongestein denkbar ist. Die Komplexitätsebene des Beispiels wird aktuell in der Beschreibung der Transportrechnungen nicht berücksichtigt (siehe Kapitel 8.5.5). Es soll das Grundprinzip veranschaulichen, wie natürliche Schwankungen oder andere Ungewissheiten bei einzelnen Komponenten sich durch die Wechselwirkungen im System bis zum Indikator für den sicheren Einschluss, nämlich dem Radionuklidaustrag, fortpflanzen können, und dort zu einer Spanne von Ergebnissen führen.

Bei der Beschreibung der zu erwartenden Entwicklung wird zunächst der geothermische Wärmestrom betrachtet. Über die thermischen Eigenschaften der Komponenten (nicht dargestellt) kann die Temperatur des Wirtsgesteins und der Lösungen im Wirtsgestein berechnet werden. Die Temperatur der Komponenten beeinflusst die ablaufenden chemischen Prozesse. Die Eigenschaft „Stoffliche Zusammensetzung“ der Komponente Wirtsgestein (hier im Beispiel Tongestein) ist mit Ungewissheiten behaftet, da der Kalkgehalt schwankt.

Dies wird in zwei geochemische Parametersets für das Wirtsgestein übersetzt. Über den Prozess Lösung/Fällung steht das Wirtsgestein im Gleichgewicht mit den Lösungen im Wirtsgestein.

Die Ungewissheit bezüglich des Kalkgehalts im Wirtsgestein pflanzt sich so fort: Unter der Annahme, dass eine signifikante Veränderung in der stofflichen Zusammensetzung der Lösungen im Wirtsgestein festgestellt wird, müssen auch von hier zwei chemische Parametersets weitergeführt werden.

Als nächstes wird die Lösung der Radionuklide in den Lösungen im Wirtsgestein betrachtet, die abhängig von der stofflichen Zusammensetzung der Lösungen ist. Damit ändert sich der Zustand dieser Komponenten. Über Diffusion werden die Radionuklide transportiert. Die Ungewissheiten bezüglich der stofflichen Zusammensetzung des Wirtsgesteins führen schlussendlich zu zwei Berechnungen des Radionuklidaustrags am Rand des Wirtsgesteins.

Im Beispiel nicht berücksichtigt sind zeitliche Veränderungen. Der Kalkgehalt des Wirtsgesteinsbereichs, der hier betrachtet wird, ist räumlich verschieden, die Änderungen über die Zeit sind demgegenüber aufgrund der geringen Grundwasserbewegungen in Tongesteinen zu vernachlässigen.

Beispiel – Fortpflanzung von Ungewissheiten bezüglich einer Eigenschaft

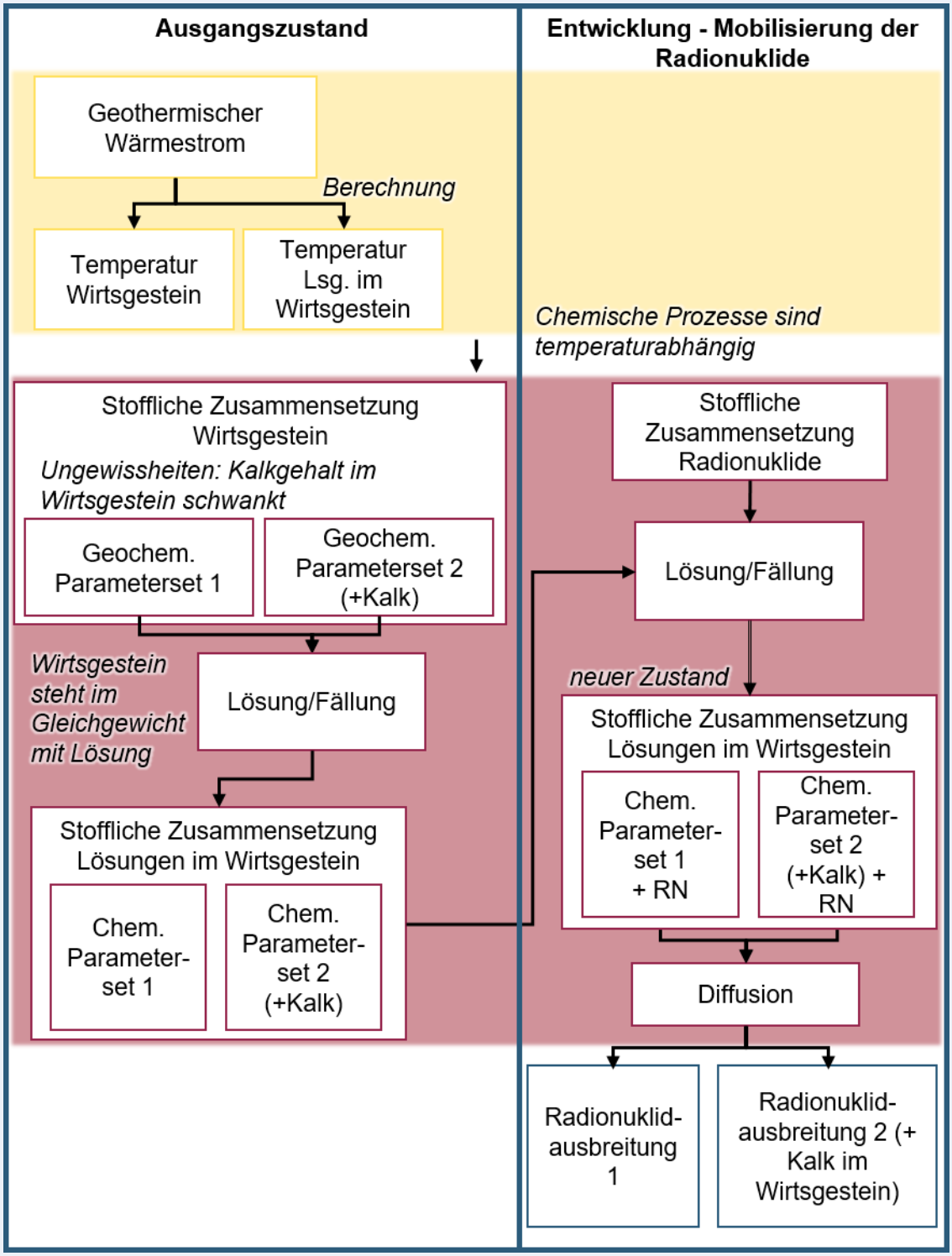


Abbildung 184: Beispielhafte Übersetzung einer Entwicklung in Rechenfälle um die Radionuklidausbreitung unter Berücksichtigung von Ungewissheiten zu bestimmen

8.2.5.3 Qualitative Aussagen

Neben der quantitativen Bewertung des sicheren Einschlusses ausgehend von Rechenfällen (Kapitel 8.5), kann es notwendig sein, dass qualitative Aussagen zu Entwicklungen getroffen werden müssen, auf deren Grundlage eine Bewertung der Möglichkeit zur Ausweisung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durchgeführt wird. Die Notwendigkeit einer qualitativen Aussage ergibt sich daraus, dass es Entwicklungen geben kann, für die zum jetzigen Zeitpunkt keine quantitative Bewertung hinsichtlich des sicheren Einschlusses der Radionuklide getroffen werden kann und deswegen nicht vernachlässigt werden dürfen. Eine mögliche Vorgehensweise wird in Kapitel 8.5.10.2 näher erläutert.

8.3 Der Aspekt b) im Zusammenspiel mit der Ableitung und Bewertung von Entwicklungen

Die Analyse und Bewertung der langfristigen Stabilität der geologischen Verhältnisse, Aspekt b § 7 Abs. 6 Nr. 3 Buchst. b) EndlSiUntV, wird an die beinahe wortgleiche Anlage 4 *Langfristige Stabilität der günstigen Verhältnisse* (zu § 24 Abs. 3) StandAG angelehnt. Ziel ist die zuverlässige zeitliche Prognostizierbarkeit der geologischen Verhältnisse. Dazu gehört die Möglichkeit, dass sicherheitsrelevante Langzeitveränderungen verlässlich identifiziert und eingeschätzt werden können. Als Bewertungsgrundlage dient nach StandAG die Analyse der Vergangenheit. Indikatoren sind insbesondere die Zeitspanne in denen sich die Betrachtungsmerkmale „Mächtigkeit“, flächenhafte bzw. räumliche „Ausdehnung“ und „Gebirgsdurchlässigkeit“ des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht wesentlich verändert haben. Sie sind wie folgt zu bewerten:

1. als günstig, wenn seit mehr als zehn Millionen Jahren keine wesentliche Änderung des betreffenden Merkmals aufgetreten ist,
2. als bedingt günstig, wenn seit mehr als einer Million, aber weniger als zehn Millionen Jahren keine solche Änderung aufgetreten ist, und
3. als ungünstig, wenn innerhalb der letzten eine Million Jahre eine solche Änderung aufgetreten ist.

Da es bei der Bewertung der langfristigen Stabilität der geologischen Verhältnisse allgemein um die Prognostizierbarkeit der geologischen Verhältnisse geht, hängt sie im Rahmen der rvSU eng mit den Analysen und Bewertungen von geogenen Prozessen im Bewertungszeitraum zusammen. Die Bewertung der geogenen Prozesse, ob diese in einem Gebiet in der Vergangenheit stattgefunden haben und ob und wie sicher diese zukünftig prognostiziert werden können, spielen neben deren Einwirkung auf das Endlagersystem hier die entscheidende Rolle. Dies wird in der rvSU beginnend bei der Beschreibung geogener Prozesse in der geowissenschaftlichen Langzeitprognose, bis hin zu den Arbeiten im Rahmen der Analysen des FEP-Katalogs, wo die potenziellen Auswirkungen der geogenen Prozesse auf das Endlagersystem untersucht werden und darauf basierend unterschiedliche Entwicklungen des Endlagersystems beschrieben werden, berücksichtigt. Beide Arbeitsschritte werden hinsichtlich des Ziels bearbeitet negative Änderungen der sicherheitsrelevanten Eigenschaften des Endlagersystems durch geogene Prozesse für den Bewertungszeitraum der kommenden

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

eine Million Jahren zu identifizieren und entsprechend zu berücksichtigen. Die Ergebnisse aus der geowissenschaftlichen Langzeitprognose, der Analyse des FEP-Katalogs und der daraus abgeleiteten Entwicklungen enthalten somit wichtige Informationen für die Bewertung der langfristigen Stabilität der geologischen Verhältnisse.

Die Arbeiten und Bewertungen, die im Rahmen der Analyse des Endlagersystems stattfinden, enthalten Aspekte der Prognose und Prognostizierbarkeit, die nach Wortlaut über die Bewertungsgrundlage der Anlage 4 (zu §24 Abs. 3) StandAG hinausgehen. Eine wörtliche Auslegung der Indikatoren sieht eine Bewertung vor, die auf der Stabilität der geologischen Verhältnisse in der Vergangenheit basiert. Dadurch kann es bei der Bewertung der Stabilität der günstigen geologischen Verhältnisse zu Widersprüchen mit der fachlichen Ausarbeitung in der geowissenschaftlichen Langzeitprognose, der Analyse des FEP-Katalogs und der daraus abgeleiteten Entwicklungen kommen, da hier zusätzliche Informationen zur Prognose hinzugezogen werden. Um dies zu verhindern, wird im Folgenden eine Möglichkeit aufgezeigt die Bewertungsgrundlage der Anlage 4 zu erweitern.

Hierbei erfolgt die Bewertung der langfristigen Stabilität der geologischen Verhältnisse in Anlehnung an die Indikatoren der Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG. Jedoch werden die Indikatoren um eine Bewertung der langfristigen Stabilität im Bewertungszeitraum erweitert. Sofern Informationen vorliegen die das Wirken geogener Prozesse im Bewertungszeitraum beschreiben, wird dies entsprechend den unten aufgeführten Ergänzungen zu den Indikatoren und nicht anhand des Wortlauts der Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3 StandAG) bewertet. Alle Prozesse die eine Änderung der Betrachtungsmerkmale „Mächtigkeit“, „Ausdehnung“, und „Gebirgsdurchlässigkeit“ zur Folge haben werden, sind wie folgt zu bewerten:

1. als günstig, wenn eine wesentliche Änderung des betreffenden Merkmals für den Bewertungszeitraum **nach menschlichem Ermessen auszuschließen ist**.
2. als bedingt günstig, wenn eine solche Änderung innerhalb des Bewertungszeitraumes **Teil einer abweichenden Entwicklung ist**.
3. als ungünstig, wenn eine solche Änderung innerhalb des Bewertungszeitraums **Teil einer erwarteten Entwicklung ist**.

Inwieweit die hier genannte Möglichkeit zum Umgang mit der Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3)StandAG im Rahmen der rvSU umgesetzt wird, bleibt zunächst offen. Dies soll insbesondere bei der Erarbeitung der Methodik zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien, die nicht Teil dieses Dokuments ist, näher erörtert werden.

8.4 Funktionsfähigkeit von technischen und geotechnischen Barrieren

Das Endlager ist ein gestaffeltes System verschiedener Barrieren, die den Einschluss der radioaktiven Abfälle sicherstellen sollen. Hierfür sind diesen Barrieren entsprechende Funktionen bzw. Eigenschaften zugeordnet, mit denen dieses Ziel erreicht werden soll (siehe auch Kapitel 4.1.3.3.3). Für die Durchführung der rvSU ist es nach § 7 Abs. 6 Nr. 2 EndlSiUntV erlaubt davon auszugehen, „*dass technische und geotechnische Barrieren ihre Funktion grundsätzlich in dem jeweils vorgesehenen Zeitraum erfüllen, sofern dies nach dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik nicht ausgeschlossen erscheint*“. In Deutschland sind die Arbeiten bzgl. der Auslegung eines Endlagers mit einem Konzept, das auf einem einschlusswirksamen Gebirgsbereich beruht, inklusive den technischen und geotechnischen Barrieren, noch am Anfang. Weltweit werden Konzepte mit einschlusswirksamem Gebirgsbereich im Kristallin nicht verfolgt, weshalb wenige Grundlagen für dieses Konzept vorhanden sind. Es werden Konzepte entwickelt und verfolgt, die neben den Anforderungen an das Wirtsgestein höhere Anforderungen an die technischen und geotechnischen Barrieren hinsichtlich Rückhaltung und Einschluss der radioaktiven Abfälle stellen (dies sind weder Konzepte mit einem einschlusswirksamen Gebirgsbereich noch ohne einschlusswirksamen Gebirgsbereich, beispielsweise können hier herkömmliche Multibarrierenkonzepte unter Einschluss der Geologie zur Anwendung kommen). Schweden und Finnland seien hier hervorgehoben. Die durchführenden Institutionen dieser beiden Länder befinden sich in verschiedenen Zeitpunkten der Genehmigung. Die Arbeiten und Ergebnisse sind aber durch die jeweiligen Randbedingungen der Länder, hierbei seien insbesondere die regulatorischen Anforderungen hervorgehoben, spezifisch erarbeitet worden. Bei dem deutschen Konzept müssen beispielsweise die abweichenden regulatorischen Anforderungen berücksichtigt werden, was neuen Herausforderungen birgt. Für die GzME wurden daher für das kristalline Wirtsgestein noch keine vorläufigen Auslegungen des Endlagers erarbeitet. Es wurden die Herausforderungen bei den Arbeiten für die Auslegung der jeweiligen Endlagersysteme Typ 1 oder 2 im Anhang dargestellt und einige Annahmen formuliert (vgl. Anhang 1).

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

8.5 Quantitative Bewertung des sicheren Einschlusses

8.5.1 Einleitung

Einen zentralen Teil der Analyse des Endlagersystems umfasst die Bewertung des Endlagersystems hinsichtlich verschiedener Aspekte. Nach § 7 Abs. 6 Nr. 3 EndlSiUntV ist sowohl die Möglichkeit zur Ausweisung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (§ 7 Abs. 6 Nr. 3 Buchst. e) EndlSiUntV, im folgenden Aspekt e) genannt) als auch für die zu erwartenden Entwicklungen die Möglichkeit des sicheren Einschlusses der Radionuklide (§ 7 Abs. 6 Nr. 3 Buchst. f) EndlSiUntV, im folgenden Aspekt f) genannt) zu bewerten (Abbildung 185). Beide Aspekte sind eng miteinander verknüpft und werden nachfolgend daher gemeinsam beschrieben. Die gemeinsame Betrachtung von Aspekt e) und f) wird als quantitative Bewertung des sicheren Einschlusses bezeichnet. Die quantitative Bewertung beschreibt neben dem quantitativen Ansatz der Methodik die prospektive, also vorausschauende, Betrachtung beider Aspekte.

Aspekt e), die Bewertung der Ausweisung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, beruht u. a. auf der Grundlage von Aspekt f), der Möglichkeit des sicheren Einschlusses. Daher wird im Folgenden zunächst Aspekt f) und erst im Anschluss Aspekt e) erläutert.

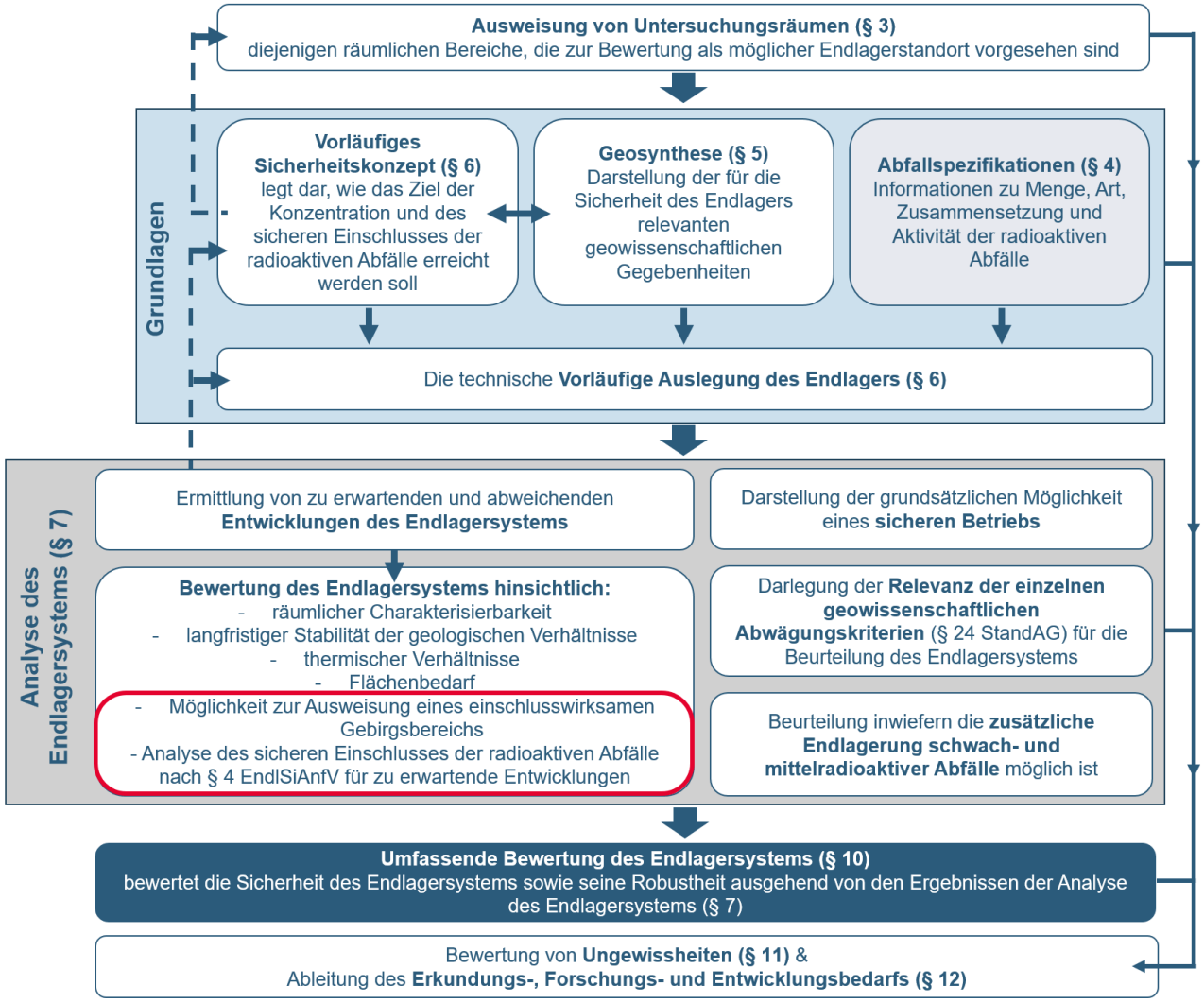


Abbildung 185: Ablauf der rvSU nach EndlSiUntV.
Die Bewertung des Endlagersystems folgt auf die Ermittlung von zu erwartenden und abweichenden Entwicklungen und umfasst unter anderem die Bewertung des sicheren Einschlusses und die Möglichkeit zur Ausweisung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs.

§ 7 Abs. 6 Nr. 3 EndlSiUntV Zu bewertende Aspekte e) und f)

„in Verbindung mit der vorläufigen Auslegung des Endlagers sind für den Bewertungszeitraum anhand überschlägiger Abschätzungen und Analogiebetrachtungen folgende Aspekte zu bewerten:

[…]

e) die Möglichkeit zur Ausweisung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und

f) für die zu erwartenden Entwicklungen die Möglichkeit des sicheren Einschlusses der Radionuklide nach § 4 der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung (EndlSiAnfV) durch Zusammenwirken verschiedener Sicherheitsfunktionen innerhalb der wesentlichen Barrieren;“

8.5.2 Anforderungen

Für die zu erwartenden Entwicklungen ist gemäß § 7 Abs. 6 Nr. 3 Buchst. f) EndlSiUntV die Möglichkeit des sicheren Einschlusses der Radionuklide nach § 4 EndlSiAnfV („Sicherer Einschuss der radioaktiven Abfälle“) zu bewerten. Im Speziellen ist dabei zu prüfen, dass für den Bewertungszeitraum von einer Million Jahren (vgl. § 1 Abs. 2 StandAG) *„insgesamt höchstens ein Anteil von 10^{-4} und […] jährlich höchstens ein Anteil von 10^{-9} sowohl der Masse als auch der Anzahl der Atome aller ursprünglich eingelagerten Radionuklide aus dem Bereich der wesentlichen Barrieren ausgetragen wird“* (§ 4 Abs. 5 EndlSiAnfV). Wesentliche Barrieren sind gemäß § 4 Abs. 3 EndlSiAnfV entweder der einschlusswirksame Gebirgsbereich oder, im Spezialfall des kristallinen Wirtsgesteins, entsprechend geeignete technische und geotechnische Barrieren.

Da durch § 4 EndlSiAnfV feste Grenzwerte vorgegeben werden, wird eine rechnerische Betrachtung und Bewertung angestrebt.

§ 4 EndlSiAnfV *Sicherer Einschluss der radioaktiven Abfälle*

(1) *Die einzulagernden radioaktiven Abfälle sind im Endlagersystem mit dem Ziel zu konzentrieren und sicher einzuschließen, die darin enthaltenen Radionuklide mindestens im Bewertungszeitraum von der Biosphäre fernzuhalten.*

(2) *Das vorgesehene Endlagersystem hat den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle passiv und wartungsfrei durch ein robustes, gestaffeltes System verschiedener Barrieren mit unterschiedlichen Sicherheitsfunktionen zu gewährleisten.*

(3) *Die wesentlichen Barrieren zum Erreichen des sicheren Einschlusses der radioaktiven Abfälle sind*

1. *ein oder mehrere einschlusswirksame Gebirgsbereiche oder*
2. *im Fall des Wirtsgesteins Kristallingestein, sofern kein einschlusswirksamer Gebirgsbereich ausgewiesen werden kann, für die jeweilige geologische Umgebung geeignete technische und geotechnische Barrieren.*

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

(4) *Der sichere Einschluss muss innerhalb der wesentlichen Barrieren nach Absatz 3 so erfolgen, dass die Radionuklide aus den radioaktiven Abfällen weitestgehend am Ort ihrer ursprünglichen Einlagerung verbleiben.*

(5) *Für die zu erwartenden Entwicklungen ist zu prüfen und darzustellen, dass im Bewertungszeitraum*

1. *insgesamt höchstens ein Anteil von 10^{-4} und*
2. *jährlich höchstens ein Anteil von 10^{-9}*

sowohl der Masse als auch der Anzahl der Atome aller ursprünglich eingelagerten Radionuklide aus dem Bereich der wesentlichen Barrieren ausgetragen wird. In diesen Anteilen sind auch radioaktive Zerfallsprodukte der ursprünglich eingelagerten Radionuklide zu berücksichtigen.

(6) *Für die abweichenden Entwicklungen ist zu prüfen und darzustellen, dass das Endlagersystem im Bewertungszeitraum seine Funktion nach den Absätzen 1 bis 4 beibehält.*

8.5.3 Strategie und Kennzahlen

Um den Massen- und Stoffmengenaustrag zu bestimmen und zu bewerten, wird für jeden Teiluntersuchungsraum (oder für jeden Bereich eines Teiluntersuchungsraums), der die vorangegangenen Prüfschritte positiv beschritten hat, mindestens ein eindimensionales repräsentatives, geologisches Profil erstellt (Kapitel 5.7). Dieses Profil umfasst das Wirtsgestein sowie oberhalb und unterhalb liegende Gesteinseinheiten (siehe Abbildung 198). Das Profil spiegelt repräsentativ die lithologischen Geometrien des Teiluntersuchungsraums wider. Ist ein Teiluntersuchungsraum bezüglich der wesentlichen Geometrien (Teufe und Mächtigkeit desWirtsgesteins) sehr heterogen, wird ggf. mehr als ein repräsentatives Profil betrachtet. Die Teufen der jeweiligen Lithologien des repräsentativen Profils bilden die Basis für ein 1D-Radionuklid-Transportmodell (vgl. Kapitel 8.5.7.1). Die Parametrisierung erfolgt lithologisch tiefendifferenziert und nuklidspezifisch, wenn relevant. Ferner wird eine Vielzahl von Parametersets generiert, die in das Transportmodell eingehen (vgl. Kapitel 8.5.4), um die zu erwartenden Entwicklungen und Parameterungewissheiten zu betrachten. Auf Grundlage dieses Transportmodells werden Berechnungen zum Massen- und Stoffmengenaustrag durchgeführt. Diese Modellsimulationen führen zu einer Abschätzung der Transportlänge (d_{1Ma}), d. h. der Entfernung vom potenziellen Endlager für den modellierten Zeitraum von einer Million Jahren, innerhalb derer die Anforderungen an den Massen- und Stoffmengenaustrag noch erfüllt sind. Die Transportlänge wird mit dem minimalen Abstand (d_{min}) verglichen, der im jeweiligen Wirtsgestein des Teiluntersuchungsraums zur Verfügung steht. Als minimaler Abstand wird die geringste Distanz zwischen dem Rand des Wirtsgesteins und dem Rand des potenziellen Endlagers definiert.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

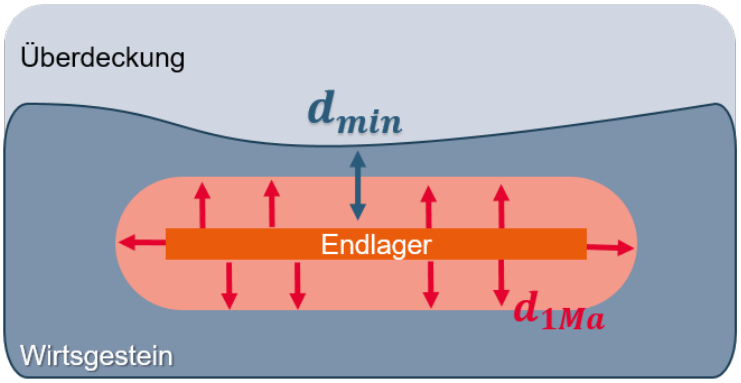


Abbildung 186: Beispiel für d_{1Ma} und d_{min} in einem stratiformen Wirtsgestein

Für die Beurteilung, ob die Massen- und Stoffmengengrenzwerte einhalten werden kann, wird die Größe I_M verwendet. Diese beschreibt das Verhältnis zwischen dem minimalen Abstand d_{min} und der Transportlänge d_{1Ma} (vgl. Abbildung 186) für den Bewertungszeitraum von einer Million Jahren:

$$I_M = d_{min}/d_{1Ma} \quad (2)$$

Mit:

I_M (-): Verhältnis aus minimalem Abstand und Transportdistanz aus einer Modellrechnung

d_{min} (m): Minimaler Abstand zwischen potenziellem Endlager und Rand des Wirtsgesteins an der Stelle des repräsentativen Profils

d_{1Ma} (m): Distanz bezüglich der zu erwartenden Entwicklungen, über welche Radionuklide in einer Million Jahren transportiert werden

Es gibt zwei Ansprüche, die innerhalb von Aspekt f) rechnerisch adressiert werden. Einerseits die binäre Aussage, ob ein Gebiet das Potenzial zur quantitativen Einhaltung der Massen- und Stoffmengengrenzwerte aufweist (oder nicht). Andererseits eine Möglichkeit zum Gütevergleich zwischen Gebieten, die das Massen- und Stoffmengenkriterium potenziell einhalten. Aus diesen beiden Ansprüchen resultieren zwei Typen von Eignungskennzahlen.

Angesichts der Ungewissheiten, die mit den Parametern der Modellrechnung verknüpft sind, ergibt sich eine Vielzahl an wahrscheinlichen oder weniger wahrscheinlichen Werten für I_M. Im ersten Schritt wird daher geprüft, ob ein Gebiet für die plausibelsten Schätzwerte der Parameterwerte („bestmögliche Einschätzung“, auch mit B.E. abgekürzt) die Gleichung (3) erfüllt.

$$\overline{I_M} > 1 \quad (3)$$

Mit:

$\overline{I_M}$ (-): Kennzahl; Wert von I_M unter der Annahme der jeweils bestmöglichen Einschätzungen für alle Modellparameter

Gleichung (3) gibt an, ob der minimale Abstand größer ist als der Transportweg für die B.E. Rechnung ($\overline{d_{1Ma}}$). Die Balken über den Symbolen signalisieren, dass es sich um die jeweils bestmögliche Einschätzung handelt (vgl. Kapitel 8.5.5). Zu beachten ist hierbei, dass sowohl der minimale Abstand

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

als auch der Transportweg räumlich innerhalb des Gebiets variieren können, insbesondere dann, wenn die Mächtigkeit des Wirtsgesteins variiert. Es kann daher der Fall eintreten, dass ein Bereich des Teiluntersuchungsraums mit $\overline{I_M} < 1$ ausscheidet, während andere Bereiche das Kriterium erfüllen.

Die Vorgehensweise bei der Ermittlung des minimalen Abstand und der Transportlänge werden in den Kapiteln 8.5.6 und 8.5.7 genauer beschrieben. Anhand der Kennzahl $\overline{I_M}$ kann abgeschätzt werden, ob ein sicherer Einschluss potenziell gelingt oder nicht (vgl. Beispiel 90). Im ersten Fall ist das Gebiet prinzipiell geeignet, im letzteren Fall ist es ungeeignet, da es die in § 4 EndlSiAnfV formulierten Anforderungen nicht erfüllt und über die umfassende Bewertung (§ 10 EndlSiUntV) in Kategorie C (Abbildung 188) eingestuft wird.

Dem jeweils bestmöglichen Schätzwert für die Parameter kommt daher eine besondere Bedeutung zu. Diese besondere Bedeutung resultiert aus dem Umstand, dass aus der reinen Bandbreite von I_M kein hartes Kriterium formuliert werden kann. Eine Alternative zur Verwendung eines B.E.-Werts wäre eine statistische Auswertung der Bandbreite, etwa über die relative Häufigkeit, mit der das Kriterium im Rahmen der Parametervariation erfüllt wird. Dieser Ansatz wird für den Vergleich von Gebieten verwendet, nicht aber für die Prüfung, ob ein sicherer Einschluss möglich ist. Für diese Prüfung wird auf einen B.E.-Wert zurückgegriffen, da dieser der Wert ist, der wohlbegründet für relativ wahrscheinlich gehalten werden kann. Dieses Vorgehen birgt allerdings das Risiko, willkürlich zu werden, je weniger über die Parameter bekannt ist, weil eine begründete Wahl eines bestmöglichen Schätzwerts schwieriger wird. Weitere Arbeiten hierzu sind, über die in diesem Dokument dargestellten Sachverhalte hinaus, in Vorbereitung.

Die Verwendung eines bestmöglichen Schätzwerts für das Kriterium $\overline{I_M} > 1$ bedeutet, dass ggf. Teiluntersuchungsräume als ungeeignet bewertet werden, obwohl im Rahmen der Parameter- und Szenarienungewissheiten durchaus Szenarien oder Parameterkombinationen möglich sind, unter denen der Teiluntersuchungsraum den Massen- und Stoffmengenaustrag einhält. Umgekehrt wird es im Regelfall so sein, dass ein Teiluntersuchungsraum, der $\overline{I_M} > 1$ erfüllt, in bestimmten Szenarien oder Parameterkombinationen den Stoffmengen- und Massenaustrag nicht einhält.

Beispiel 90: Zur Kennzahl $\overline{I_M}$

Fiktives Beispiel für die Kennzahl $\overline{I_M}$

$$\overline{I_M} = \frac{d_{min}}{\overline{d_{1Ma}}} = \frac{56\ m}{39\ m} = 1{,}4 \quad ✓$$

$$\overline{I_M} = \frac{d_{min}}{\overline{d_{1Ma}}} = \frac{56\ m}{75\ m} = 0{,}75 \quad ✗$$

Ein Wert von 1,4 bedeutet beispielsweise, dass die Mächtigkeit 1,4 mal größer ist als der Weg $\overline{d_{1Ma}}$, den die betrachteten Radionuklide im Bewertungszeitraum zurücklegen und für welchen Gesteinsbereiche außerhalb von $\overline{d_{1Ma}}$ das Massen- und Stoffmengenkriterium (vgl. § 4 EndlSiAnfV) eingehalten ist. Ein Wert von $\overline{I_M}$ kleiner als 1 sagt aus, dass die umlagernde

Fiktives Beispiel für die Kennzahl $\overline{I_M}$

Wirtsgesteinsschicht nicht ausreichend ist, um den Massen- und Stoffaustrag ausreichend zu verhindern und die Grenzwerte nach § 4 Abs. 5 EndlSiAnfV einzuhalten.

Für geeignete Teiluntersuchungsräume wird darüber hinaus die Streuung der Kennzahl um die bestmögliche Einschätzung berechnet.

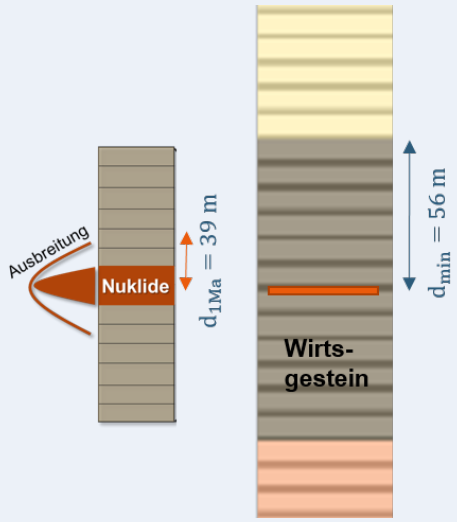


Abbildung 187: 1D geologischen Profils mit Radionuklidaustrag analog zur ersten Beispielrechnung

Für den zweiten Anspruch an die Berechnungen, den Gütevergleich zwischen geeigneten Bereichen, werden aufgrund der intrinsischen Ungewissheiten in den Parametern, die im Modell angenommen werden, eine Vielzahl von Simulationen für jedes repräsentative Profil anhand der im Kapitel 8.5.4 erläuterten Rechenfälle durchgeführt. Jede solche Simulation ergibt einen Wert für die Transportlänge d_{1Ma} und damit auch für I_M. Das Durchführen vieler Rechnungen erlaubt eine Schätzung der Verteilungsfunktion f_{I_M} der Größe I_M in Abhängigkeit von den Ungewissheiten bzw. den Entwicklungen.

Um ein Gebiet vergleichend zu bewerten, wird die Verteilungsfunktion f_{I_M} statistisch ausgewertet. Es wird die Kennzahl I_R definiert, die die Verteilungsfunktion in Hinblick auf den Einschluss der Radionuklide charakterisiert. Ein mögliches Vorgehen ist hierbei die Berechnung des Anteils P aller Rechenläufe, für die das Kriterium $I_M > 1$ erfüllt ist:

$$I_R = P(I_M > 1) \tag{4}$$

Mit:

I_R (-): Kennzahl zur Bewertung des sicheren Einschlusses bezüglich der zu erwartenden Entwicklungen

$P(I_M > 1)$ (-): Anteil der Rechenläufe für die gilt, dass $I_M > 1$ erfüllt ist

Die Kennzahl I_R geht als quantitative Hilfestellung in den sicherheitsgerichteten Diskurs ein und wird an dieser Stelle in den Kontext mit der jeweiligen Datenlage gebracht.

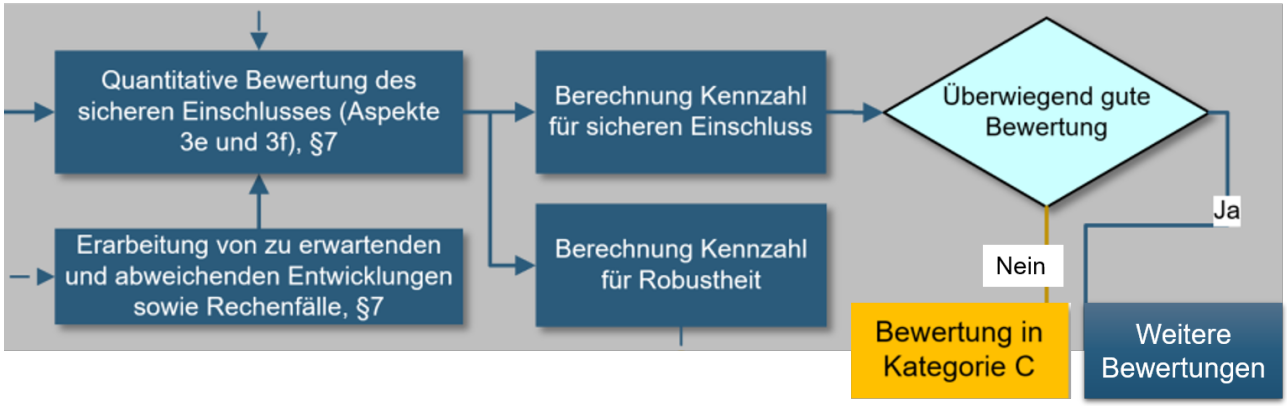


Abbildung 188: Ausschnitt aus dem Ablaufdiagramm der rvSU (Details siehe BGE (2022a))

8.5.4 Rechenfälle und Rechenläufe zur Bestimmung der Transportlänge $\mathbf{d_{1Ma}}$

Um eine Entwicklung in einen Rechenfall zu überführen, der durch einen Computer gerechnet werden kann, bedarf es dem Zwischenschritt der Abstraktion. In diesem Zwischenschritt wird der wissenschaftliche Zusammenhang, welcher innerhalb der Entwicklungen beschrieben wird, in ein Modell übersetzt (vgl. Röhlig et al. (2012, S. 43)). Dazu können u. a. bestimmte Vereinfachungen (z. B. Geometrie oder bestimmte realistische/konservative Annahmen) getroffen werden. Eine Entwicklung, welche in eine numerisch lesbare Struktur überführt wurde, wird „Rechenfall“ bezeichnet (Abbildung 189). Dabei kann eine Entwicklung durch einen oder auch durch mehrere Rechenfälle abgebildet werden. Die Methodik zur Identifikation der relevanten Prozesse und zur Ableitung von Entwicklungen und Rechenfällen für die Teiluntersuchungsräume wird in Kapitel 8.2 erläutert. Die Rechenfälle bilden somit vor allem die Ungewissheiten bezüglich der zukünftigen Entwicklungen des Endlagersystems ab, welche auch als Szenarienungewissheiten bezeichnet werden. Jeder Rechenfall besteht wiederum aus einem Modell mit dazugehörigen Annahmen und einer Vielzahl von Rechenläufen. Um verschiedene Modellannahmen zu prüfen, können auch unterschiedliche Rechenfälle erstellt werden, die zum Verständnis und zur Reduzierung von Modellungewissheiten beitragen können. Rechenläufe charakterisieren insbesondere die Daten- und Parameterungewissheiten. Die verschiedenen Ursachen und Kategorien von Ungewissheiten werden in Kapitel 10 näher beschrieben. Die Rechenläufe sind die konkreten Umsetzungen innerhalb des 1D-Transportmodells (siehe Kapitel 8.5.7.1 sowie Anhang 3). Im Folgenden wird die Herangehensweise zur Erarbeitung der Rechenläufe, welche sowohl Szenarien- als auch Daten- und Parameterungewissheiten berücksichtigen, beschrieben. Modellungewissheiten des 1D-Transportmodells werden in Kapitel 8.5.9 erläutert.

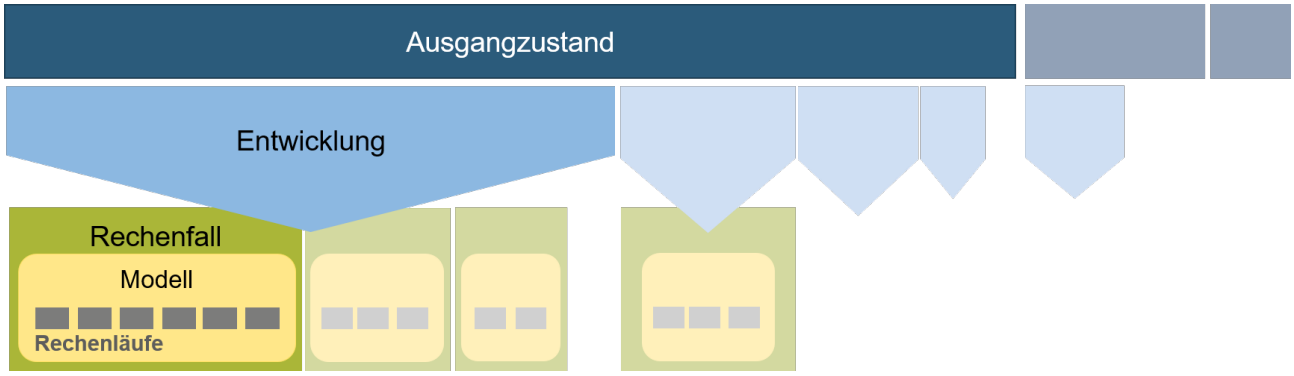


Abbildung 189: Schematische Darstellung des Zusammenhangs von Entwicklungen und Rechenfällen.
Ein Rechenfall oder mehrere Rechenfälle bilden die Überführung einer Entwicklung in eine rechnerisch umsetzbare und numerisch lesbare Struktur. Rechenfälle werden anhand von Modellen und entsprechender, damit verbundener Rechenläufe realisiert.

Bereits bei der Charakterisierung des Ausgangszustands des Endlagersystems (dem Zustand nach Verschluss des Endlagers) ergeben sich Ungewissheiten, die auf vielfältige Ursachen zurückzuführen sind. Einerseits können eingeschränkte Kenntnisse dadurch begründet sein, dass beispielsweise in der aktuellen Phase des Standortauswahlverfahrens noch keine Erkundungen durchgeführt wurden. Auf der anderen Seite unterliegen einige (zum Teil prinzipiell messbare) Größen einer natürlichen Variabilität, die sich auf die Ausprägungen der Modellparameter auswirken kann. Diese Ungewissheiten können als Daten- und Parameterungewissheiten zusammengefasst werden. Die wesentlichen Modellparameter (neben der Modellgeometrie) sind Porosität, Permeabilität, effektiver Diffusionskoeffizient und Sorptionskoeffizient (siehe Kapitel 8.5.5). Diese werden für jede geologische Einheit im Profil definiert. Weiterhin gehen in die Berechnungen Zerfallseigenschaften der Radionuklide ein. Für diese Parameter können Bandbreiten abgeschätzt werden, um die Daten- und Parameterungewissheiten zu berücksichtigen (siehe Kapitel 8.5.5 sowie Anhang 3). Diese Bandbreiten bilden die Grundlage für die Erstellung von Rechenläufen. Um die Ungewissheiten bezüglich zukünftiger Entwicklungen im Modell abbilden zu können, wird für jeden Parameter geprüft, wie dessen Werteverteilung oder Bandbreite sich aufgrund der einwirkenden Prozesse ändern kann. Basierend darauf werden die Bandbreiten und möglicherweise auch die Verteilungen der Parameter in Abhängigkeit der betrachteten Entwicklung geändert. Die Ungewissheiten, die hinsichtlich der Abstraktion der physikalischen Prozesse innerhalb des Transportmodells bestehen, werden in den Kapiteln 8.5.7.1 und 8.5.9 erläutert und diskutiert.

Bei der Erstellung der Rechenläufe wird in zwei Schritten vorgegangen (vgl. Abbildung 190):

1. Sensitivitätsanalyse der Modellparameter. Auf diese Weise wird die Anzahl der Parameterkombinationen verringert, indem sich auf die relevanten (sensitiven) Parameter fokussiert wird.
2. Monte-Carlo-Simulation (die vorläufig angestrebte Methode ist ein Latin Hypercube Sampling; vgl. Kapitel 8.5.4.1) zur Ermittlung von Parametersets und Durchführung der Rechenläufe.

Beide Schritte werden im Folgenden separat und aufeinander folgend erläutert.

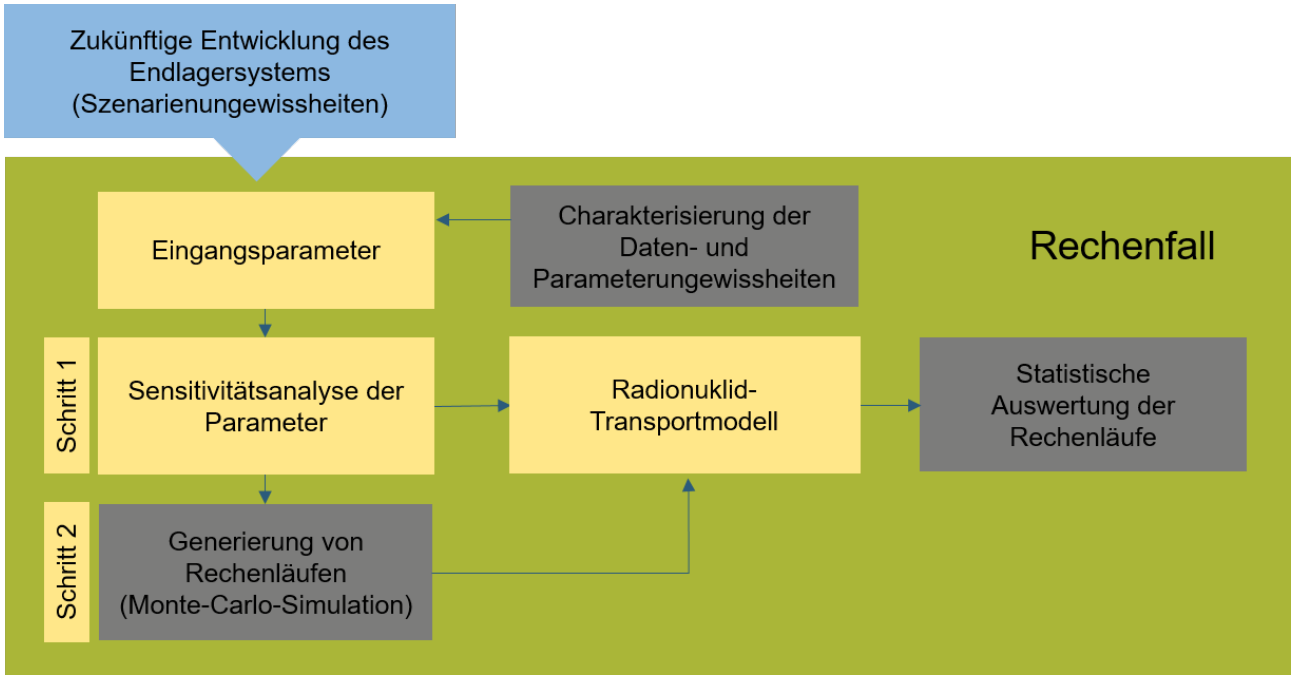


Abbildung 190: Arbeitsschritte zur Quantifizierung von Parameterungewissheiten innerhalb des Radionuklid-Transportmodells

8.5.4.1 Sensitivitätsanalyse der Modellparameter

Es existieren unterschiedliche Methoden zur Analyse von Parametersensitivitäten innerhalb numerischer Modelle. Lokale Sensitivitätsanalysen sind einfach umzusetzen, haben aber den Nachteil, dass sie Interaktionen einzelner Parameter nicht abbilden können und abhängig vom Evaluierungspunkt sind. Aus diesem Grund soll im Rahmen der rvSU auf globale Sensitivitätsanalysen für die Identifizierung der sensitiven Parameter des Radionuklid-Transportmodells zurückgegriffen werden. Für den hier dargestellten Zwischenstand der Methodenentwicklung wurde in einem ersten Schritt eine überschlägige Abschätzung der Parameter-Sensitivitäten auf Grundlage lokaler Analysen durchgeführt. Dafür wurden die nuklidspezifischen Parameter sukzessive ausgehend ihrer bestmöglichen Einschätzung (B.E.) exemplarisch um jeweils ein Prozent in sowohl positive als auch negative Richtung verändert. Die auf diesen Parameterwerten basierenden Transportlängen nach einer Million Jahren sind am Beispiel des Opalinustons (für das in Abbildung 198 dargestellte Profil) in Abbildung 191 und Abbildung 192 für die Diffusionsparameter und in Abbildung 193 für die Sorptionskoeffizienten dargestellt (siehe Beispiel 91). Es werden in den Abbildungen nicht die absoluten Transportlängen, sondern die Abweichung der Transportlängen zur berechneten Transportlänge basierend auf der bestmöglichen Einschätzung (B.E.) der Parameter in der Einheit [m] dargestellt.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

Beispiel 91: Zur Durchführung einer lokalen Sensitivitätsanalyse für den Opalinuston für das in Abbildung 198 dargestellte Profil

Lokale Sensitivitätsanalyse im Tongestein (am Beispiel des Opalinustons)

Für eine erste überschlägige Abschätzung der Nuklidparameter-Sensitivitäten wurde für das Opalinuston-Profil exemplarisch eine lokale Sensitivitätsanalyse auf Grundlage des 1D-Transportmodells durchgeführt. Alle nuklidspezifischen Parameter wurden sukzessive um ein Prozent ihres ursprünglichen Wertes (bestmögliche Einschätzung; B.E.) in beide Richtungen ausgelenkt. Die daraus hervorgehende veränderte Transportlänge ist in Abbildung 191 und Abbildung 192 für die Diffusionsparameter und in Abbildung 193 für die Sorptionsparameter für jedes Nuklid dargestellt. Die veränderte Transportlänge ist die berechnete Differenz zur Transportlänge des Rechenlaufs basierend auf den unveränderten Parametern der bestmöglichen Einschätzung.

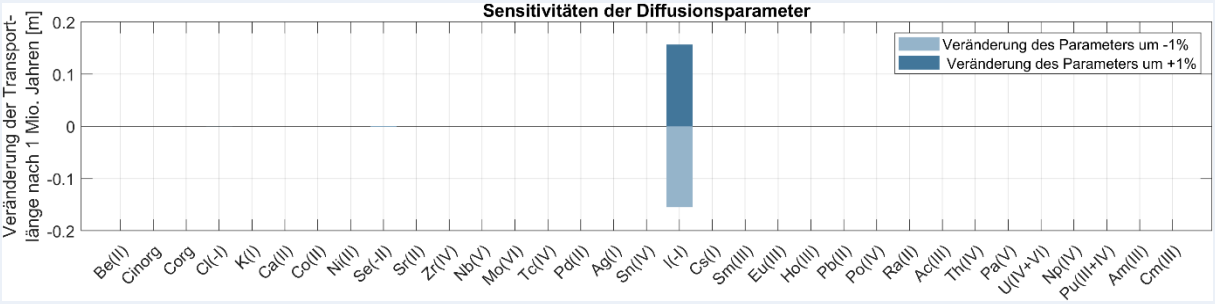


Abbildung 191: Exemplarische Sensitivitätsanalyse der Diffusionsparameter innerhalb des 1D-Radionuklidmodells.
Die y-Achse stellt die Veränderung der Transportlänge ausgehend von einer einprozentigen Änderung des jeweiligen Nuklids dar. Die Referenztransportlänge wurde ausgehend von der bestmöglichen Einschätzung (B.E.) der Parameter ermittelt.

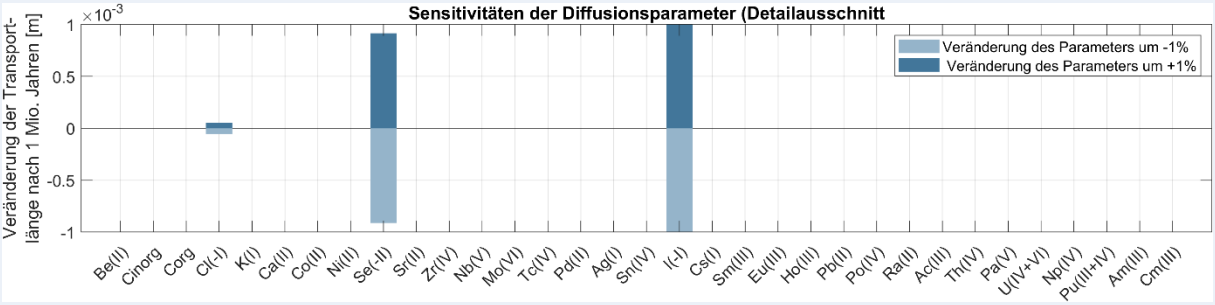


Abbildung 192: Detailausschnitt aus Abbildung 191 (man beachte die Skalierung der y-Achse)

Lokale Sensitivitätsanalyse im Tongestein (am Beispiel des Opalinustons)

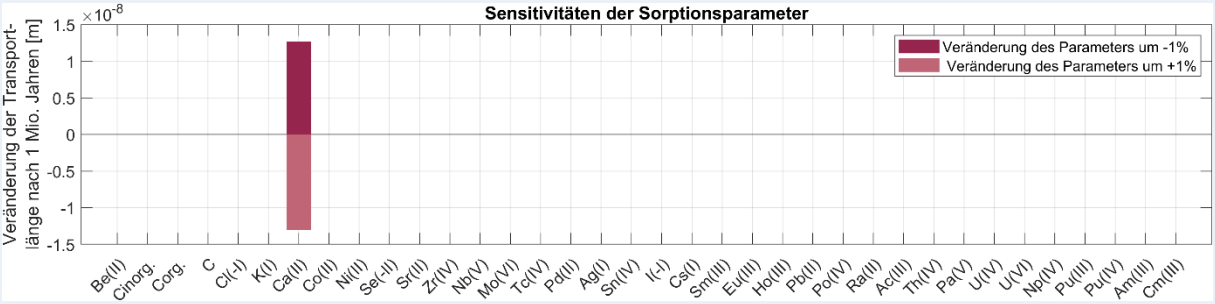


Abbildung 193: Exemplarische Sensitivitätsanalyse der nuklidspezifischen Sorptionsparameter innerhalb des 1D-Radionuklidmodells.
Die y-Achse stellt die Veränderung der Transportlänge ausgehend von einer einprozentigen Änderung des jeweiligen Nuklids dar. Die Referenztransportlänge wurde ausgehend von der bestmöglichen Einschätzung (B.E.) der Parameter ermittelt.

Die vorläufigen Sensitivitätsanalysen decken sich mit den Erwartungen des Transportverhaltens kaum sorbierender Elemente (Anionen) wie Iod, Selen und Chlor in Tongesteinen. Die höhere Sensitivität der Diffusionskonstante für Iod gegenüber Selen und Chlor kann durch die deutlich höhere Stoffmenge im Radionuklidinventar (Larue et al. 2013) erklärt werden.

8.5.4.2 Monte-Carlo-Simulationen

Mit dem Ziel der Methodenentwicklung werden ausgehend von den in Abbildung 191, Abbildung 192 und Abbildung 193 dargestellten exemplarischen Sensitivitätsuntersuchungen Monte-Carlo-Simulationen durchgeführt. Ziel der Monte-Carlo Simulationen ist die Berechnung der Transportlängen der Rechenläufe und damit der Berechnung der Kennzahlen I_M und I_R (siehe Kapitel 8.5.3). Für die Rechenläufe wurden einerseits die zuvor ermittelten sensitiven Parameter in die Monte-Carlo-Simulation einbezogen; zusätzlich wurden die Parameter berücksichtigt, die eine große Bandbreite innerhalb der Gesteinsformationen aufweisen (vgl. Anhang 4). Bei den Sorptionskoeffizienten wurden außerdem Parameter berücksichtigt, die zwar geringe Bandbreiten aufweisen, aber deren Wertebereich zwischen Null und oberhalb von Null liegt. Die nuklidspezifischen Parameter, die exemplarisch variiert wurden, sind in Tabelle 73 dargestellt. Die übrigen Nuklidparameter wurden auf ihrer bestmöglichen Einschätzung (B.E.) fixiert.

Tabelle 73 Parameter, die für die aufgelisteten Nuklide variiert wurden

Effektiver Diffusionskoeffizient	Sorptionskoeffizient
Cl, K, Ca, Se, Sr, Ag, I, Cs, Ra	Ca, Zr, Pd, Sm, Pb, Ac, Th, Pu, Am, Cm

Für die Durchführung der Monte-Carlo-Simulationen ist es erforderlich, eine a priori-Verteilung der Eingangsparameter festzulegen. Weil zum gegenwärtigen Zeitpunkt innerhalb der rvSU keine konkrete Aussage zu den nuklidspezifischen Parameterverteilungen getroffen werden kann, wurde zur Methodenüberprüfung eine logarithmische Gleichverteilung der Parameter innerhalb der Bandbreiten angenommen. Mit zunehmendem Detaillierungsgrad und Kenntnisgewinn im Laufe des Verfahrens können diese Verteilungen angepasst werden. Für eine konservative Abschätzung ist es zusätzlich vorstellbar, für jeden Parameter neben der bestmöglichen Einschätzung (B.E.) einen Wert für den ungünstigsten anzunehmenden Fall festzulegen.

Um die Kombinationen der individuellen Parameterbandbreiten durch die Rechenläufe abzudecken, werden geeignete Stichprobenverfahren evaluiert. Es wird vorrausichtlich das Latin Hypercube Sampling (LHS) angewendet. Im Gegensatz zu klassischen Monte-Carlo-Simulationen kann dieses Verfahren auch für eine Vielzahl von Parameterkombinationen effizient eingesetzt werden (McKay et al. 1979).

Beispiel 92: Zur Durchführung vorläufiger Monte-Carlo-Simulationen für den Opalinuston für das in Abbildung 198 dargestellte Profil

Vorläufige Monte-Carlo-Simulationen im Tongestein (am Beispiel des Opalinustons)

Für die im Zuge der vorangegangenen Schritte als relevant eingestuften nuklidspezifischen Parameter werden auf Grundlage von Monte-Carlo-Simulationen die Bandbreiten der Transportlängen ermittelt. Für eine erste exemplarische Durchführung wurden die in Tabelle 73 aufgelisteten Parameter für das Stichprobenverfahren verwendet. Jeder Parameter wurde innerhalb seiner ermittelten Bandbreiten (vgl. Kapitel 8.5.5) logarithmisch gleichverteilt variiert. Die übrigen Parameter wurden auf bestmöglichen Einschätzungen festgehalten. Auf diese Weise wurden exemplarisch insgesamt 1000 Rechenläufe generiert, die zur Berechnung der Transportlängen innerhalb des Radionuklid-Modells herangezogen wurden. Für die Quantifizierung der Kennzahlen (vgl. Kapitel 8.5.3) erfolgt eine statistische Auswertung der 1000 berechneten Transportlängen. Für jeden der durchgeführten Rechenläufe eines Rechenfalls wird die Kennzahl I_M ermittelt. Darauf aufbauend wird die Kennzahl I_R berechnet. In Tabelle 75 sind die Kennzahlen für den beschriebenen Rechenfall dargestellt. Die Kennzahl I_R beschreibt den Anteil der Rechenläufe, für die $I_M > 1$ gilt. Mit dieser Vorgehensweise können unterschiedliche Gebiete vor dem Hintergrund der Parameterungewissheiten vergleichend bewertet werden. Die optimale Anzahl der durchzuführenden Rechenläufe für eine zuverlässige Abschätzung der Kennzahl I_R wird im Laufe der weiteren Schritte in der Methodenentwicklung ermittelt.

Neben der quantitativen Berechnung der Kennzahlen sind die berechneten Transportlängen des beschriebenen Rechenfalls mit 1000 Rechenläufen als Box-Whisker-Plot in Abbildung 206 dargestellt (die linke Box).

Die Beispielrechnungen für den Opalinuston haben gezeigt, dass der Diffusionskoeffizient des Elements Iod im Transportmodell die Transportlänge dominiert. Aus diesem Grund wurden

Vorläufige Monte-Carlo-Simulationen im Tongestein (am Beispiel des Opalinustons)

vereinfachte Rechenfälle generiert, die vorläufig ausschließlich die Bandbreiten des Elements Iod berücksichtigen. Die Parameter der übrigen Elemente wurden auf den Wert der bestmöglichen Einschätzung (B.E.) festgehalten. Auf diese Weise wurden weitere 1000 Rechenfälle generiert und ebenfalls in Abbildung 206 als Box-Whisker-Plot dargestellt (die zweite Box). Es zeigt sich, dass die Verteilungen der berechneten Transportlängen der beiden Rechenfälle qualitativ sehr ähnlich zueinander sind. Mit dem Ziel der Methodenentwicklung wurden aus Gründen der Effizienz weitere, zunächst vorläufige Monte-Carlo-Simulation ausschließlich unter Variation des Diffusionskoeffizienten für Iod durchgeführt.

Weil in einigen Rechenläufen der genannten Rechenfälle die Transportlänge länger als d_{min} ist, wurden in einer weiteren Monte-Carlo-Simulation die Diffusionskoeffizienten für Iod für die anderen Schichten ebenfalls entsprechend ihrer Bandbreiten logarithmisch gleichverteilt variiert. Dieser Rechenfall wird durch die dritte Box des Box-Whisker Plots abgebildet (vgl. Abbildung 206).

Weiterhin wurden fiktive Rechenfälle generiert, die zum aktuellen Stand ursächlich nicht explizit einer Entwicklung zugeordnet werden können. Die entsprechenden Beschreibungen und Erläuterungen werden nachfolgend zusammenfassend aufgezählt:

1. Variation der sensitiven nuklidspezifischen Parameter und der Parameter mit einer hohen Bandbreite für den Opalinuston (für die Überdeckung wurden die Parameter jeweils konstant auf ihrer bestmöglichen Einschätzung festgehalten). (1000 Rechenläufe)
2. Variation des Diffusionsparameters für Iod für den Opalinuston (für die Überdeckung wurden die Parameter jeweils konstant auf ihrer bestmöglichen Einschätzung festgehalten). (1000 Rechenläufe)
3. Variation des Diffusionsparameters für Iod für den Opalinuston und alle anderen Schichten innerhalb der jeweiligen Bandbreiten. (1000 Rechenläufe)
4. Fiktiver Rechenfall (SZ1), dem z. B. ein Entwicklungsszenario zugrunde gelegt sein kann. Die Bandbreiten des effektiven Diffusionskoeffizienten für Iod wurden um 50 % der jeweiligen Minimalwerte erhöht. (1000 Rechenläufe)
5. Fiktiver Rechenfall (SZ2), dem z. B. ein Entwicklungsszenario zugrunde gelegt sein kann. Die Bandbreiten des effektiven Diffusionskoeffizienten für Iod wurden um 5 % verringert, indem die Minimalwerte jeweils entsprechend erhöht wurden. (1000 Rechenläufe)

Auf die möglichen Ursachen der hier dargestellten Entwicklungen wird an dieser Stelle nicht eingegangen, weil sie ausschließlich Rechenbeispiele darstellen. Im Rahmen der rvSU sind

Vorläufige Monte-Carlo-Simulationen im Tongestein (am Beispiel des Opalinustons)

die in Kapitel 8.2 dargelegten Entwicklungen in Rechenfälle und deren Auswirkungen auf die Parametrisierungen zu überführen.

8.5.5 Arbeitsablauf zur Bestimmung von Modellparameterwerten und Bandbreiten

Der Transport von Radionukliden wird in erster Linie durch vier Parameter gesteuert:

- **Durchlässigkeitsbeiwerte k_f** [m/s] bzw. **Permeabilitäten K** [m²] des Wirts- und Nebengesteins sind ein Maß dafür, wie leicht Fluide ein Gestein durchdringen können (advektiver Fluss): typischerweise führen höhere Werte zu stärkerem advektiven Transport.
- **Diffusionskoeffizienten** [m^2/s] geben an, in welchem Maße ein diffusiver Transport durch den Porenraum stattfindet und sind im Allgemeinen sowohl vom Gestein als auch vom betrachteten Nuklid abhängig: typischerweise führen höhere Werte stärkerem diffusivem Transport.
- **Sorptionskoeffizienten** [m^3/kg] beschreiben die Rückhalte- oder Retentionsfähigkeit von Radionukliden und sind stark vom betrachtetem Gestein und Nuklid abhängig. Höhere Werte behindern sowohl den diffusiven als auch den advektiven Transport stärker.
- **Porositäten** [-] der Wirts- und Nebengesteine geben den Volumenanteil von Hohlräumen im Gestein an: typischerweise führen höhere Porositäten zu stärkerem Transport.

Für Porosität und Permeabilität liegen teilweise gebietsspezifische Daten oder Daten aus ähnlichen geologischen Formationen vor. Es ist jedoch unwahrscheinlich, dass standortspezifische Daten für Diffusions- und Sorptionskoeffizienten verfügbar sind. Die Diffusions- und Sorptionskoeffizienten variieren von Nuklid zu Nuklid, und Daten sind nur für eine kleine Anzahl von Nukliden und Lithologien verfügbar. Dennoch können Schätzungen für beide Parameter und ihrer Ungewissheitsbandbreiten durch die Kombination von verfügbaren Daten und Modellen ermittelt werden, wie beispielsweise von Van Loon (2014) und Baeyens et al. (2014) gezeigt. Der Arbeitsablauf, der zur Quantifizierung von Diffusions- und Sorptionskoeffizienten sowie ihrer Ungewissheiten für die rvSU geplant ist, basiert auf diesen beiden Veröffentlichungen und wird im Folgenden zusammengefasst. Details zur beschriebenen Methode befinden sich im Anhang (Anhang 4).

Der Sorptionskoeffizient hängt vom Nuklid, der Mineralogie und der Zusammensetzung des Porenwassers ab. Die Sorption erfolgt durch zwei Hauptprozesse: Kationenaustausch und Oberflächenkomplexierung. Bradbury et al. (2010) haben die vorhandene Literatur über die Kationenaustauschkapazität und Oberflächenkomplexierung zusammengestellt und kommen zu dem Schluss, dass in den meisten Sedimentgesteinen das Sorptionsverhalten von Tonmineralen aufgrund ihrer großen spezifischen Oberfläche und Kationenaustauschkapazität dominiert wird. Eine Ausnahme bilden Karbonate, die frei von Tonmineralien sein können, aber dennoch Sorption aufweisen. Darüber hinaus wurde festgestellt, dass das Sorptionsverhalten von 2 : 1-Tontypen, zu denen neben Illit

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

auch der weit verbreitete Smektit-Ton gehört, ähnlich ist. Jedoch ist im direkten Vergleich die Kationenaustauschkapazität von Smektiten sehr viel höher als die von Illiten (Bracke et al. 2019). Die übrigen Tonarten, einschließlich Kaolinit und Chlorit, weisen geringere Oberflächen und Kationenaustauschkapazitäten auf und daher kann davon ausgegangen werden, dass diese nicht wesentlich zur Gesamtsorptionskapazität beitragen. Daher wird dem Ansatz von Bradbury et al. (2010) gefolgt und es werden die Sorptionsdaten für Illit zur Abschätzung der Gesamtsorption von tonhaltigem Gestein verwendet. Bradbury et al. (2010) und Baeyens et al. (2014) verwenden eine Kombination von Modellen und experimentellen Daten, um die Sorptionskoeffizienten für Illit und Kalzit für verschiedene Porenwasserzusammensetzungen abzuleiten. Es wurde festgestellt, dass der Sorptionskoeffizient in der geologischen Formation linear mit dem Gehalt an Illit und Kalzit in der Formation variiert.

Die in Baeyens et al. (2014) beschriebenen bestmöglichen Schätzwerte (englisch: „best estimate“) sowie minimalen und maximalen Werte des Sorptionskoeffizienten für jedes Nuklid und jede der drei Mineralarten werden zur Schätzung dieses Parameters verwendet. Für den aktuellen Arbeitsablauf wurden die bestmöglichen Einschätzungen des Tongehalts und des Kalzitgehalts aus dem Parameterkatalog des Opalinustons entnommen (vgl. Kapitel 5.7.6), dessen Werte auf der Analyse von Informationen aus Bohrungen basieren. Die Verteilung der Tonarten in diesen Formationen wurde aus veröffentlichten mineralogischen Daten in diesen Formationen geschätzt.

Für Folgearbeiten sind bestmögliche Einschätzungen des Ton- und Kalzitgehalts für andere Gebiete aus Kerndaten, Bohrlochdaten oder Beschreibungen von Aufschlüssen abzuleiten. Für den prozentualen Anteil der 2:1-Tone gibt es nur wenige standortspezifische Daten. Daher wird angestrebt, Schätzungen zu verwenden, die auf Datenerhebungen zur Tonmineralogie in Deutschland und in ähnlichen lithologischen Einheiten beruhen. Die Sorptionswerte werden auch an Porenwasserzusammensetzungen angepasst, die die im deutschen Untergrund beobachtete Variabilität abdecken, wobei ein Modell ähnlich wie bei Baeyens et al. (2014) verwendet wird.

Der effektive Diffusionskoeffizient von Nukliden hängt von einer Reihe von Faktoren ab, darunter der Temperatur, der Porosität und der Tortuosität. Die Berechnung des effektiven Diffusionskoeffizienten folgt weitgehend einem von Van Loon (2014) vorgeschlagenen Arbeitsablauf. Geringfügige Anpassungen wurden vorgenommen, um diesen Arbeitsablauf allgemeiner anwendbar zu machen. Der Arbeitsablauf ist hier zusammengefasst und wird im Anhang 4 ausführlicher beschrieben.

Der Arbeitsablauf zur Schätzung des effektiven Diffusionskoeffizienten beginnt mit den von Li & Gregory (1974) angegebenen Werten für die Diffusion von Nukliden in Wasser. Diese werden mithilfe einer Gleichung von Simpson & Carr (1958) um die geschätzte Temperatur in der Tiefe und den Salzgehalt korrigiert. Der effektive Diffusionskoeffizient wird stark von der Porosität und der Tortuosität beeinflusst. Dazu werden empirische Gleichungen verwendet, die die Tortuosität mit der Porosität in Beziehung setzen und die für Tonformationen gelten (Van Loon 2014). Für nicht tonhaltiges Gestein werden als erste Schätzung die theoretischen Gleichungen von Weissberg (1963) verwendet. Die zugängliche Porosität für Anionen ist in Tonen aufgrund der elektrischen Ladung der Tonminerale reduziert. Hierzu wird ein festes Verhältnis von zugänglicher zu gesamter Porosität von 0,45 verwendet, mit einer Ungewissheitsbandbreite von 0,3 bis 0,6, basierend auf Daten von Xiang

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

et al. (2013) und Van Loon (2014). Schließlich wird der effektive Diffusionskoeffizient für eine Reihe von Kationen angepasst, die diffusiv transportiert werden können, während sie an der Mineraloberfläche von Tonen gebunden sind. Die Diffusion an Mineraloberflächen wird nicht direkt modelliert, stattdessen wird der effektive Diffusionskoeffizient für die Diffusion im Porenwasser erhöht, um diesem Effekt Rechnung zu tragen. Die Anpassung des effektiven Diffusionskoeffizienten folgt den Gleichungen von Gimmi & Kosakowski (2011).

Der Arbeitsablauf zur Berechnung des effektiven Diffusionskoeffizienten erfordert Porosität und Temperatur als Eingabedaten, für die in den meisten Fällen standortspezifische Daten verfügbar sind oder für die guten Schätzungen vorgenommen werden können. Der Parameter mit größten Ungewissheit in diesem Arbeitsablauf ist die Tortuosität. Die empirische Beziehung zwischen Porosität und Tortuosität ist für Tone relativ gut etabliert, aber die Schätzung der Tortuosität und die Anwendbarkeit theoretischer Modelle in nicht-tonhaltigen Formationen müssen noch bewertet werden. Außerdem kam Van Loon (2014) zu dem Schluss, dass der Diffusionskoeffizient nicht von der Zusammensetzung des Porenwassers abhängt. Angesichts der zum Teil widersprüchlichen Ergebnisse in der Literatur muss diese Annahme jedoch überprüft werden.

Für den hier vorgelegten Arbeitsstand werden jeweils die B.E.-Werte für die Sorptionskoeffizienten unter Annahme der Porenwasserzusammensetzung für den von der Nagra untersuchten Opalinuston verwendet (siehe Kapitel 5.7.1 und Abbildung 140). Für die Diffusionskoeffizienten ergeben sich die bestmöglichen Schätzwerte aus der bestmöglichen Einschätzung von Porosität und Teufe.

8.5.6 Die Bestimmung des minimalen Abstands d_{min}

8.5.6.1 Allgemeines Vorgehen

Je nach Konfiguration ist die Raumrichtung, in die sich der minimale Abstand d_{min} zwischen dem Rand des Wirtsgesteins und dem Rand des Endlagers ergibt, unterschiedlich. So kann der minimale Abstand in der Vertikalen auftreten, aber auch in der Horizontalen (siehe Abbildung 194) oder in einer beliebigen anderen Richtung. Insbesondere, wenn das das potenzielle Endlager innerhalb einer lateral stark ausgedehnten Schicht mit begrenzter Mächtigkeit liegt, wird der minimale Abstand mit dem vertikalen Abstand zum Hangenden oder Liegenden erreicht. In komplexeren Geometrien oder bei bekannten richtungsabhängigen Verteilungen der Eigenschaften werden Abweichungen davon erwartet.

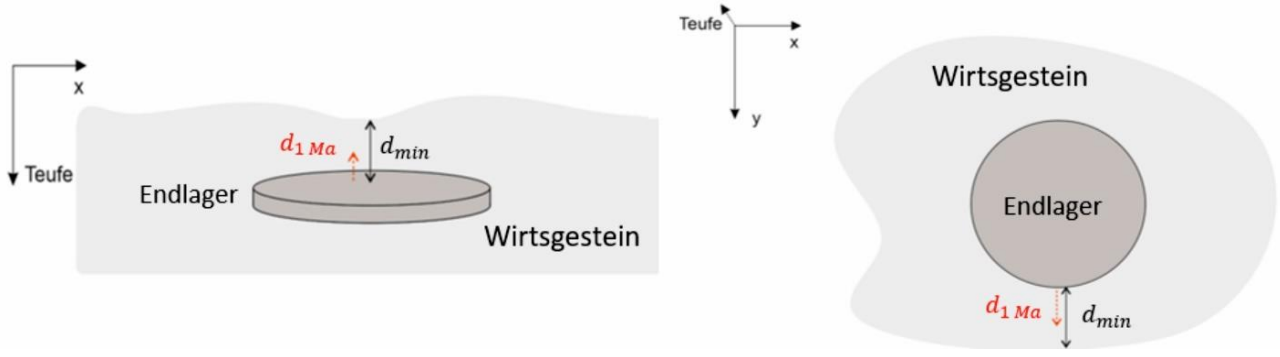


Abbildung 194: Mögliche Varianten für die Ermittlung des minimalen Abstands d_{min}

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

Für die genaue Bestimmung der minimalen Mächtigkeit ist es neben der Abgrenzung des Wirtsgesteins erforderlich, die Lage und Geometrie des Endlagers zu kennen. Da in dieser Phase des Standortauswahlverfahrens eine vorläufige Endlagerauslegung erfolgt (vgl. Kapitel 4.2), sind zur Lage und Geometrie vereinfachende Annahmen zu treffen. Entsprechend wird das Endlager zentral im Wirtsgestein platziert. Die Auflockerungszone um das Endlager wird für die Transportberechnung nicht mitbetrachtet. Es ergibt sich der minimale Abstand aus der geringsten horizontalen Distanz zwischen dem Rand des Endlagers und dem Rand des Wirtsgesteins. In vertikaler Richtung wird der minimale Abstand $d_{\min}$ wie folgt berechnet:

$$d_{\min} = \frac{M_{WG}}{2} - \frac{l}{2} \tag{5}$$

Mit:

M_{WG} (m): Mächtigkeit des Wirtsgesteins

l (m): Ausdehnung des Endlagers in der jeweiligen Richtung

Falls sich die minimale Mächtigkeit in vertikaler Richtung ergibt, entspricht die Ausdehnung des Endlagers der Höhe des Endlagers. Im horizontalen Fall entspricht die Ausdehnung des Endlagers der lateralen Erstreckung, beispielsweise bei einem quadratischen Grundriss des Endlagers also der Kantenlänge. Entsprechend wird zur Ermittlung ggf. die zweidimensionale Grundfläche des Endlagers benötigt, welche aus Kapitel 4.2 hervorgeht.

Für Tongestein und Steinsalz in stratiformer Lagerung ist hier ein Rechteck oder eine Kreisform mit dem teufenabhängigen Flächenbedarf ausreichend (Kapitel 4.2). Es ist anzunehmen, dass die exakte Form der Grundfläche keinen Einfluss auf $d_{\min}$ hat, da der minimale Abstand für lateral ausgedehnte Wirtsgesteine ohnehin in der Vertikalen liegt (eine Ausnahme könnte vorliegen, falls der untersuchte Bereich durch Störungen o. ä. lateral begrenzt ist). Für Steinsalz in steiler Lagerung ist eine gesonderte Betrachtung notwendig.

8.5.6.2 Besonderheiten für Steinsalz in steiler Lagerung

Anders als bei Tongestein oder Steinsalz in flacher Lagerung ist es bei Steinsalz in steiler Lagerung wahrscheinlich, dass sich der minimale Abstand nicht in vertikaler Richtung befindet. Ausschlaggebend sind auch hier die Lage und die Geometrie des potenziellen Endlagers. Beides ist abhängig vom Internbau eines Salzstockes. Dieser bestimmt, wo sich die für die Endlagerung zu favorisierenden, homogenen, möglichst reinen Steinsalzbereiche befinden (z. B. die Staßfurtfolge z2). Da zum aktuellen Zeitpunkt nur bedingt belastbare Aussagen bezüglich des Internbaus gemacht werden können, werden im Hinblick auf die Lage und Geometrie des Endlagers ebenfalls Vereinfachungen vorgenommen. Die zu favorisierenden Bereiche befinden sich aufgrund der Genese im Allgemeinen im Zentrum, sozusagen im oder über dem Stiel der Diapirstruktur. Hingegen befinden sich die nicht favorisierten Bereiche (z. B. die Leine-Folge, z3, und die Aller-Folge, z4) an den Rändern und auch vermehrt in den Überhängen der Salzstruktur. Daher wird die Annahme getroffen, dass sich der Einlagerungsbereich zentral über dem Stiel der Struktur befindet. Dazu werden zur Positionierung

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

zunächst die Überhänge im geologischen 3D-Modell ausgeschlossen und dann das Zentrum bestimmt (Abbildung 195). An dieser Stelle wird das Endlager positioniert. Hierfür ist relevant, ob das potenzielle Endlager ein- oder mehrsohlig aufgebaut ist, denn dies bestimmt die laterale Ausdehnung des Endlagers. Die genaue Positionierung innerhalb des ermittelten zentralen Bereichs kann dann mithilfe eines Optimierungsalgorithmus vorgenommen werden, mit dem Ziel die minimale Mächtigkeit unter den gegebenen Bedingungen zu maximieren (siehe Beispiel 93).

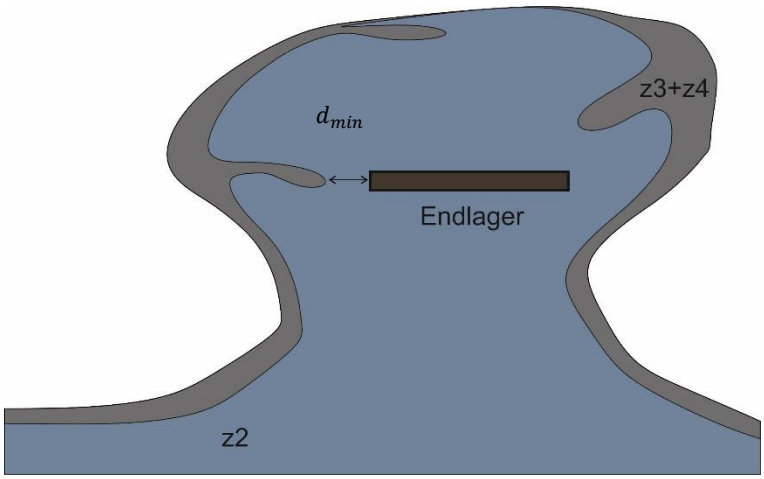


Abbildung 195: Positionierung des Endlagers in einer fiktiven steilstehenden Salzstruktur

Beispiel 93: Zur Positionsoptimierung eines hypothetischen Einlagerungsbereichs für den Salzstock Bahlburg

Positionsoptimierung eines hypothetischen Einlagerungsbereichs für den Salzstock Bahlburg

Im Beispiel 30 des Kapitel 4.2.10 wurde gezeigt, wie aus technischer Sicht ein Endlager im Salzstock Bahlburg realisiert werden kann. Im folgenden Beispiel geht es um die Optimierung der Position im Raum. Der Positionierung wurde ein fiktiver homogener Internbau zu Grunde gelegt. Die Berücksichtigung eines komplexeren Internbaus ist technisch möglich.

Der Flächenbedarf des Endlagers variiert mit der Teufenlage (vgl. Kapitel 4.2.8.7). Für die erste exemplarische Berechnung der optimalen Position des Endlagers wurde sehr vereinfacht ein pauschaler thermischer Gradient von 0,03 °C/m verwendet. Dieser pauschale Temperaturansatz wird in der Weiterentwicklung der Methodik detailliert. Die Abstufungen zwischen den einzelnen Teufenlagen wurden interpoliert[24]. Das Seitenverhältnis zwischen Länge und Breite wurde exemplarisch aus einer pauschalen, vorläufigen Quader-Approximation für die Umhüllende eines potenziellen Endlagerbergwerks (nur Einlagerungsbereich) für Salz ermittelt und konstant gehalten. Die Höhe des Endlagers wurde zunächst für alle Teufen auf 10 m pauschal festgehalten. Der Infrastrukturbereich wurde bei der Optimierung der Position nicht

[24] Funktion „Polynomial curve fitting“, MATLAB

Positionsoptimierung eines hypothetischen Einlagerungsbereichs für den Salzstock Bahlburg

berücksichtigt. Aus diesem Grund wird von den vorgegebenen vorläufigen Flächenbedarfsprognosen (vgl. Kapitel 4.2.8.7) die Fläche des Infrastrukturbereichs von pauschal 250000 m^2 abgezogen .

Die Zielfunktion der 3D-Positionsoptimierung umfasst die Abweichungen zweier im Raum verorteter Objekte: die Umhüllende des Teilgebiets als 3D-Punktewolke (xyz-Koordinaten) und die zu optimierenden acht Eckpunkte des Endlagers (ebenfalls xyz-Koordinaten). Im ersten Schritt werden die Eckpunkte des Endlagers auf Grundlage der Teufenlage der Unterkante in Abhängigkeit der vorläufigen Flächenbedarfsprognose (vgl. Kapitel 4.2.8.7) und des konstanten Länge/Breiten-Verhältnisses berechnet. Andere Festlegungen sind möglich. Die Lageparameter sind die x- und y-Koordinaten für den ersten Punkt und ein Drehwinkel (Azimut). Für jede vorgegebene Teufenlage kann auf diese Weise die optimale Position des Endlagers ermittelt werden. Dafür werden alle relevanten Umhüllungspunkte des Teilgebiets in Abhängigkeit von der betrachteten Teufenlage isoliert. Als relevant wurden alle Punkte des Teilgebiets in derselben Höhenlage des Endlagers plus einem zusätzlichen Höhenpuffer gesehen (die Wahl der relevanten Punkte ist stark abhängig von der Form des betrachteten Teilgebiets und der Anzahl und Verteilung der zur Verfügung stehenden Umhüllungspunkte). Für jeden relevanten Umhüllungspunkt des Teilgebiets wird die kürzeste Distanz zu einer Kante oder einem Eckpunkt des Endlagers identifiziert und berechnet (euklidische Norm). Für das Aufstellen der Zielfunktion werden alle Distanzen quadriert und aufsummiert. Die Zielfunktion wird unter Verwendung eines geeigneten Optimierungsalgorithmus minimiert. Optimierungsparameter sind die x- und y-Position des ersten Endlagerpunktes sowie der Azimutwinkel. Als Optimierungsverfahren wurde in diesem Beispiel auf das ableitungsfreie Downhill-Simplex-Verfahren nach Nelder & Mead (1965) zurückgegriffen. Das Verfahren konvergierte für das beschriebene Beispiel für unterschiedliche Startwerte zuverlässig. Der Einsatz anderer (globaler) Verfahren ist möglich.

Mit der beschriebenen Vorgehensweise können für jede Höhenlage die summierten Abstandsdistanzen ermittelt und gegenübergestellt werden.

Abbildung 196 und Abbildung 197 zeigen exemplarisch die optimierte Lage eines Einlagerungsbereichs (orange) innerhalb des Teilgebiets (grün). Zur besseren Kenntlichmachung werden zwei Perspektiven gezeigt.

Der exemplarisch zur Illustration des Algorithmus betrachtete Einlagerungsbereich wird in einer Teufenlage zwischen -990 m NN und -1 000 m NN angenommen. In dieser Teufe besteht ein Flächenbedarf von größer 2 km^2 (siehe Kapitel 4.2.8.7), der Einlagerungsbereichs ist hier mit einer Länge von 3950 m und einer Breite von 548 m angelegt (zzgl. des Infrastrukturbereiches, nicht dargestellt). Das Teilgebiet hat in dieser Teufe mit einer Gesamtlänge von

Positionsoptimierung eines hypothetischen Einlagerungsbereichs für den Salzstock Bahlburg

ca. 8700 m und einer Breite von ca. 2550 m eine ausreichende Ausdehnung, um das Endlager aufzunehmen.

Bei dieser Darstellung geht es ausschließlich um die Erläuterung des Optimierungsalgorithmus der Positionierung. Die aktuellen Überlegungen bezüglich der Endlagerauslegung sind in Kapitel 4.2 dargestellt.

Weiterhin in den Abbildungen gezeigt ist die Salzstruktur, welche das Teilgebiet beinhaltet (weiß, transparent). Dieses setzt sich unterhalb des Teilgebiets bis in eine Teufenlage von ca -4000 m NN fort.

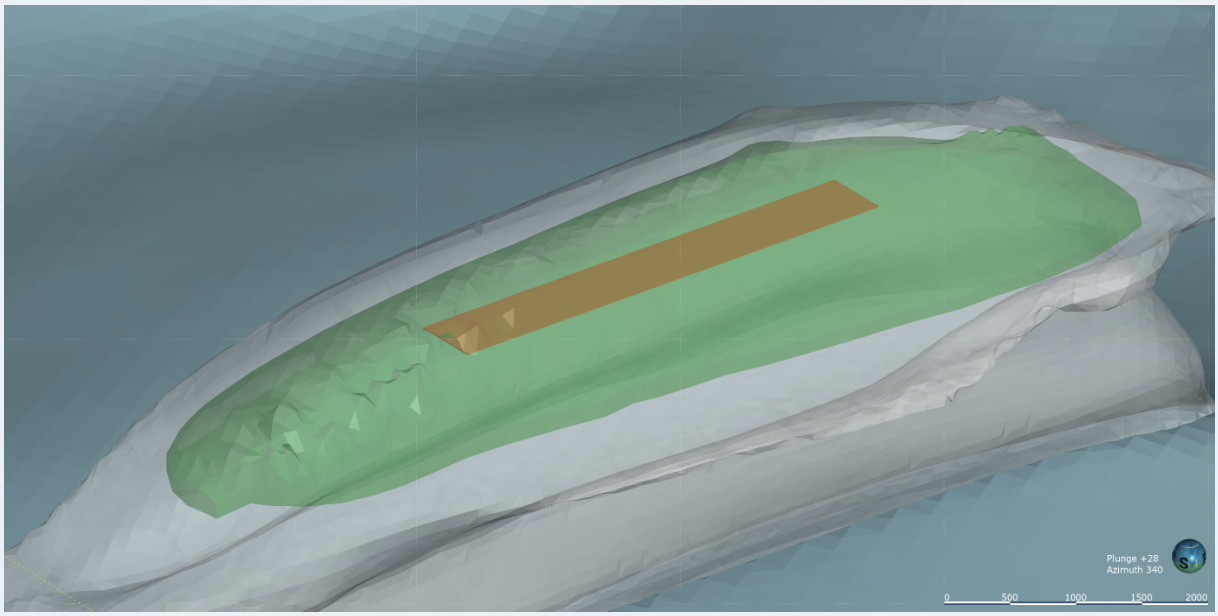


Abbildung 196: Teilgebiet Bahlburg (grün) mit hypothetischen Endlagerbereich (orange) innerhalb des Salzstruktur Bahlburg (weiss). Blickrichtung Süd-Ost.

Positionsoptimierung eines hypothetischen Einlagerungsbereichs für den Salzstock Bahlburg

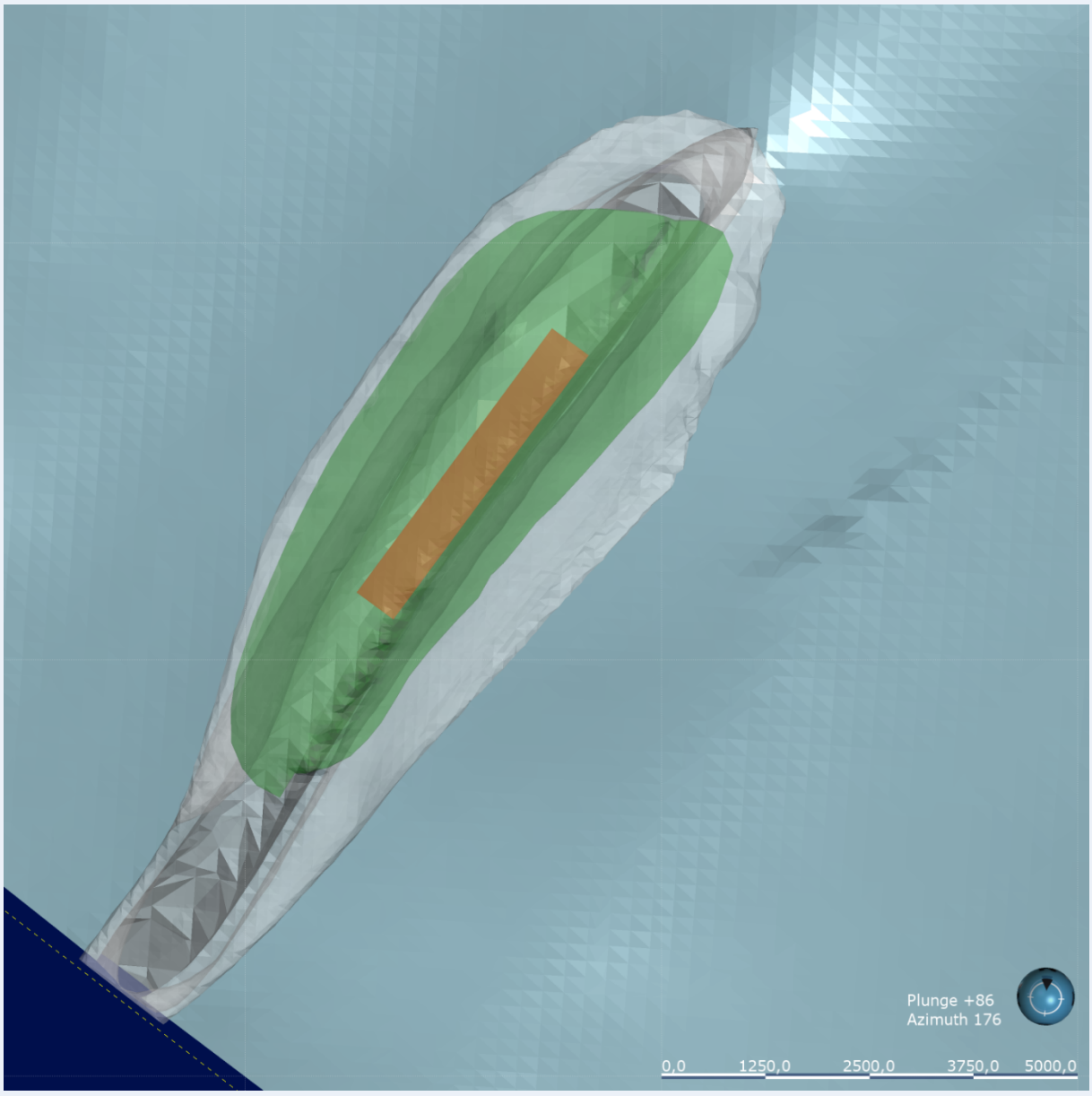


Abbildung 197: Laterale Lage des hypothetischen Endlagerbereiches (orange) innerhalb des Teilgebiets Bahlburg. Blick von oben

8.5.7 Die Bestimmung der Transportlänge d_{1Ma}

8.5.7.1 Detaillierungsgrad und Annahmen der numerischen Transportmodelle

Wie bereits in Kapitel 8.5.3 beschrieben, werden zur quantitativen Bewertung des sicheren Einschlusses eindimensionale (1D-)Modelle genutzt. Diese Verwendung von 1D-Modellen stellt eine Vereinfachung der tatsächlich gegebenen Geologie dar (siehe Abbildung 198), da für jedes zu modellierende Gebiet davon auszugehen ist, dass die Parameter und die Geometrie der Schichten im dreidimensionalen Raum variabel sind. Die Gründe für diese Herangehensweise werden im Folgenden näher erläutert.

In Hinblick auf die den rvSU zugrundeliegende Datenlage bietet die Verwendung von 1D-Modellen eine sinnvolle, vereinfachte Darstellung des Endlagersystems. Sie erlaubt es beispielsweise, dass keine Annahmen hinsichtlich der räumlichen Verbreitung der Parameter getroffen werden und verhindert eine Pseudogenauigkeit. Darüber hinaus erfüllt die Verwendung von 1D-Modellen das Ziel, verschiedene Gebiete miteinander vergleichen zu können, um die bestmöglichen Gebiete näher zu identifizieren. Die Modelle erheben nicht den Anspruch, die Geologie in jedem Detail wiederzugeben, was in Schritt 2 der Phase I des Standortauswahlverfahrens nicht zielführend und ohne umfangreiche Erkundungen nicht leistbar wäre.

Das durch das eindimensionale Modell dargestellte Endlager entspricht einem flächenhaften, in der Normalen zur Ausbreitungsrichtung unendlich weit ausgedehntem Endlager. Aufgrund der in der Realität begrenzten Ausdehnung des Endlagers würde sich der reale Transport der Nuklide verlangsamen, sobald die Laufweite der Ausbreitungsfront die Größenordnung der normal zur Strömungsrichtung liegenden Ausdehnung des Endlagers erreicht (d. h. die Breite des Endlagers bei vertikaler Ausbreitung, bzw. die Höhe des Endlagers bei horizontaler Ausbreitung). Bei Simulationen in horizontaler oder vertikaler Richtung wird die sich ergebende Transportlänge daher stark bzw. leicht überschätzt, das Berechnungsergebnis ist somit konservativ.

Des Weiteren haben 1D-Modelle den Vorteil eines deutlich geringeren Bedarfs an Rechenleistung im Vergleich zu entsprechend höherdimensionalen Betrachtungen. Dies erlaubt die Durchführung einer sehr großen Anzahl an verschiedenen Berechnungen, um eine ganze Bandbreite von Parameterausprägungen zu berücksichtigen (vgl. Kapitel 8.5.4).

Details der anfänglichen Radionuklidmobilisierung werden nicht modelliert. Dazu wird die (sehr) konservative Annahme zu Grunde gelegt, dass das gesamte Nuklidinventar innerhalb des Endlagers vom Beginn der Modellrechnung an vollständig aus den Behältern und dem Nahfeld freigesetzt sowie im Grundwasser gelöst ist. Gegenüber einer realistischen (räumlich verteilten) Freisetzung entstehen somit zu Beginn des Simulationszeitraumes deutlich höhere Konzentrationsgradienten und damit eine verstärkte Diffusion. Es werden keine etwaigen Löslichkeitsgrenzen und keine verzögerte Freisetzung aus den Behältern oder dem Nahfeld der Behälter in Betracht gezogen.

Dieses Vorgehen orientiert sich u. a. an Navarro et al. (2019) und überschätzt den Nuklidaustrag deutlich. Davon unberührt wird Sorption je nach den geologischen Bedingungen berücksichtigt, allerdings wird die Speziierung dabei zum gegenwärtigen Zeitpunkt vernachlässigt.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

Die Modellierung berücksichtigt den Transport nur innerhalb der geologischen Barrieren, mit dem Endlagerbereich als Quelle. Der Transport innerhalb der Auflockerungszone und der (geo)technischen Barrieren wird in der Modellierung nicht berücksichtigt, da noch keine ortsspezifischen Aussagen bezüglich dieser Aspekte getroffen werden. Zudem kann nach § 7 Abs. 6 Nr. 2 EndlSiUntV in den rvSU davon ausgegangen werden, dass die technischen Barrieren, also etwa die Streckenverschlüsse o. ä. ihre Funktion grundsätzlich erfüllen. Insbesondere haben Forschungsprojekte wie RESUS (Mönig et al. 2020a) gezeigt, dass der Nuklidaustrag aus den Grubengebäuden gering gehalten werden kann.

Das Nuklidinventar basiert auf einer vereinfachten Darstellung des Inventars radioaktiver Abfälle in Deutschland (Larue et al. 2013), ebenso wie die Auswahl der berücksichtigten Nuklide. Auch die Zerfallseigenschaften (Halbwertszeiten) der Nuklide wurden dieser Quelle entnommen. Dabei wurden die dort tabellierten Abfälle aus der Urananreicherung („Urantails“), graphithaltige Abfälle und Mischabfälle nicht mit in die Rechnungen einbezogen, da sie voraussichtlich nicht im Endlager für hochradioaktive Abfälle eingelagert werden. Das Inventar wird für die rvSU durch neuere Inventarberechnungen aktualisiert, die in Zusammenarbeit mit der GRS durchgeführt werden. Ebenso wird die Liste der berücksichtigen Nuklide in einem in der Vergabe befindlichen Forschungsprojekt aktualisiert (Forschungsaufruf STAFuE-21-15-Klei). Im Modell wird davon ausgegangen, dass das Nuklidinventar (wie bereits erwähnt) instantan im Grundwasser zur Verfügung steht. Dabei wird das Inventar gleichmäßig auf das gesamte Volumen des Endlagers verteilt.

Beispiel 94: Repräsentatives Profil des Opalinustons für den Teiluntersuchungsraum „01_07UR_001_00TG_032_01IG_T_f_jmOPT“

Repräsentatives Profil für den Teiluntersuchungsraum „01_07UR_001_00TG_032_01IG_T_f_jmOPT“

Das untenstehende Profil wurde für die Erstellung des im Nachfolgenden beschriebenen 1D-Transportmodells verwendet.

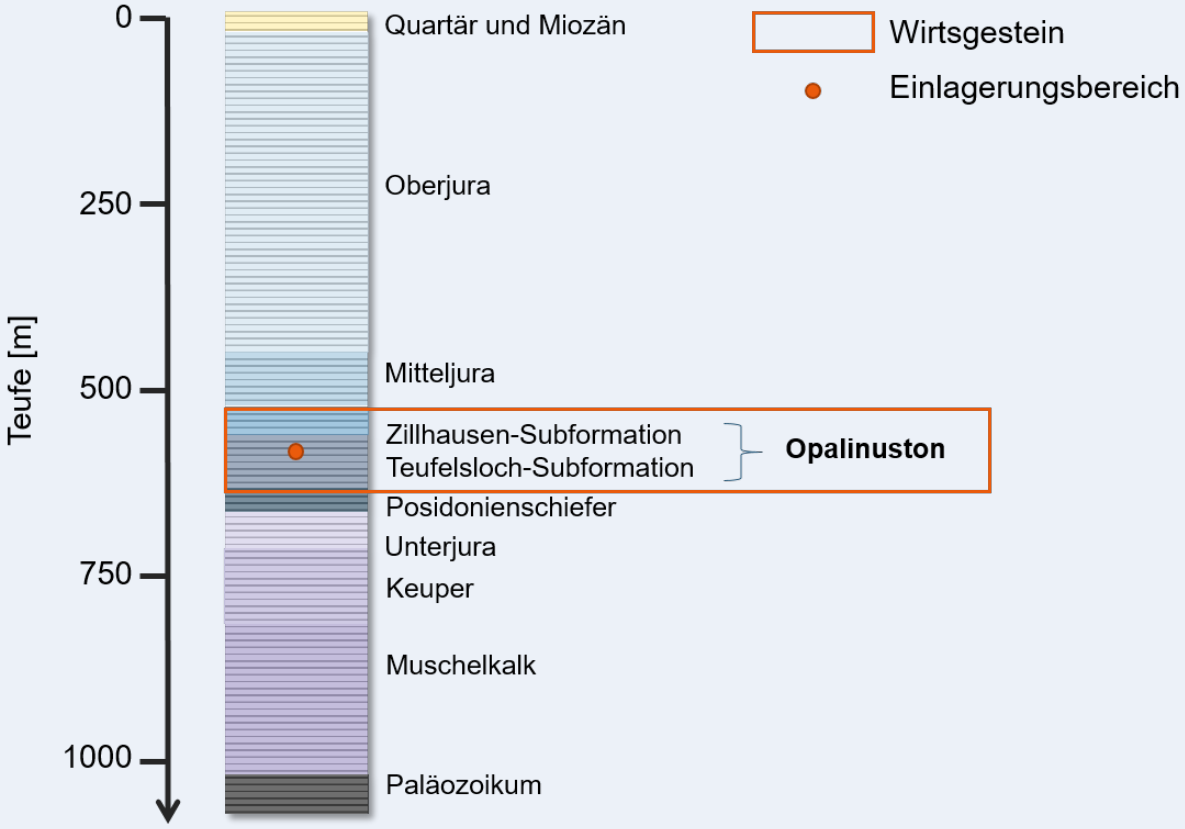


Abbildung 198: Schematische Darstellung eines repräsentativen Profils, für das die Ausbreitung der Radionuklide berechnet wird

8.5.7.2 Berechnungsansatz

Die dargestellten Ergebnisse der Transportmodellierung sind ausschließlich als vorläufiger Arbeitsstand zu verstehen. Insbesondere die fehlende Berücksichtigung der verzögerten Mobilisierung, der Löslichkeitsgrenzen und der (geo)technischen Barrieren lässt erwarten, dass die dargestellten Ergebnisse den Nuklidaustrag überschätzen. Nähere Details dazu sind in Kapitel 8.5.9 zu finden.

Die Transportlänge d_{1Ma} wird mittels einer eindimensionalen Rechnung bestimmt (vgl. Abbildung 199). Sie entspricht der Distanz zum Rand des potenziellen Endlagers, in der die Kriterien des Massen- und Stoffmengenaustrags noch eingehalten werden. Gemäß den Anforderungen des

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

StandAG wird hier ein Anteil von 10^{-4} sowohl der Masse als auch Anzahl der Atome betrachtet. Dafür wird die Ausbreitung der Radionuklide über den Bewertungszeitraum von einer Million Jahre berechnet. Im StandAG wird weiterhin gefordert, dass ein jährlicher Massen- und Stoffmengenaustrag von 10^{-9} nicht überschritten werden darf (vgl. Kapitel 8.5.2). Da diese Schwelle integral weniger strikt ist – ein theoretisch erlaubter Austrag von 10^{-9} über einen Zeitraum von einer Million Jahre entspräche 10^{-3} des Gesamtinventars – wird zunächst das Kriterium des Gesamtaustrags betrachtet. Das Jahreskriterium kann auch verletzt sein, obwohl das Gesamtaustragskriterium erfüllt ist, etwa durch schnelle Zuwächse des Austrags. Daher wird es unabhängig vom Gesamtaustragskriterium als Nebenbedingung an die Transportlänge geprüft.

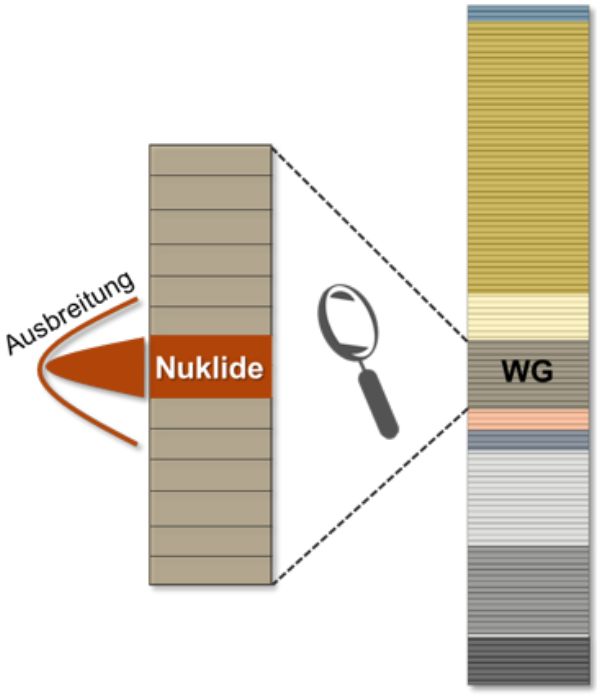


Abbildung 199 *Schematische Darstellung des Vorgehens bei der Berechnung des Radionuklidaustrags.*
Die geologische Barriere wird als vertikale, eindimensionale Säule repräsentiert. Innerhalb des Endlagerbereichs im Wirtsgestein werden Radionuklide freigesetzt. Über den Zeitraum von einer Million Jahre wird dann ihre Ausbreitung im Wirtsgestein und den umliegenden Schichten modelliert.

Der Transport von Radionukliden wird mit einem neu entwickelten Modellcode der BGE, TransPyREnd, modelliert. Dieses Modell beinhaltet die wichtigsten physikalischen Prozesse, die den Radionuklidtransport im Untergrund bestimmen: Diffusion, Advektion, Sorption und radioaktiver Zerfall. Das Modell simuliert den Transport entlang von einer Raumachse (Eindimensional, 1D), d. h. der Untergrund wird vereinfacht als ein einziges Säulenprofil dargestellt und der Transport entlang der Längsachse dieser Säule berechnet. Ob das Säulenprofil horizontal oder vertikal im Untergrund liegt, hängt von der Raumrichtung ab, in der die minimale Mächtigkeit erwartet wird (siehe Kapitel 8.5.6). Wenn das Säulenprofil vertikal aufzubauen ist, kann das Modell ggf. aus großer Teufe bis an die GOK reichen und dabei alle Schichten des Deckgebirges beinhalten. Im Folgenden wird von einem

vertikalen Aufbau des Modells ausgegangen (für Abweichungen hiervon siehe Kapitel 8.5.6.2). Details zum theoretischen Hintergrund und zur numerischen Implementierung des Modellcodes finden sich im Anhang (s. Anhang 3).

Zur Illustration des Vorgehens bei der Transportmodellierung für die in ein Endlager eingebrachten Radionuklide ist in Abbildung 199 die berechnete räumliche Verteilung der Konzentration für ein Beispiel dargestellt. Der Simulationszeitraum beträgt 1 Million Jahre. Das Wirtsgestein ist grau hinterlegt dargestellt.

Um aus den Ergebnissen der Transportmodellierung für alle berücksichtigten Radionuklide die Transportlänge d_{1Ma} zu bestimmen, wird zunächst die räumliche Verteilung des kumulativen Gesamtaustrags der Radionuklide herangezogen, wie in Abbildung 201 veranschaulicht. Grafisch ergibt sie sich als Schnittpunkt aus der horizontalen Grenzwertlinie und dem kumulativen Massenaustrag. Damit ist nur das Kriterium des Gesamtmassenaustrags geprüft: Zusätzlich muss gelten, dass der maximale Jahresaustrag nie überschritten wurde, d. h. in keinem Zeitraum darf der Austrag mehr als 10^{-9} des anfänglich eingelagerten Inventars pro Jahr überschreiten. Dies kann gleichsam mithilfe der Simulationsdaten geprüft werden, wie in Abbildung 203 dargestellt ist. Wird das Jahreskriterium nicht erfüllt, so wird die Transportlänge d_{1Ma} auf die minimale Distanz vom Endlager festgelegt, in der beide Kriterien erfüllt sind.

Da Material in zwei Richtungen aus dem Endlager ausgetragen werden kann (im Beispiel: nach oben/aufwärts oder unten/abwärts), gibt es zwei solche Längen: eine für den abwärts, und eine für den aufwärts gerichteten Transport. Ebenso ergeben sich in der Regel unterschiedliche Transportlängen für die Betrachtung des Stoffmengen- und des Massenaustragskriteriums. Die relevante Transportlänge d_{1Ma} ist immer die größte dieser vier möglichen Distanzen (Transportlänge für die Stoffmenge und für die Masse, nach unten und nach oben). Um dem Umstand, dass Material in zwei Richtungen und asymmetrisch aus dem Endlager entweichen kann, Rechnung zu tragen, wird der Grenzwert in beiden Raumrichtungen getrennt betrachtet. Dabei wird der erlaubte Massen/Stoffmengenaustrag jeweils hälftig angesetzt, sodass der Grenzwert jeweils bei $0{,}5 \cdot 10^{-4}$ liegt, bzw. $0{,}5 \cdot 10^{-9}$ pro Jahr liegt. Da immer die jeweils größte Transportlänge ausgewählt wird, ist dieses Vorgehen konservativ.

Beispiel 95: Zur Berechnung der Radionuklidkonzentration nach einer Million Jahren

Radionuklidtransport im Tongestein (am Beispiel des Opalinustons)

Die dargestellten Ergebnisse der Transportmodellierung sind ausschließlich als vorläufiger Arbeitsstand zu verstehen. Insbesondere die fehlende Berücksichtigung der verzögerten Mobilisierung, der Löslichkeitsgrenzen und der (geo)technischen Barrieren lässt erwarten, dass die dargestellten Ergebnisse den Nuklidaustrag überschätzen. Nähere Details dazu sind in Kapitel 8.5.9 zu finden.

Das Beispiel basiert auf dem in Abbildung 198 dargestellten geologischen Profil. Die genauen Parameter für die Berechnung sind in Anhang 5 angegeben. Die Berechnungen zeigen, dass für diese Modellierung die Radionuklide ^{36}Cl, ^{79}Se und ^{129}I, welche einen niedrigen Sorptionskoeffizienten im Ton aufweisen, in der Lage sind, aus dem Wirtsgestein heraus transportiert zu werden. Auch wenn die übrigen 43 Radionuklide innerhalb des Wirtsgesteins verbleiben, ist damit ein gewisser Anteil der Masse und Stoffmenge ausgetragen worden.

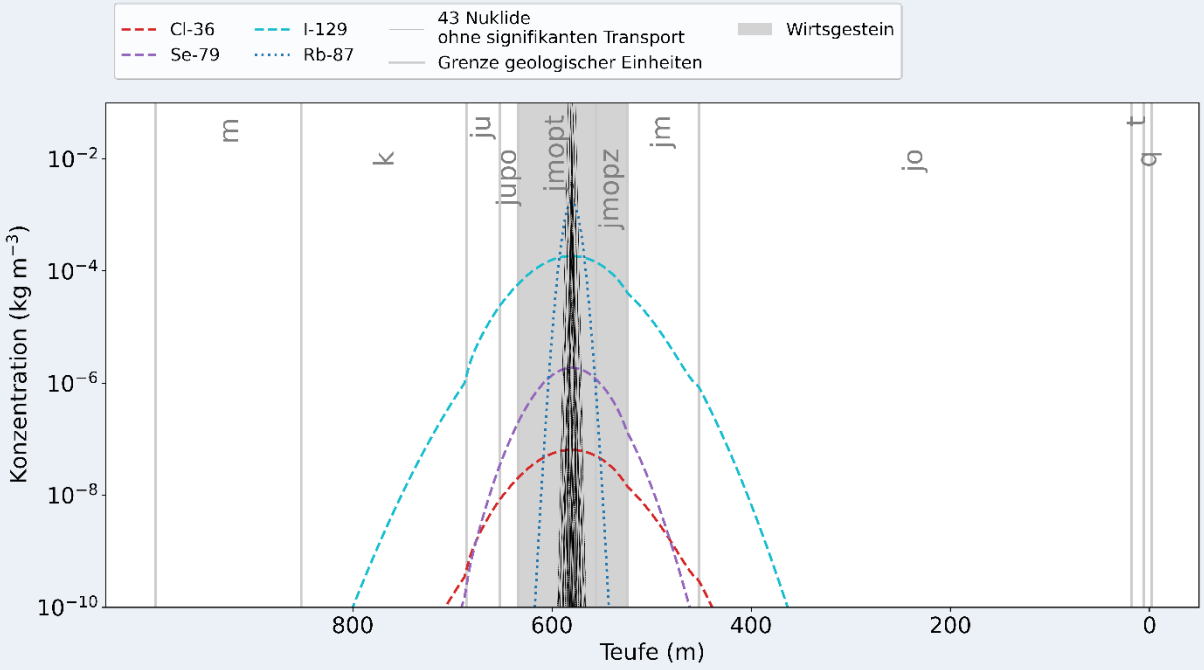


Abbildung 200: Beispielhaft modellierte Radionuklidkonzentrationen nach 1 Million Jahren basierend auf dem in Abbildung 198 dargestellten geologischen Profil

Wie aus Abbildung 202 hervor geht, hängt die berechnete Transportlänge und das erfolgreiche Einhalten des Grenzwertes für den Stoffmengen- und Massenaustrag von den Eingangsparametern des Transportmodells ab. Das Diagramm zeigt den zeitabhängigen kumulativen Massenaustrag innerhalb des Bewertungszeitraums von einer Million Jahren für unterschiedliche Modellierungen mit unterschiedlichen Transportparameterwerten. Die realistische Variation der Parameter zeigt, dass

die Ungewissheiten der Eingangsparameter sich in der Ungewissheit der Bewertungsgrößen des Massen- und Stoffmengenaustrags fortpflanzen und für einige der Modellierungen der Grenzwert des Massenaustrags überschritten wird. Die Durchführung mehrerer Rechenfälle zum Radionuklidtransport führt zu mehreren berechneten Transportlängen d_{1Ma}. Diese Ergebnisse sind sowohl auf Plausibilität, als auch anhand von Vergleichsrechnungen zu prüfen. Es ist zu ermitteln, ob und wie viele der Rechenläufe das durch § 4 EndlSiAnfV vorgegebene Kriterium zum Massen- und Stoffmengenaustrag überschreiten. Hierzu werden die im Kapitel 8.5.3 beschriebenen Kennzahlen herangezogen und ausgewertet.

Die Betrachtung der abweichenden Entwicklungen ist nicht ausschlaggebend für die Bewertung von Aspekt f). Daher fließen die Ergebnisse aus Berechnungen zu abweichenden Entwicklungen nicht quantitativ in die Bewertung von Aspekt f) mit ein. Es muss für die abweichenden Entwicklungen jedoch geprüft werden, dass das Endlagersystem im Bewertungszeitraum seine Funktion grundlegend beibehält (vgl. § 4 Abs. 6 EndlSiAnfV). Dies bedeutet, dass auch Rechenfälle unter Berücksichtigung der abweichenden Entwicklungen erstellt werden und deren Ergebnisse in Bezug auf die Anforderungen an den sicheren Einschluss nach § 4 Abs. 1 bis 4 EndlSiAnfV ausgewertet werden. Die Erkenntnisse, die aus diesen Berechnungen hervorgehen, fließen in die umfassende Bewertung des Teiluntersuchungsraums ein und tangieren insbesondere die Robustheit des Endlagersystems.

Beispiel 96: Zur Berechnung des Gesamtaustrags an Radionukliden über eine Million Jahre

Stoffmengenaustrag an Radionukliden im Tongestein (am Beispiel des Opalinustons)

Die dargestellten Ergebnisse der Transportmodellierung sind ausschließlich als vorläufiger Arbeitsstand zu verstehen. Insbesondere die fehlende Berücksichtigung der verzögerten Mobilisierung, der Löslichkeitsgrenzen und der (geo)technischen Barrieren lässt erwarten, dass die dargestellten Ergebnisse den Nuklidaustrag überschätzen. Nähere Details dazu sind in Kapitel 8.5.9 zu finden.

Dargestellt ist die Ermittlung des Gesamtaustrags und der Transportlänge am des in Abbildung 198 dargestellten geologischen Profils. Die genauen Parameter für die Berechnung sind in Anhang 5 angegeben. Der kumulierte Austrag aus dem Wirtsgestein ist in blau dargestellt. Die horizontale, gestrichelte Linie kennzeichnet den Grenzwert, der nach § 4 Abs. 5 EndlSiAnfV 10^{-4} der Masse und Stoffmenge der eingelagerten Radionuklide beträgt. Beide Linien schneiden sich dort, wo die typische Transportlänge erreicht ist. In der Grafik aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht dargestellt ist der Austrag zur anderen Seite des Endlagers: auch dort ergibt sich eine im Allgemeinen andere Transportlänge. Relevant ist die jeweils größte dieser Transportlängen. Im Beispiel beträgt die maximale Transportlänge 54 m und liegt damit noch knapp im Wirtsgestein.

Stoffmengenaustrag an Radionukliden im Tongestein (am Beispiel des Opalinustons)

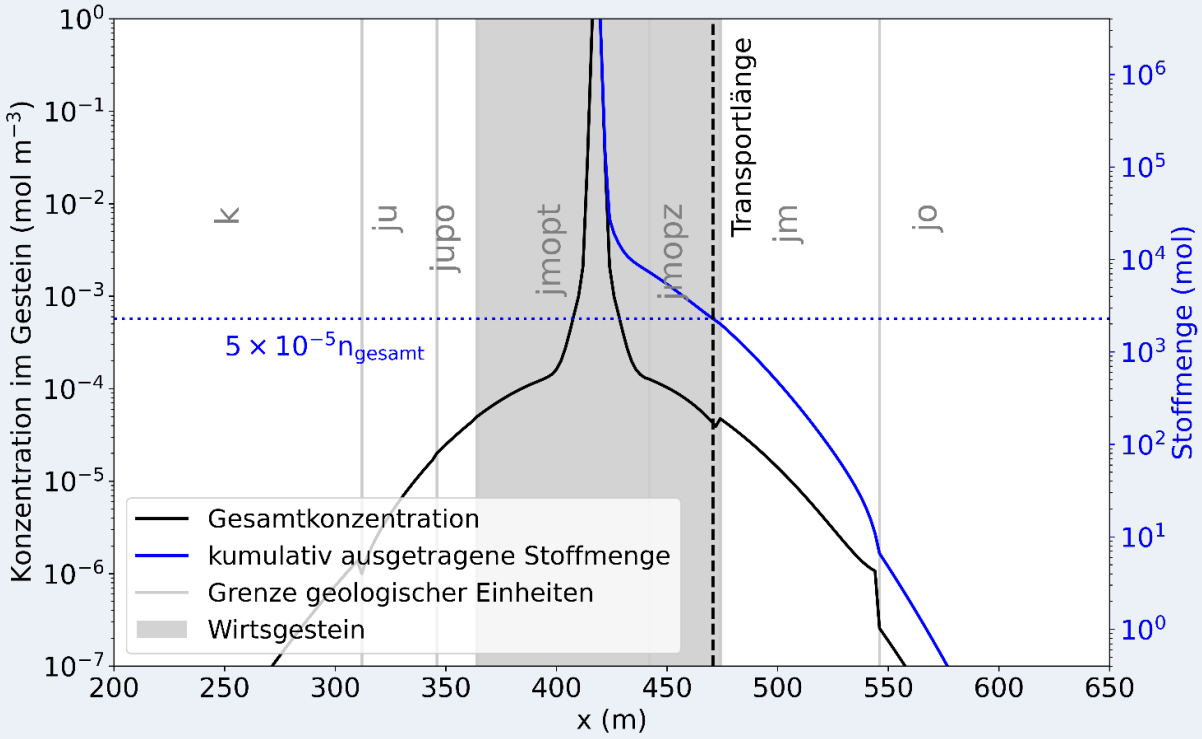


Abbildung 201: Darstellung zur Berechnung der Transportlänge anhand der modellierten kumulativen Stoffmenge nach 1 Million Jahren basierend auf dem in Abbildung 198 dargestellten geologischen Profil

Für den Transport aufwärts und abwärts, und jeweils für Stoffmengen- und Massenaustrag, lassen sich unterschiedliche Transportlängen definieren, die auch auf die Einhaltung des Jahreskriteriums geprüft werden müssen. Für die Bewertung relevant ist nur die größte Transportlänge, wie in Tabelle 74 dargestellt.

Tabelle 74: Transportlängen im Opalinuston. Berechnungen basierend auf dem in Abbildung 198 dargestellten Profils.
Die genauen Parameter für die Berechnung sind in Anhang 5 angegeben.

Transportlänge	Wert	Jahresaustrag eingehalten
aufwärts, massengewichtet	37,3 m	Ja, für x > 14 m
abwärts, massengewichtet	36,5 m	Ja, für x > 14 m
aufwärts, anzahlgewichtet	**51,7 m**	Ja, für x > 20 m
abwärts, anzahlgewichtet	49,0 m	Ja, für x > 20 m

Beispiel 97: Zur Parametervariation der Transportlängenberechnung

Parametervariation der Transportlängenberechnung

Die dargestellten Ergebnisse der Transportmodellierung sind ausschließlich als vorläufiger Arbeitsstand zu verstehen. Insbesondere die fehlende Berücksichtigung der verzögerten Mobilisierung, der Löslichkeitsgrenzen und der (geo)technischen Barrieren lässt erwarten, dass die dargestellten Ergebnisse den Nuklidaustrag überschätzen. Nähere Details dazu sind in Kapitel 8.5.9 zu finden.

Die Parameter, die die Transportmodellierung beeinflussen, sind mit Ungewissheiten behaftet. Um diese zu berücksichtigen werden viele Realisierungen gerechnet, die im Rahmen der bekannten Ungewissheiten variable Transportparameter aufweisen. Für dieses Beispiel wurden die in Tabelle 73 gelisteten Parameter pro aufgeführtem Radionuklid durch ein Monte-Carlo Sampling erzeugt (vgl. Kapitel 8.5.4) In Abbildung 202 ist der relative Stoffmengenaustrag aus dem Wirtsgestein für das in Abbildung 198 dargestellten geologische Profil als Funktion der Zeit dargestellt. Die graue Schattierung entspricht der gesamten Bandbreite an erwarteten Austrägen. In Schwarz dargestellt ist der Verlauf, der sich aus der bestmöglichen Einschätzung (B.E.) der Parameterwerte (s. Anhang 5) ergeben. Die anderen Kurven zeigen Verläufe im 10/25/75/90en Perzentil bezogen auf die resultierende Transportlänge.

Parametervariation der Transportlängenberechnung

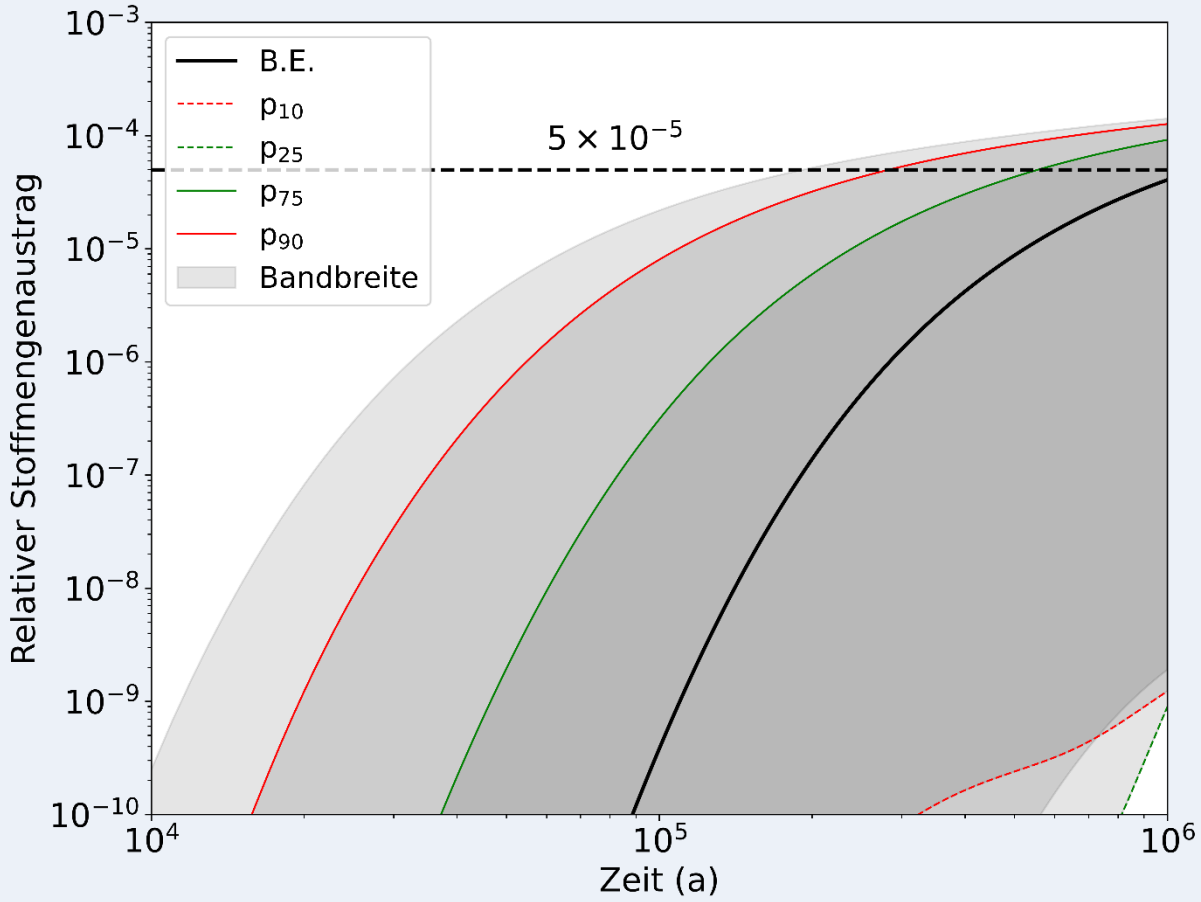


Abbildung 202: Relativer Stoffmengenaustrag für verschiedene Realisierungen im Rahmen der Ungewissheitsanalyse der verwendeten Parameter (Rechenfall 1 aus Beispiel 92)

Beispiel 98: Zur Überprüfung des Kriteriums für den jährlichen Stoffmengenaustrag

Überprüfung des Kriteriums für den jährlichen Stoffmengenaustrag

Die dargestellten Ergebnisse der Transportmodellierung sind ausschließlich als vorläufiger Arbeitsstand zu verstehen. Insbesondere die fehlende Berücksichtigung der verzögerten Mobilisierung, der Löslichkeitsgrenzen und der (geo)technischen Barrieren lässt erwarten, dass die dargestellten Ergebnisse den Nuklidaustrag überschätzen. Nähere Details dazu sind in Kapitel 8.5.9 zu finden.

Neben dem Kriterium für den gesamten Stoffmengen/Massenaustrag im Bewertungszeitraum muss weiterhin geprüft werden, dass zu keinem Zeitpunkt jährlich mehr als 10^{-9} der Gesamtmasse/Stoffmenge ausgetragen werden. Dies kann aus dem Simulationsergebnissen ermittelt

Überprüfung des Kriteriums für den jährlichen Stoffmengenaustrag

werden. Für das in Abbildung 198 dargestellte Profil ist in Abbildung 203 der maximale jährliche Austrag in Richtung GOK aufgetragen. Eingezeichnet ist auch die bereits oben ermittelte Transportlänge, die sich aus dem Kriterium des Gesamtaustrags ergab. Wie sich aus der Abbildung 203 ergibt, erreicht der jährliche Stoffmengenaustrag in diesem Bereich sein Maximum bei nur etwa 10^{-10} pro Jahr. Analog ist dies natürlich auch für den Transport in den Bereich unterhalb des Endlagers und für das Massenkriterium zu überprüfen.

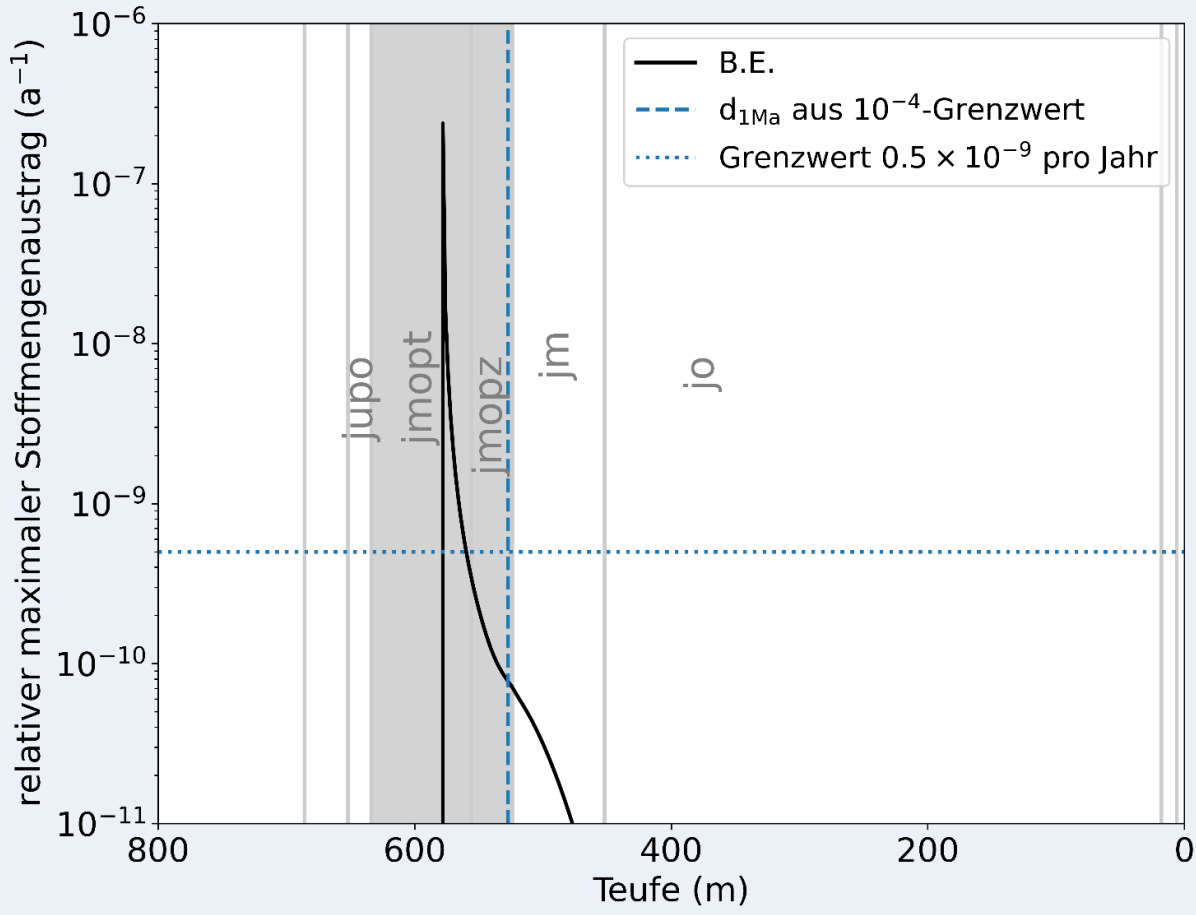


Abbildung 203: Prüfung des jährlichen Stoffmengenaustrags für das in Abbildung 198 dargestellte Profil des Opalinustons

8.5.7.3 Wirtsgesteinsspezifische Überlegungen

Die zuvor beschriebenen Methoden sind insbesondere für Teilgebiete des Wirtsgesteins Tongestein anwendbar. Für Teilgebiete anderer Wirtsgesteine ergeben sich aufgrund ihrer unterschiedlichen Eigenschaften verschiedene Herausforderungen. Entsprechende methodische Ansätze werden im Folgenden erläutert.

Bei Teiluntersuchungsräumen in kristallinem Wirtsgestein ist neben dem Endlagersystem Typ 1, welches auf einem einschlusswirksamen Gebirgsbereich beruht, auch das Endlagersystem Typ 2 (Kapitel 4.1.3.2) zu betrachten, bei dem geotechnische und technische Barrieren die wesentliche Barriere darstellen. Zu diesem Zeitpunkt des Standortauswahlverfahrens ist davon auszugehen, dass geotechnische und technische Barrieren ihre Funktion erfüllen (Kapitel 8.4). Somit kann angenommen werden, dass ein Endlagersystem Typ 2 realisierbar ist. Trotz dieser Annahme ist immer zunächst die geologische Situation zu untersuchen, da weiterhin günstige geologische Gegebenheiten für den sicheren Einschluss zu favorisieren sind. Darüber hinaus ist für das Endlagersystem Typ 1 zu prüfen, ob ein einschlusswirksamer Gebirgsbereich realisierbar ist und ob der sichere Einschluss der Radionuklide gewährleistet werden kann. Daher werden für dieses Wirtsgestein ebenfalls Berechnungen zum Radionuklidtransport angestrebt. Auch hier können Entwicklungen, insbesondere in Hinblick auf das hydrogeologische Regime, eine hervorgehobene Rolle spielen. Eine grundsätzliche Fragestellung im kristallinen Wirtsgestein besteht hinsichtlich des Umgangs mit Klüften, deren Auftreten und Orientierung vielfach unbekannt ist. Hier kann beispielsweise eine Spannweite an Klüftigkeiten betrachtet werden, um zu bestimmen, bei welcher Klüftigkeit ein sicherer Einschluss gelingt, oder es können andere statistischen Methoden herangezogen werden, wie z. B. die Verwendung von „Discrete Fracture Networks“ (vergleiche Blum et al. (2005)).

Im Hinblick auf das Wirtsgestein Steinsalz in steiler Lagerung stellt sich die Frage, welcher Ansatz für die Bewertung des sicheren Einschlusses gewählt werden soll. In bisherigen Forschungsprojekten wie etwa RESUS (Mönig et al. 2020b) oder VSG (Fischer-Appelt et al. 2013) wurde von der prinzipiellen Dichtheit von intaktem, ungestörtem Steinsalz ausgegangen. Zu unterscheiden ist hierbei zwischen Dichtheit bezogen auf Advektion, also einer verschwindend kleinen Permeabilität und einer vernachlässigbaren Flüssigkeitsströmung im Porenraum, und Dichtheit bezogen auf Diffusion, also verschwindend kleine effektive Diffusionskoeffizienten für den Transport von Nukliden im Porenraum. Wenn reines Steinsalz auf Längenskalen von Metern oder mehr keinen zusammenhängenden Porenraum mehr besitzt, dann ist es für beide Prozesse – Advektion und Diffusion (im Porenraum) – gleichermaßen dicht. Folgt man diesem Ansatz, so sind mit jetzigem Kenntnisstand zu Transportprozessen im Steinsalz sowie in Anbetracht der zur Verfügung stehenden geringen Kenntnisse bezüglich Internbau und Materialeigenschaften, keine Ausbreitungsrechnungen nötig bzw. sinnvoll.

Allerdings gibt es nur wenige Daten zu den beiden relevanten Größen. Untersuchungen der Permeabilität zeigen, dass die Permeabilität von intaktem Steinsalz sehr gering, aber messbar ist (siehe etwa Liu et al. (2017)), auch wenn nicht klar ist, ob solche Messungen übertragbar sind. Zur Diffusion in der Porenflüssigkeit von reinem, intaktem Steinsalz gibt es kaum Messwerte. Gleichwohl gibt es etwa zur Diffusion von Gasen in der Auflockerungszone einzelne Messungen (Jockwer & Wieczorek

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

2008), deren Ergebnisse sich als Beleg für das Vorhandensein eines kleinen, aber messbaren Anteils von zusammenhängenden Poren interpretieren lassen, sofern sie auf intaktes Steinsalz übertragbar sind. Die Existenz von Messwerten zur Permeabilität weist ebenso darauf hin, dass (wenige) verbundene Poren existieren. Zur Porosität gibt es nur wenige Messwerte, die im Bereich von etwa 0,02 % bis 1,2 % liegen (Liu et al. 2017), wobei die Werte am oberen Ende typischerweise stratiform gelagertem Steinsalz zukommen. Obwohl auch die Porosität damit sehr gering ist und die Porenräume mutmaßlich klein, ist Diffusion nicht unmöglich. (Ficksche) Diffusion wird nur bei Porengrößen eingeschränkt, die kleiner sind als die mittlere freie Weglänge der Moleküle (Tartakovsky & Dentz 2019). Selbst unterhalb dieser Längenskala wäre prinzipiell noch Knudsen-Diffusion möglich, ein Prozess, bei dem die Diffusion durch Stöße mit den Porenwänden dominiert wird.

Beides – der Mangel an Daten und der Befund einer von Null verschiedenen effektiven (also für den Transport zugänglichen) Porosität – sind Argumente dafür, Ausbreitungsrechnungen mit konservativen Annahmen in Hinblick auf Diffusionskoeffizienten und Permeabilitäten vorzunehmen. Während für die Permeabilität Literaturwerte genutzt werden könnten (wobei deren Übertragbarkeit zu betrachten wäre), ist dies für Diffusionskoeffizienten ungleich schwerer. Der effektive Diffusionskoeffizient im Porenraum ist definiert als (Pismen 1974; Ghanbarian et al. 2013):

$$D_{eff} = \frac{D\varphi}{\tau} \tag{6}$$

Mit:

D_{eff} (m^2/s): Effektiver Diffusionskoeffizient

D (m^2/s): Diffusionskoeffizient

φ (-): Porosität

τ (-): Tortuosität

Dabei ist D der molekulare Diffusionskoeffizient, φ die effektive Porosität, also der Volumenanteil an zugänglichem Porenraum, und τ die Tortuosität. Letztere drückt aus, wie stark der Transport durch die Gewundenheit der Pfade im Porenraum gehemmt wird. Die Tortuosität hängt im Allgemeinen von der Porosität ab und nimmt stark zu, wenn die Porosität klein wird, weil die Pfade, die ein Molekül im Gestein zurücklegen muss, immer länger werden. Während auch für die Porosität Abschätzungen bzw. obere Grenzen existieren, gibt es für die Tortuosität kaum Referenzwerte. Theoretische Relationen zwischen Porosität und Tortuosität divergieren bei geringen Porositäten typischerweise (Ghanbarian et al. 2013), sodass je nach Relation für Steinsalz mit einer Porosität von 0,02 % bis 1.2 % Werte im Bereich von 3 bis 10 möglich sind. Möglicherweise können hier Analogieschlüsse zu anderen Gesteinstypen mit geringer Durchlässigkeit hilfreich sein, z. B. gibt es für Ton empirische Gleichungen, die für dieselbe Porosität einen Wert von 200 für die Tortuosität ergeben (Van Loon et al. 2004). Dies ist Gegenstand aktueller Überlegungen. Zur Illustration des Ansatzes eines konservativ abgeschätzten Diffusionskoeffizienten ist in Beispiel 99 der Massenaustrag aus einem (fiktiven) Salzstocks dargestellt. Hierfür wurde die Tortuosität gemäß der Relation von (Van Loon et al. 2004)

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

ermittelt. Diese Rechnung stellt ausschließlich ein Beispiel zur Illustration dar und soll keinen Analogieschluss zu Tongesteinen vorwegnehmen. Wie oben ausgeführt ist die Tortuosität mit sehr großen Ungewissheiten behaftet.

Der Transport im eindimensionalen Fall könnte in steilstehenden Salzstrukturen ggf. lateral modelliert werden, wenn der Abstand zum Nebengebirge geringer ist als der zum Deckgebirge. In diesem Fall gibt es verschiedene Möglichkeiten, den modellierten Transportweg außerhalb des Wirtsgesteins weiterzuführen, so könnte man den direkten Weg an die Oberfläche wählen oder Fließlinien folgen (siehe Abbildung 204).

Über Salz in steiler Lagerung hinaus ist zu prüfen, ob diese Überlegungen auch auf flach gelagertes Salz zu übertragen sind.

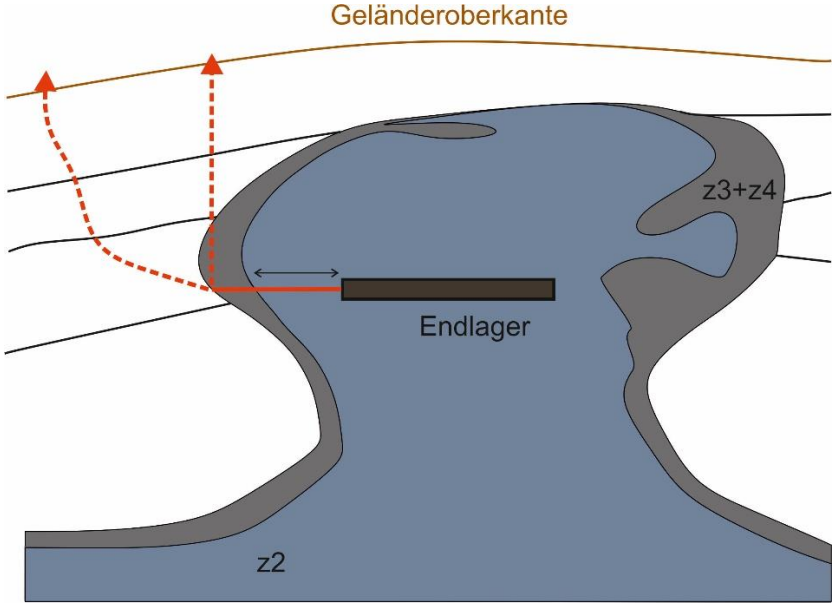


Abbildung 204: Mögliche Modellpfade in Steinsalz in steiler Lagerung

Beispiel 99: zur Abschätzung des Transports in Steinsalz in steiler Lagerung

Erste Abschätzung des Transports in Steinsalz in steiler Lagerung

Die dargestellten Ergebnisse der Transportmodellierung sind ausschließlich als vorläufiger Arbeitsstand zu verstehen. Insbesondere die fehlende Berücksichtigung der verzögerten Mobilisierung, der Löslichkeitsgrenzen und der (geo)technischen Barrieren lässt erwarten, dass die dargestellten Ergebnisse den Nuklidaustrag überschätzen. Nähere Details dazu sind in Kapitel 8.5.9 zu finden.

Dargestellt ist das Resultat einer Testrechnung in Zechsteinsalz (fiktiver Salzstock). Die Linien entsprechen den Konzentrationsverläufen der 10 massenanteilig am stärksten beitragenden Nuklide nach einer Laufzeit von einer Million Jahre. Die schwarze Linie stellt die Gesamtkonzentration aller 47 Nuklide dar. Für diese Rechnung wurden provisorische Festlegungen für

Erste Abschätzung des Transports in Steinsalz in steiler Lagerung

den äußerst ungewissen Parameter der Tortuosität getroffen. Es wurde weiterhin angenommen, dass die minimale Schichtdicke des Satzes (Beschriftung z) in lateraler Richtung vorliegt, und durch eine stark durchlässige Nebengebirgsschichte (f1) begrenzt ist. Das Endlager ist in dieser lateralen Richtung 800 m breit (rot schraffierter Bereich).

Im Salz findet keine Sorption statt, sodass alle Nuklide mit leicht variierenden Diffusionskoeffizienten mobil sind. Es ist zu beachten, dass die Konzentration im Porenvolumen dargestellt ist, was zusammen mit der geringen Porosität des Steinsalzes zu sehr hohen Konzentrationswerten führt. Die resultierende Transportlänge für diese Rechnung beträgt 62 m.

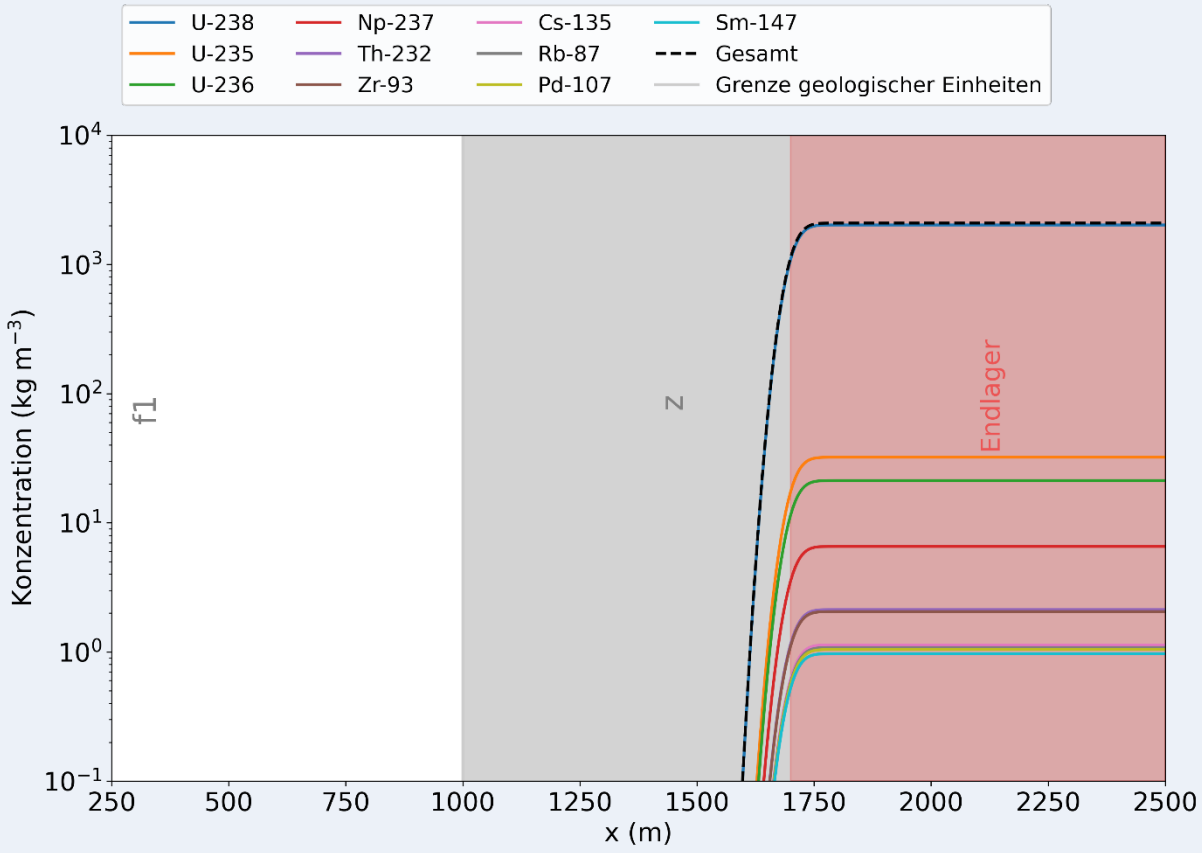


Abbildung 205: Beispielrechnung (1 Millionen Jahre) für Nuklidausbreitung für Steinsalz in steiler Lagerung: Dargestellt ist der Konzentrationsverlauf nach einer Million Jahre.
Das Profil liegt horizontal, daher ist x nicht die Teufe, sondern die laterale Position.

8.5.8 Auswertungen bezüglich der Transportlängen und Kennzahlen

Im Beispiel 100 werden die durch die Parametervariation erzeugten Rechenfälle mit entsprechenden Rechenläufe (siehe Kapitel 8.5.4) für das in Abbildung 198 gezeigte Profil berechneten Transportlängen analysiert.

Sofern $\overline{I_M} > 1$ positiv erfüllt wird, und der maximal erlaubte jährliche Austrag eingehalten werden kann, werden weitere Rechenläufe durchgeführt mit dem Ziel eine Einschätzung der Güte (auch räumlich differenziert) eines Gebiets zu generieren. Es werden die dadurch berechneten Transportlängen statistisch ausgewertet und in Relation zu den im Gebiet vorhandenen Werte von $d_{\min}$ gesetzt. Im Laufe der Fortschreitung der Methodenentwicklung wird geprüft inwieweit mehrere repräsentative Profile für einen Teiluntersuchungsraum mit hoher räumliche Variation der Geometrie und/oder Eigenschaften modellhaft umgesetzt werden. Die in Abbildung 206 gezeigt Bandbreite von $d_{\min}$ beruht auf einer Häufigkeitsanalyse des Mächtigkeitsrasters für Teiluntersuchungsraum 01_07UR_001_00TG_032_01IG_T_f_jmOPT. Die Transportlängen wurden jedoch alle für ein spezifisches Profil erzeugt (Abbildung 198).

Beispiel 100: zur Auswertung der berechneten Transportlängen auf Grundlage der durchgeführten Monte-Carlo-Simulationen.

Beispiel zur Auswertung der berechneten Transportlängen

Die dargestellten Ergebnisse der Transportmodellierung sind ausschließlich als vorläufiger Arbeitsstand zu verstehen. Insbesondere die fehlende Berücksichtigung der verzögerten Mobilisierung, der Löslichkeitsgrenzen und der (geo)technischen Barrieren lässt erwarten, dass die dargestellten Ergebnisse den Nuklidaustrag überschätzen. Nähere Details dazu sind in Kapitel 8.5.9 zu finden.

In Kapitel 8.5.4 wurden im Beispiel 92 die Rechenfälle beschrieben, auf deren Grundlage Monte-Carlo-Simulationen durchgeführt wurden. Auf Grundlage der variierenden Parameter wurden Rechenläufe mit dem Radionuklid-Transportmodell durchgeführt. Die daraus hervorgegangen Transportlängen sind in Abbildung 206 als Box-Whisker-Plots dargestellt. Die fünf Boxen beziehen sich auf die Nummerierung der fünf Rechenfälle in Beispiel 92. Auf der Y-Achse ist die Transportlänge eingetragen und zusätzlich dazu ist der Bereich von d_{min}, der im Gebiet anzutreffen ist, farblich markiert. Es wird deutlich, dass der B.E.-Lauf in großen Teilen des Gebiets ein Einhalten des sicheren Einschlusses andeutet (siehe Beispiel 100 für die räumliche Auswertung). Die Variation der Parameter erzeugt eine Bandbreite an Transportlängen. Auch diese ist weitgehend kleiner als der minimale Abstand. Es gibt jedoch auch einige Rechenläufe, insbesondere innerhalb von Rechenfall 3, die den sicheren Einschluss deutlich reißen (vgl. auch Tabelle 74). Eine Darstellungsform in Anlehnung an das hier gezeigt Beispiel ist vielversprechend, um einen Vergleich der Gebiete im sicherheitsgerichteten Diskurs (vgl. Kapitel 9) zu unterstützen.

Tabelle 74 zeigt die entsprechenden Kennzahlen I_R für die dargestellten Rechenfälle.

Beispiel zur Auswertung der berechneten Transportlängen

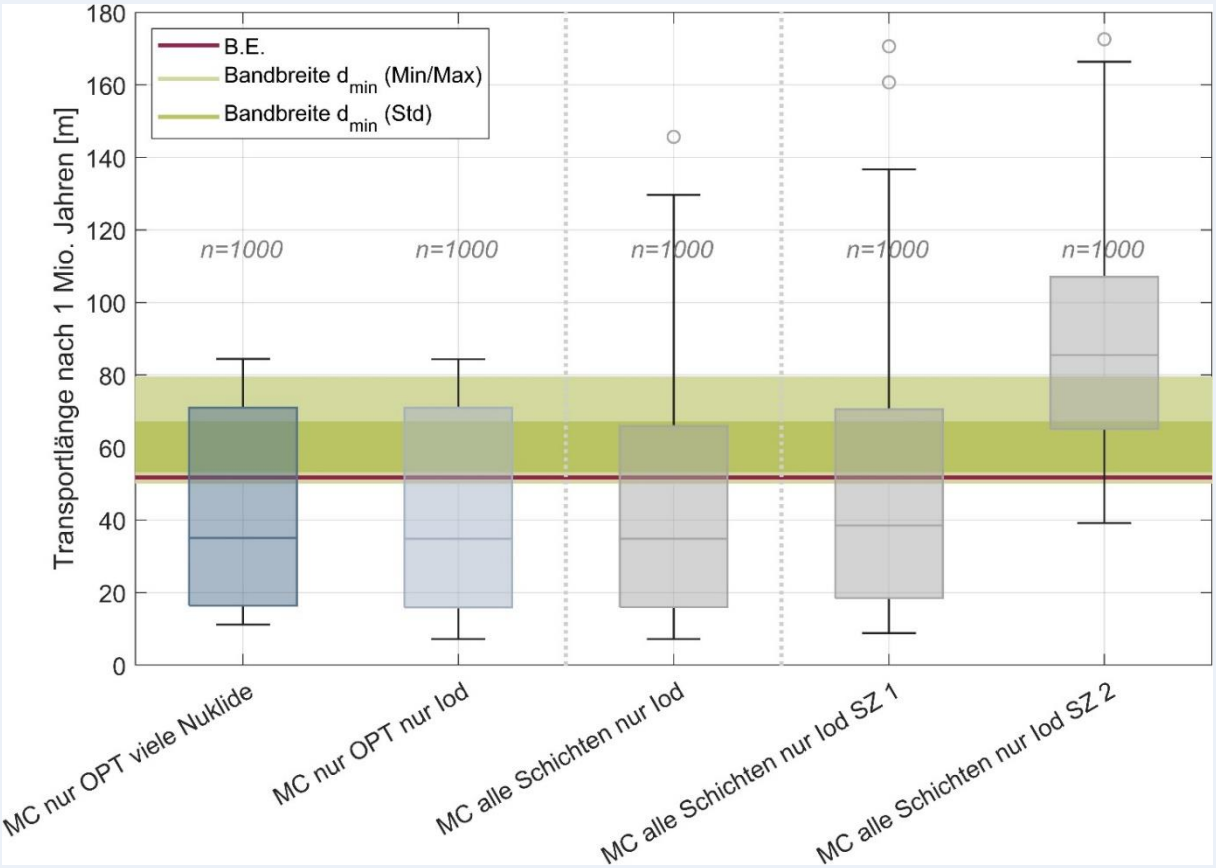


Abbildung 206: Box-Whisker-Plots der fünf Rechenfälle, die in Beispiel 92 ausführlich beschrieben sind.
Auf der Y-Achse ist die Transportlänge eingetragen und zusätzlich dazu ist der Bereich von d_{min}, der im Gebiet anzutreffen ist, farblich markiert.

Tabelle 75: Berechnete Kennzahlen I_R für die vorläufigen Rechenfälle (vgl. Beispiel 92)

Rechen-fall-Nr.	Bezeichnung	Anzahl Rechenläufe	Kennzahl I_R
1	MC nur OPT viele Nuklide	1000	0,627
2	MC nur OPT nur lod	1000	0,628
3	MC alle Schichten nur lod	1000	0,654
4	MC alle Schichten nur lod SZ 1	1000	0,606
5	MC alle Schichten nur lod SZ 2	1000	0,163

8.5.9 Diskussion und Ungewissheiten bei der Bewertung der Möglichkeit des sicheren Einschlusses

Die Bewertung der Möglichkeit des sicheren Einschlusses eines Teiluntersuchungsraums anhand der in den vorigen Kapiteln beschriebenen Methodik ist mit verschiedenen Ungewissheiten verbunden. Diese werden im Folgenden dargestellt und diskutiert. Zunächst ergeben sich die gewählte Methodik und die Verwendung der Kennzahl I_M methodische Ungewissheiten. Durch die Verwendung des Verhältnisses aus Transportlänge und minimale Mächtigkeit enthält der Indikator keine Informationen über die absolute Größe von Transportlänge und minimaler Mächtigkeit. Entsprechend ist die Kennzahl nicht sensitiv bezüglich des Absolutwerts der Mächtigkeit. Ein Teiluntersuchungsraum mit einer geringen Mächtigkeit (aber hohem Rückhaltevermögen) ist typischerweise weniger robust, weil schon geringfügige Veränderungen der Mächtigkeiten u. U. hohe Auswirkungen auf die Nuklidfreisetzung haben können. Durch die Verwendung der Kennzahl I_M wird er aber ggf. ähnlich bewertet wie ein Teiluntersuchungsraum mit großer Mächtigkeit und geringerem Rückhaltevermögen. Dies gilt nur, wenn für beide Teiluntersuchungsräume die gleichen Entwicklungen zu erwarten sind. Eine weitere Ungewissheit bei der Bewertung der Möglichkeit des sicheren Einschlusses ist, dass der Transport entlang der Auffahrrampen bzw. Tagesschächte nicht berücksichtigt wird. Dies wird in Kapitel 8.5.7.1 erläutert.

Darüber hinaus bestehen Ungewissheiten bei der Modellierung, sogenannte Modellungewissheiten. Im Allgemeinen bestehen diese, unabhängig davon ob das Modell eindimensional oder mehrdimensional ist. Diese Ungewissheiten sind neben Parameter- und Datenungewissheiten oder Szenarienungewissheiten, welche in Kapitel 8.5.4 beschrieben werden, zu betrachten. Modellungewissheiten gehen die auf Vereinfachungen zur Darstellung des Systems zurück. Sie beinhalten unter anderem auch rechnerische Ungewissheiten in der numerischen Implementierung des verwendeten Modells, wie z. B. Ungewissheiten bezüglich seiner örtlichen und zeitlichen Diskretisierung. Um das Modell zu validieren und folglich Vertrauen in die Berechnungen zu schaffen, wurde die numerische Lösung mit einer analytischen Lösung verglichen (s. Anhang 3). Die Möglichkeit, numerischen Simulationen durch Abgleich mit analytischen Lösungen zu validieren, ist ebenfalls ein Vorteil von weniger komplexen 1D-Modellen, da für den Stofftransport in einem detaillierten geologischen 3D-Modell eine passende analytische Lösung nicht vorliegt.

Um das verwendeten 1D-Modell zur Berechnung des Radionuklidaustrags weiterzuentwickeln und Ungewissheiten zu reduzieren, bestehen verschiedene Möglichkeiten. Der derzeit in der Entwicklung und Erprobung befindliche Programmcode (TransPyRend) zur Abschätzung des Radionuklidaustrags aus den Wirtsgesteinen beinhaltet, wie im Anhang 3 ausgeführt, eine vereinfachte Behandlung der Prozesse Advektion, Diffusion, Sorption und Zerfall. Der Ansatz hierbei ist, diese Prozesse für den Transport in der Geosphäre zu betrachten, ohne die Rückhaltefähigkeit der Endlagerbehälter zu berücksichtigen. Weiterhin ist die Modellierung auf eine Raumdimension beschränkt. Im Folgenden werden einige mögliche Erweiterungen des Modells diskutiert, die in der Zukunft geprüft und ggf. umgesetzt werden sollen.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

- **Freisetzung von Radionukliden:** Mit der bisherigen Modellannahme, dass alle Radionuklide im Einlagerungsbereich sofort und vollständig aus den Behältern und der unmittelbaren Umgebung („Nahfeld“) freigesetzt werden, ergeben sich große Anfangskonzentrationen der Nuklide. Dies führt zu einer starken Überschätzung des tatsächlichen Nuklidtransports, insbesondere, da gleichermaßen auf die Einführung von Löslichkeitslimits verzichtet wurde. Zudem führt die Annahme dazu, dass eine besonders geringe Porosität des Wirtsgesteins einen unrealistisch geringen Einfluss auf das Ergebnis hat. Dies ergibt sich aus der Tatsache, dass sich das ursprüngliche Inventar auf den Porenraum verteilt. Eine geringere Porosität führt aufgrund der Modellannahme zu höheren Anfangskonzentrationen, da das gleiche Inventar auf eine geringere Menge an Porenflüssigkeit verteilt wird. Diese hohen Konzentrationen erhöhen die Transportrate, die ansonsten durch die geringe Porosität und die damit verbundenen niedrigen effektiven Diffusionskoeffizienten reduziert wird, in z. T. unrealistischer Weise. Eine mögliche Erweiterung des Modells beträfe daher ein geeignetes Modell für die Freisetzung aus den Behältern und die Löslichkeit. Ein solches Nahfeldmodell lässt sich etwa als zeitabhängiger Quellterm in den zu Grunde liegenden Gleichungen realisieren. Die Herausforderung besteht hierbei darin, bereits in diesem frühen Schritt des Verfahrens eine robuste Parametrisierung für solch ein Nahfeldmodell zu ermitteln.
- **Löslichkeit von Radionukliden:** Bislang wurde auf die Berücksichtigung von Löslichkeitsgrenzen verzichtet. Auch diese Annahme ist konservativ, führt aber für Teile des Nuklidinventars zu einer großen Überschätzung des gelösten Anteils im Porenwasser, was wiederum in einer Überschätzung des Nuklidaustrags resultiert. Eine strikte Behandlung von Lösungs- und Fällungsprozessen ist äußerst komplex, da viele unterschiedliche Einflussgrößen existieren. Eine vereinfachte Behandlung könnte ggf. im Rahmen des o.g. Nahfeldmodells erfolgen, sodass im Geosphärenmodell keine Berücksichtigung mehr nötig ist.
- **Heterogenität innerhalb geologischer Schichten:** Die hydrogeologischen- und Transporteigenschaften der einzelnen geologischen Schichten sind bislang als räumlich konstant über die jeweilige Schicht angelegt. Der intrinsischen Heterogenität innerhalb der Schichten wird damit nicht Rechnung getragen. Um sie angemessen zu berücksichtigen, wäre ggf. allerdings eine Modellierung in mehr als einer Raumdimension notwendig, was außerhalb des mit TransPyRend verfolgten Ansatz liegt, zudem erschwert die Datenlage in diesem frühen Schritt eine Parametrisierung. Bei gegebener Datenlage könnte etwa ein teufenabhängiger Kompaktionsgrad z. B. über eine mit der Teufe abnehmende Porosität innerhalb einer geologischen Schicht berücksichtigt werden. Darüber hinaus könnten die effektiven Transportparameter anhand der Verteilung der verschiedenen Fazies innerhalb einer Einheit berechnet werden, sofern diese bekannt ist, oder durch Hochskalierung der effektiven Parameterwerte anhand statistischer Verteilungen der Parameter innerhalb einzelner Einheiten.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

- **Transportchemie:** Das 1D-Modell betrachtet die detaillierte Transportchemie in vereinfachter Weise, so wird etwa bei der Zuordnung von Sorptions- und Diffusionskoeffizienten keine Rücksicht auf die Speziierung des jeweiligen Elements genommen. Eine detaillierte Betrachtung sollte die verschiedenen Spezies getrennt behandeln sowie den Einfluss des Grundwasserchemismus berücksichtigen (pH-Wert, Ionenstärke etc.). In den meisten Fällen werden im jetzigen Schritt für die Teiluntersuchungsräume keine detaillierten Kenntnisse der Grundwassereigenschaften in den relevanten Teufen vorliegen. In der jetzigen Phase wird die Auswirkung der Spezifizierung auf die Sorptionskoeffizienten berücksichtigt, indem ein großer Parameterbereich verwendet wird, der die Auswirkungen der Ungewissheiten in der Zusammensetzung des Porenwassers miterfasst.

8.5.10 Möglichkeit zur Ausweisung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs

Der sichere Einschluss und die Ausweisung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs ist grundsätzlich dann möglich, wenn kein Ausschlusskriterium zutrifft und alle Mindestanforderungen eingehalten werden. Sollte im Laufe der geowissenschaftlichen Charakterisierung und Erstellung der Geosynthese festgestellt werden, dass innerhalb eines Teiluntersuchungsraums (oder Bereichs eines Teiluntersuchungsraums) Mindestanforderungen nicht erfüllt sind oder ein Ausschlusskriterium erfüllt wird, besteht in diesem Gebiet nicht die Möglichkeit der Ausweisung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs.

Darüber hinaus erfolgen zwei Arbeitsschritte zur Bewertung der Möglichkeit zur Ausweisung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (§ 7 Abs. 6 Nr. 3 Buchst. e) EndlSiUntV). Diese umfassen einerseits die Betrachtung des Ergebnisses aus der Bewertung der Möglichkeit des sicheren Einschlusses (§ 7 Abs. 6 Nr. 3 Buchst. f) EndlSiUntV) und anderseits eine Betrachtung der zu erwartenden und ggf. abweichenden Entwicklungen. Das Vorgehen beider Bewertungen wird im Folgenden beschrieben.

8.5.10.1 Bewertung anhand der Möglichkeit des sicheren Einschlusses

Die Möglichkeit zur Ausweisung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs besteht nur dann, wenn gezeigt werden kann, dass der sichere Einschluss potenziell möglich ist. Dies bedeutet, dass neben den grundlegenden Anforderungen an einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich, welche aus den Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen hervorgehen, die Möglichkeit zur Ausweisung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs anhand Aspekt f) bewertet wird. Diese Bewertung der Möglichkeit zur Ausweisung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs mittels Aspekt f) erfolgt über die Kennzahl $\overline{I_M}$ (Kapitel 8.5.3). Mithilfe der Transportlänge, die notwendig ist, um $\overline{I_M} > 1$ einzuhalten, lässt sich die Mächtigkeit bestimmen, die ein Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion mindestens haben muss, sodass ein einschlusswirksamer Gebirgsbereich potenziell ausgewiesen werden kann. Ist die Mächtigkeit zu gering im Vergleich zur Transportlänge, so resultiert $\overline{I_M} < 1$ und die Möglichkeit zur Ausweisung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs ist nicht möglich. Wie in Kapitel 8.5.3 bereits ausgeführt, ist es zusätzlich jedoch notwendig, dass die Mächtigkeit, und damit d_{min}, über die Fläche des Teiluntersuchungsraums variiert. In diesem Fall wird räumlich geprüft welche Bereiche eines Teiluntersuchungsraums das Kriterium erfüllen können:

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

- Für Bereiche mit $\overline{I_M} > 1$, wird erwartet, dass ein einschlusswirksamer Gebirgsbereich ausgewiesen werden kann. Diese Bereiche des Teiluntersuchungsraums werden im weiteren Verfahren nach dem Ablaufdiagramm der rvSU (siehe Abbildung 6) weiter betrachtet.
- Für Bereiche mit $\overline{I_M} < 1$, wird erwartet, dass kein einschlusswirksamer Gebirgsbereich ausgewiesen werden kann. Diese Bereiche des Teiluntersuchungsraums werden im weiteren Verfahren nach dem Ablaufdiagramm der rvSU (siehe Abbildung 6) weiter betrachtet und eine Einstufung in Kategorie C erfolgt.

Bevor jedoch eine endgültige Zuweisung eines Teiluntersuchungsraums zur Kategorie C erfolgt ist zu überprüfen, ob der einschlusswirksame Gebirgsbereich ggf. durch geeignete überlagernde Lithologien erweitert werden kann.

8.5.10.2 Bewertung anhand der Betrachtung von Entwicklungen

Neben der quantitativen Betrachtung von Entwicklungen durch die Durchführung von Rechenfällen werden zur Bewertung der Möglichkeit zur Ausweisung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs die zu erwartenden und ggf. auch abweichenden Entwicklungen hinsichtlich Veränderungen des Wirtsgesteinsbereichs mit Barrierefunktion qualitativ betrachtet. Dazu werden je Teiluntersuchungsraum die untersuchungsraumspezifischen Entwicklungen herangezogen. Anhand einer fachlichen Diskussion dieser Entwicklungen wird geprüft, ob zu erwarten ist, dass innerhalb des Bewertungszeitraums die Mindestanforderungen zur Gebirgsdurchlässigkeit, Mächtigkeit und Tiefenlage erfüllt bleiben und keine begründeten Zweifel am Erhalt der Barrierewirkung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs bestehen (vgl. Abbildung 207). Da innerhalb eines Teiluntersuchungsraums Prozesse oder deren Auswirkungen räumlich variieren können, ist es möglich, dass in Bereichen eines Teiluntersuchungsraums die Mindestanforderungen über den Bewertungszeitraum vorrausichtlich erhalten bleiben, während in anderen Bereichen eine oder mehrere Mindestanforderungen voraussichtlich nicht eingehalten werden. Somit ist es möglich, dass aufgrund der Entwicklungen eine flächendifferenzierte Möglichkeit zur Ausweisung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs resultiert.

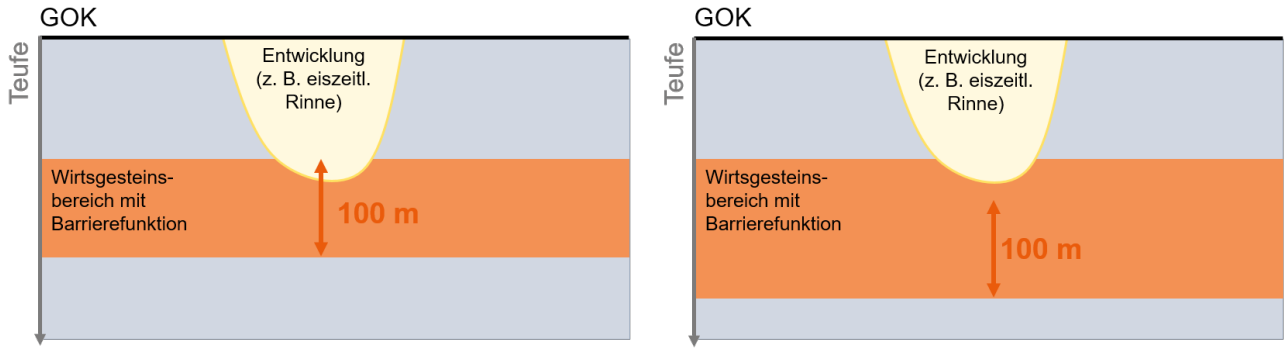


Abbildung 207: Unterschiedliche Einflüsse einer Entwicklung je nach betrachtetem Bereich innerhalb eines Teiluntersuchungsraums.
Die Variation der Mächtigkeit des Wirtsgesteins mit Barrierefunktion führt dazu, dass im linken Beispiel die zweite Mindestanforderung nicht eingehalten werden kann, wobei im rechten Beispiel trotz der Entwicklung ein Bereich mit der vorgesehenen Mindestmächtigkeit existiert.

Ist zu erwarten, dass eine Mindestanforderung im Bewertungszeitraum nicht erfüllt wird, kann kein einschlusswirksamer Gebirgsbereich ausgewiesen werden. Ist jedoch zu erwarten, dass alle Mindestanforderungen über den Bewertungszeitraum erhalten bleiben, besteht potenziell die Möglichkeit zur Ausweisung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs. In diesem Falle wird zusätzlich eine Information hinsichtlich bestehender Sicherheitsreserven, welche sich positiv auf die Robustheit des Systems auswirken können, geliefert. Diese Information kann dazu beitragen, geeignete Teiluntersuchungsräume oder Bereiche von Teiluntersuchungsräumen innerhalb des sicherheitsgerichteten Diskurses (vgl. Kapitel 9) weiter voneinander zu differenzieren.

8.6 Bewertung des Flächenbedarfs und der thermischen Verhältnisse

8.6.1 Einleitung und thematischer Hintergrund

Neben der Bewertung des sicheren Einschlusses der Radionuklide und der Beurteilung der Möglichkeit zur Ausweisung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs sind nach § 7 Abs. 6 Nr. 3 EndlSiUntV zusätzlich die thermischen Verhältnisse im Endlagersystem (§ 7 Abs. 6 Nr. 3 Buchst. c) EndlSiUntV) und der Flächenbedarf zur Realisierung eines Endlagerbergwerkes (§ 7 Abs. 6 Nr. 3 Buchst. d) EndlSiUntV) zu bewerten (Abbildung 208). Da die thermischen Verhältnisse im Endlagersystem und der Flächenbedarf zur Realisierung des Endlagerbergwerkes eng miteinander verbunden sind, ist es sinnvoll, diese beiden Aspekte gemeinsam zu betrachten.

In den folgenden Unterkapiteln 8.6.1.1 und 8.6.1.2 wird zunächst der Hintergrund zu beiden Aspekten separat erläutert. Die Methodik zur kombinierten Bewertung beider Aspekte wird in Kapitel 8.6.3 vorgestellt.

§ 7 Abs. 6 Nr. 3 EndlSiUntV zu bewertende Aspekt c) und d)

„in Verbindung mit der vorläufigen Auslegung des Endlagers sind für den Bewertungszeitraum anhand überschlägiger Abschätzungen und Analogiebetrachtungen folgende Aspekte zu bewerten:

[…]

c) die thermischen Verhältnisse im Endlagersystem,

d) der Flächenbedarf zur Realisierung des Endlagerbergwerkes,

[…]“

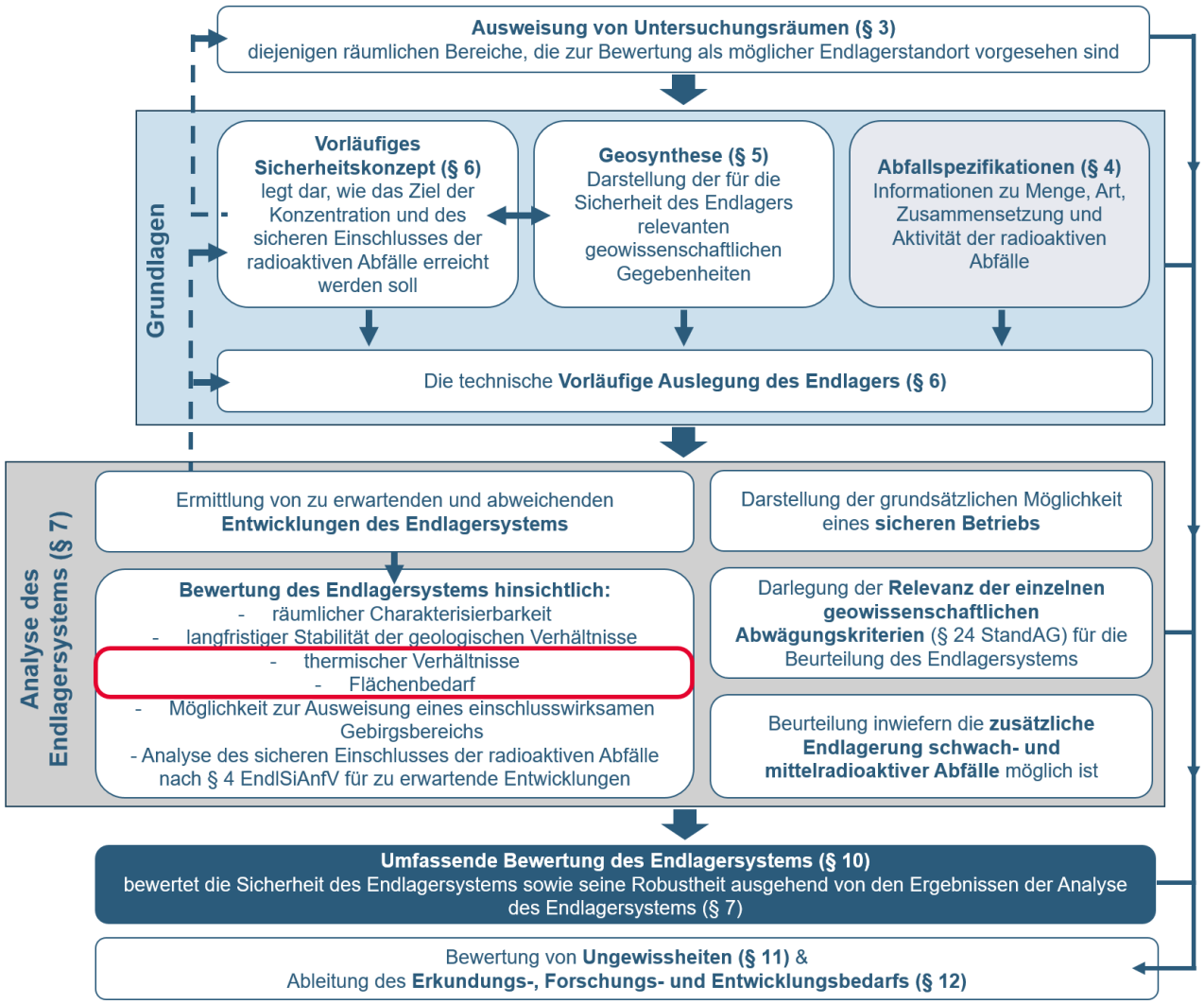


Abbildung 208: Ablauf der rvSV nach EndlSiUntV.

Die Bewertung des Endlagersystems, u. a. hinsichtlich der thermischen Verhältnisse und dem Flächenbedarf zur Realisierung des Endlagerbergwerkes, folgt auf die Ermittlung von zu erwartenden und abweichenden Entwicklungen.

8.6.1.1 Hintergrund zu den thermischen Verhältnissen im Endlagersystem

Um innerhalb des Endlagersystems die Sicherheit beschreiben und bewerten zu können, ist es wichtig, sowohl Ausgangszustand als auch mögliche Entwicklungen des Systems zu betrachten (vgl. Kapitel 8.2). Dies beinhaltet auch Kenntnisse zu den vorherrschenden und zukünftigen thermischen Verhältnissen im Endlagersystem. Infolge der Einlagerung der hochradioaktiven Abfälle wird aufgrund ihres radioaktiven Zerfalls Wärme im Endlagersystem frei, was zu einer Temperaturerhöhung im Einlagerungsbereich führt. Die genauen thermischen Verhältnisse hängen im Wesentlichen von den geothermischen Verhältnissen, den thermischen Eigenschaften des Wirtsgesteins und des Verfüllmaterials, sowie der Zerfallswärme und der Anordnung (Bracke et al. 2019) der endgelagerten radioaktiven Abfälle ab.

Die Temperaturänderung innerhalb des Endlagersystems beeinflusst weitere, parallel im Endlager ablaufende Prozesse, die für die Sicherheit des Systems relevant sind. Diese Prozesse umfassen hydraulische, mechanische, chemische, biologische und mineralogische Prozesse (beispielsweise Salzgruskompaktion, mikrobielle Aktivitäten oder Mineralumwandlungen), welche ebenfalls miteinander gekoppelt sein können. Neben den thermischen Einflüssen auf das Wirtsgestein und die Langzeitsicherheit, haben die thermischen Verhältnisse auch technische Auswirkungen. Erhöhte Temperaturen können z. B. die Betriebssicherheit des Endlagers beeinflussen[25]. Weiterhin wird in Hinblick auf die maximale Temperatur an der Außenfläche der Behälter vom StandAG Folgendes vorgegeben:

„*Solange die maximalen physikalisch möglichen Temperaturen in den jeweiligen Wirtsgesteinen aufgrund ausstehender Forschungsarbeiten noch nicht festgelegt worden sind, wird aus Vorsorgegründen von einer Grenztemperatur von 100 Grad Celsius an der Außenfläche der Behälter ausgegangen“ (§ 27 Abs. 4 StandAG)*

Entsprechend der Forderung des StandAG wird die anzuwendende Grenztemperatur basierend auf dem Stand von Wissenschaft und Technik weiter untersucht, wobei unterschiedliche temperaturrelevante Prozesse miteinbezogen werden müssen, um eine Anpassung der Grenztemperatur durchführen zu können. Derzeit wird die Festlegung auf einen bestimmten Wert der Grenztemperatur und nicht auf eine Wertespanne bevorzugt. Dabei kann die Grenztemperatur, je nach wissenschaftlichen Erkenntnissen, unterschiedlich für jedes Wirtsgestein, ggf. auch unterschiedlich je Standort (Standortregion) sein und im Laufe des Verfahrens weiter variiert werden.

Wie im Folgenden diskutiert wird, kann die Einhaltung einer Grenztemperatur dadurch gewährleistet werden, dass die Anordnung und Behälterbeladung der Endlagergebinde geeignet gewählt wird.

[25] Da sie voraussichtlich jedoch keinen nachteiligen Effekt auf die Betriebssicherheit im Sinne des Atomrechts und des Strahlenschutzrechts haben, werden, ist die Temperatur im Rahmen der rvSU kein Kriterium, dass in die Bewertung im Rahmen der Möglichkeiten des sicheren Betriebs mit eingeht.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

Dies beeinflusst den Flächenbedarf, weshalb die gemeinsame Betrachtung beider Punkte – thermische Verhältnisse und Flächenbedarf – sinnvoll ist.

Da die verschiedenen Wirtsgesteinstypen (Steinsalz, Tongestein, Kristallingestein, vgl. § 1 Abs. 3 StandAG) unterschiedliche Eigenschaften haben, ist es wichtig, die Wirtsgesteinstypen differenziert zu betrachten. Aufgrund der unterschiedlichen Eigenschaften sind für jeden Wirtsgesteinstyp verschiedene temperaturabhängige Prozesse relevant. Im Folgenden werden beispielhaft einige unterschiedliche Eigenschaften dargestellt.

Tongestein

Im Tongestein wird durch eine erhöhte Temperatur die Umwandlung von Tonmineralen beschleunigt. Hier ist vor allem die Umwandlung von Smektit zu Illit (Illitisierung) zu nennen, welche mit zunehmender Temperatur verstärkt stattfindet (Meleshyn et al. 2016). Da Illit eine geringere Kationenaustauschkapazität und Quellfähigkeit hat (Bracke et al. 2019, S.98), nehmen diese (positiv wirkenden) Eigenschaften des Tongesteins mit einer erhöhten Temperatur ab. Gleichzeitig nimmt jedoch auch die mikrobielle Aktivität ab, wodurch eine längere Behälterlebensdauer zu erwarten ist. Eine Übersicht der relevantesten temperaturabhängigen Prozesse im Tongestein ist in Abbildung 209 dargestellt.

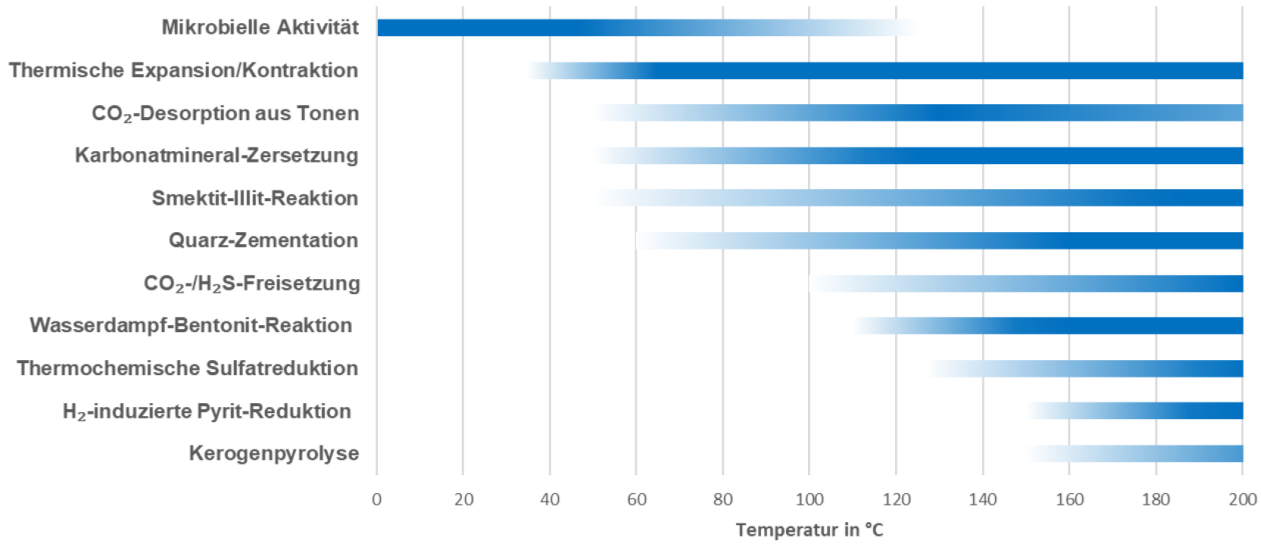


Abbildung 209: Auszug der ablaufenden Prozesse im Tongestein in Abhängigkeit von der Temperatur.
Die blaue Färbung kennzeichnet den Temperaturbereich, in dem der Prozess generell abläuft (Bracke et al. 2019).

Steinsalz

Steinsalz hat eine hohe Wärmeleitfähigkeit und spezifische Wärmekapazität (Meleshyn et al. 2016). Daher kann Zerfallswärme gut aufgenommen und abgeleitet werden. Darüber hinaus beeinflusst eine erhöhte Temperatur das Salzkriechen und Selbstheilungseffekte, beispielsweise von Klüften, positiv. Demgegenüber kann es durch den Eintrag von Wärme und bei Anwesenheit von Hydratsalzen zur thermischen Zersetzung und Kristallwasserfreisetzung kommen. Dies kann wiederum den

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

Transport von Radionukliden verstärken. Die wichtigsten temperaturabhängigen Prozesse in Steinsalz werden in Abbildung 210 gezeigt.

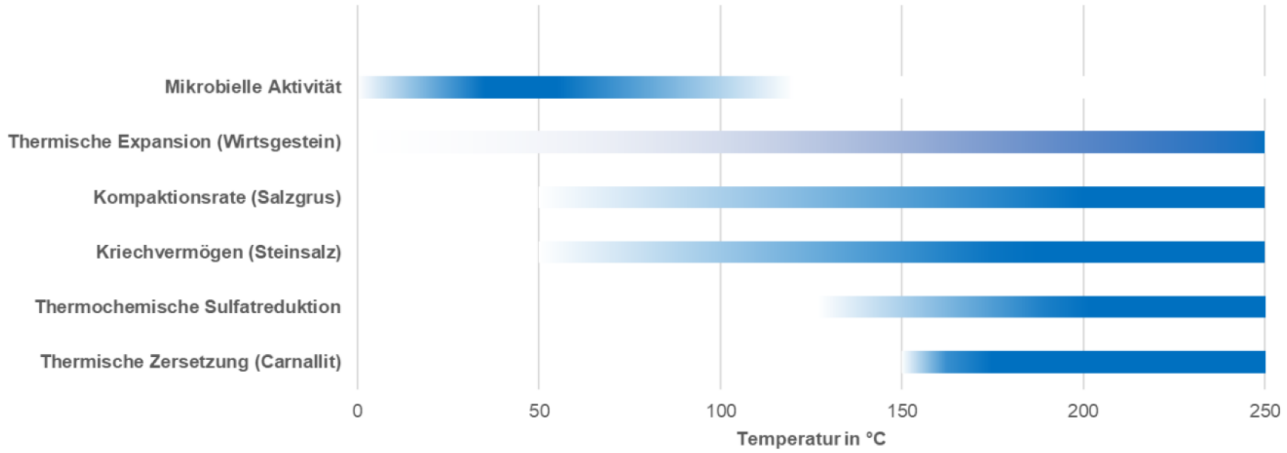


Abbildung 210: Auszug der ablaufenden Prozesse im Steinsalz in Abhängigkeit von der Temperatur.
Die blaue Färbung kennzeichnet den Temperaturbereich, in dem der Prozess generell abläuft (Bracke et al. 2019).

Kristallines Wirtsgestein

Durch ihre Genese haben kristalline Gesteine bereits hohe Temperaturen über lange Zeiträume in der Vergangenheit erfahren. Daher sind für das Wirtsgestein selber keine Veränderungen sicherheitsrelevanter Eigenschaften durch temperaturabhängige Prozesse zu erwarten. Jedoch werden wahrscheinlich tonhaltige Materialien (z. B. Bentonit) für die geotechnischen Barrieren verwendet. Für diese Materialien greifen die gleichen temperaturabhängigen Prozesse wie die oben allgemein für Tongestein beschriebenen Prozesse.

8.6.1.2 Hintergrund zur Betrachtung des Flächenbedarfs

Der Flächenbedarf eines Endlagers ist abhängig von verschiedenen Faktoren. Je nach Wirtsgestein erhöht sich der Flächenbedarf mit der Teufe und initialen Temperatur im Einlagerungsbereich (Kapitel 4.2). Verschiedene gebirgsmechanische Eigenschaften des Wirtsgesteins wirken sich auf die Endlagerauslegung und den Ausbau aus. Die Festigkeit von Tongestein ist beispielsweise geringer als die von Steinsalz oder Kristallingestein. Sie erfordert es, dass die Einlagerungsstrecken mit zunehmender Teufe (und damit verbundenem zunehmenden gebirgsmechanischen Druck) weiter auseinanderliegen liegen und somit die Pfeilergrößen zunehmen (Kapitel 4.2.7). Durch einen größeren Abstand bzw. größere Pfeiler zwischen den Einlagerungsstrecken erhöht sich der Flächenbedarf.

Darüber hinaus ist der Flächenbedarf abhängig von den vorherrschenden thermischen Verhältnissen. Um höhere geothermisch bedingte Umgebungstemperaturen zu kompensieren, müssen mit zunehmender Teufe auch größere Abstände zwischen den einzelnen Behältern oder eine andere Beladung gewählt werden. Dies führt dazu, dass mit zunehmender Umgebungstemperatur und in

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

Folge der größeren Abstände oder Anzahl an Endlagergebinden der Flächenbedarf eines Endlagers erhöht wird.

8.6.2 Die Berechnung des Flächenbedarfs

Zur Bewertung dieses Aspekts erfolgt eine rechnerische Abschätzung der Endlagerflächenbedarfe in Abhängigkeit der Entwurfsgrößen „Zielteufe des Endlagers“ und „initiale Temperatur im Einlagerungsbereich“. Die resultierende vorläufige Flächenbedarfsprognose ist spezifisch für eine vorläufige Endlagerauslegung. Eine detaillierte Beschreibung der Methodik zur Ermittlung der vorläufigen Flächenbedarfsprognosen ist Kapitel 4.2.8 zu entnehmen.

Für die wärmeentwickelnden Abfälle erfolgt die Abschätzung der notwendigen Flächenbedarfe mittels numerischer thermischer Berechnungen auf Basis der Finite-Elemente-Methode. Als Resultat dieser Berechnungen ergibt sich für jede Inventarart eine zulässige Behälterbeladung, die das Grenztemperaturkriterium erfüllt. Anschließend kann auf Grundlage des Abfallmengengerüstes die Anzahl an Behältern und darauf aufbauend die notwendige Fläche für die Einlagerungsfelder abgeschätzt werden. Durch die zusätzliche Berücksichtigung weiterer Flächenbedarfe, im Wesentlichen für Infrastrukturbereiche und auf Grund von vorgesehenen Sicherheitsabständen (siehe hierzu auch Kapitel 4.2.6.9), kann der kumulierte Endlagerflächenbedarf berechnet werden. Die resultierenden Flächenbedarfsprognosen für eine vorläufige Endlagerauslegung im Tongestein und Steinsalz können Kapitel 4.2.8.7 entnommen werden.

8.6.3 Kombinierte Bewertung von thermischen Verhältnissen (Aspekt c)) und Flächenbedarf (Aspekt d))

8.6.3.1 Allgemeines Vorgehen bei der kombinierten Bewertung

Wie im Kapitel 8.6.1 dargestellt, stehen die thermischen Verhältnisse in direktem Zusammenhang mit dem Flächenbedarf. Da der teufenabhängige Flächenbedarf sowohl abhängig von den gebirgsmechanischen Eigenschaften des Wirtsgesteins, als auch den thermischen Verhältnissen im Endlagersystem ist, ist eine kombinierte Bewertung der Aspekte c) „die thermischen Verhältnisse […]“ und d) „Flächenbedarf(s) zur Realisierung des Endlagerbergwerks“ sinnvoll.

Für die Bewertung des Flächenbedarfs des Endlagers ist im Wesentlichen das Platzangebot in der Zielteufe eines Teiluntersuchungsraums entscheidend. Anschaulich kann anhand einer Kennzahl $I_{T,z}$ gezeigt werden, wie häufig das potenzielle Endlager mit einer Fläche $A_{T,z}$, in einer bestimmten Teufe in das Wirtsgestein mit einer zusammenhängend verfügbaren Fläche A, hineinpasst. Dabei berücksichtigt $A_{T,z}$, wie in Kapitel 8.6.2 dargestellt, den Einfluss der thermischen Verhältnisse und die gebirgsmechanischen Eigenschaften des Wirtsgesteins. Je größer die Kennzahl $I_{T,z}$ ist, desto größer ist das Platzangebot im Vergleich zum Flächenbedarf und desto positiver wird der Aspekt bewertet:

$$I_{T,z} = A/A_{T,z} \tag{7}$$

Mit:

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

$I_{T,z}$ (-): Kennzahl für die Bewertung der Aspekte c) und d) (§ 7 Abs. 6 Nr. 3 Buchst. c) und d) EndlSiUntV), Bewertung des Flächenbedarfs in Abhängigkeit der gebirgsmechanischen Eigenschaften und der thermischen Verhältnisse.

A (m^2): Verfügbare zusammenhängende Fläche(n) im Teiluntersuchungsraum mit günstiger Mächtigkeit. Die günstige Mächtigkeit ist die Mächtigkeit, welche mindestens der Transportlänge d_{1Ma} entspricht.

$A_{T,z}$ (m^2): Flächenbedarf eines Endlagers in Abhängigkeit der gebirgsmechanischen Eigenschaften in der jeweiligen Teufe und der thermischen Verhältnisse

Z (m): Mittlere Teufe der Wirtsgesteinsformation

T (°C): Initiale Temperatur im Endlagerbereich

Die Bereiche des Teiluntersuchungsraums, in denen keine Ausweisung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs möglich ist (Kapitel 8.5.10), werden für die Bewertung der Aspekte c) und d) nicht weiter betrachtet, da in diesen Bereichen kein sicherer Einschluss zu erwarten ist. Die verfügbare Fläche A umfasst demnach nur die Fläche der Bereiche des Teiluntersuchungsraums, in welchen die Mächtigkeit des Wirtsgesteins mindestens der zweifachen bestmöglichen Einschätzung der berechneten Transportlänge d_{1Ma} (zzgl. Endlagerhöhe) entspricht (Kapitel 8.5.7). Der Wert für $A_{T,z}$ lässt sich in Abhängigkeit von Wirtsgestein, Temperatur und Teufe bestimmen.

Um die Kennzahl $I_{T,z}$ zu bestimmen wird zunächst ein Raster Z der mittleren Teufe des Teiluntersuchungsraums erstellt, wobei jedes Rasterelement i eine Fläche A_R abdeckt. Für jedes Rasterelement Z_i wird nun die Fläche des Elements durch den aus der zugehörigen Teufe und Temperatur berechneten potenziellen Flächenbedarfs geteilt. Die Kennzahl $I_{T,z}$ ergibt sich dann als Summe über alle Rasterelemente.

Über die Fläche des Teiluntersuchungsraums ändern sich mittlere Teufenlage, Temperatur und andere Eigenschaften, und daher auch der Flächenbedarf. Die Kennzahl $I_{T,z}$ enthält keine Aussage bezüglich dieser räumlichen Variabilität. Dies bedeutet, dass sich anhand der Kennzahl nicht ableiten lässt, ob sich die Teufe und somit auch der Flächenbedarf stark oder kaum über die gesamte zu betrachtende Fläche des Teiluntersuchungsraums ändert. Dieser Aspekt ist für die Planung eines Endlagers relevant, da im Allgemeinen homogene Teufen- und Temperaturbereiche zu bevorzugen sind. Um Informationen bezüglich Teufenänderungen und somit Information zur Variabilität des Flächenbedarfs zu erhalten, kann zusätzlich zur Ermittlung der Kennzahl $I_{T,z}$ eine Clusteranalyse durchgeführt werden.

Es ist hervorzuheben, dass die Kennzahl $I_{T,z}$ eine Gesamtaussage zu einem Teiluntersuchungsraum ermöglicht und somit den Vergleich verschiedener Gebiete miteinander unterstützt. Auf Grundlage der Kennzahl erfolgt kein Prüfschritt und somit keine Zuordnung in eine bestimmte Kategorie der umfassenden Bewertung. Die Kennzahl (bzw. Kennzahlen im Falle von mehreren, nicht zusammenhängenden Bereichen) und ggf. das Ergebnis der Clusteranalyse dient insbesondere als Information und Input bei der umfassenden Bewertung nach § 10 EndlSiUntV (vgl. Kapitel 9).

Zusätzlich zu der Berechnung einer Kennzahl werden Bereiche mit möglichst homogenen Werten des Flächenbedarfs identifiziert. Da der Flächenbedarf abhängig von Teufe und Temperatur ist, ermöglicht dies, innerhalb eines Teiluntersuchungsraums Rückschlüsse zu ziehen, wo sich räumlich zusammenhängende Bereiche mit ähnlicher Teufe und Temperatur zur Realisierung eines Endlagers befinden. Zu diesem Zweck wird vorrausichtlich eine Clusteranalyse durchgeführt dessen Analyse den zu betrachtenden Teiluntersuchungsraum in verschiedene Klassen mit ähnlichem Flächenbedarf einteilt. Jedes Rasterelement wird basierend auf seiner räumlichen Lage und den Flächenbedarfen seiner Nachbarn einer der definierten Klassen zugewiesen. Anhand dieser Zuweisungen lassen sich die Klassen räumlich in kartografischer Form darstellen. Dabei stellt jeder Farbbereich einen Bereich mit ähnlichem Flächenbedarf dar. Je größer der Bereich einer Farbe, desto größer der zu erwartende Homogenbereich. Da für die Endlagerung homogene Teufen und Temperaturen als positiv bewertet werden, sind im Allgemeinen große Bereich einer Farbe zu favorisieren. Das Ergebnis der Clusteranalyse soll nicht direkt zur Bewertung von Aspekt c) und d) beitragen, sondern mehr einen qualitativen Einblick in die Verbreitung von Homogenbereichen geben. Dennoch kann das Ergebnis aus der Clusteranalyse in die umfassende Bewertung (§ 10 EndlSiUntV) miteinfließen, um besonders geeignete Teiluntersuchungsräume bzw. besonders geeignete Bereiche innerhalb von Teiluntersuchungsräumen zu identifizieren.

8.6.3.2 Vorgehen bei Steinsalz in steiler Lagerung

Beim Wirtsgestein Steinsalz in steiler Lagerung ist die Lage homogener, geeigneter Internbereiche wichtig, wie z. B. der Staßfurt-Folge (z2) des Zechsteins. Diese geeigneten Bereiche sind abhängig vom Internbau, der in der aktuellen Phase des Verfahrens in der Regel nicht ausreichend bekannt ist. Für Steinsalz in steiler Lagerung, bzw. je nach Lage der z2 Bereiche, ist es wahrscheinlich, dass die vertikale Ausdehnung des Wirtsgesteins ebenso wichtig ist wie die horizontale Ausdehnung. Daher wird für das Wirtsgestein Steinsalz in steiler Lagerung ein anderer Ansatz zur Bewertung des Flächenbedarfs und der thermischen Verhältnisse verfolgt als für die großflächigen Teilgebiete.

Bei Salzstöcken besteht die Möglichkeit das Endlager in unterschiedlichen Teufen oder auch mehrsohlig zu realisieren. Daher kann es bei der Bewertung von Vorteil sein, das verfügbare Volumen des Salzstockes zu betrachten und nicht wie im vorigen Kapitel beschrieben die verfügbare Fläche. Dazu muss zunächst das geeignete, verfügbare Volumen identifiziert werden. In die Teufe wird dies von der bisher festgelegten maximalen Teufe von 1500 m begrenzt. In die Höhe wird das verfügbare Volumen durch die Mindestanforderung der minimalen Teufe von 300 m des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, sowie der vorausgesetzten 300 m mächtigen Salzschwebe zwischen Top der Salzstockstruktur und einschlusswirksamen Gebirgsbereich begrenzt. In der Horizontalen wird das Volumen u. a. von der Form und Größe des Salzstocks bestimmt. Darüber hinaus werden überhängende Bereiche des Salzstockes nicht zum vorhandenen Volumen gezählt, da in diesen Bereichen kein geeigneter Internbau zu erwarten ist. An dieser Stelle kann auch die Verwendung eines Puffers, als Abstand zu Deck- und Nebengebirge, in Erwägung gezogen werden. Dieser würde sich ebenfalls auf das vorhandene Volumen auswirken, aber da er bei allen Salzstöcken gleich ausfallen würde, würde dieser nicht zur weiteren Differenzierung von Salzstöcken untereinander helfen.

Ähnlich zu der Bewertung von stratiformen Wirtsgesteinen anhand der Kennzahl $I_{T,z}$ können nun auch Salzstöcke bewertet werden. Dafür kann das Volumen in horizontale Schnitte segmentiert werden, beispielsweise in Schnitte mit einer Höhe, welche der zu erwartenden Höhe eines Endlagers entspricht. Aus der Fläche des Segments und des teufen- und temperaturabhängigen Flächenbedarfs entsprechend der Teufe des Segments, kann dann das Verhältnis gebildet werden. Dies kann für jedes Segment wiederholt werden. Die resultierenden Größen können dann summiert werden um eine Kennzahl zur Bewertung des gesamten Teiluntersuchungsraums zu erhalten. Solch ein Vorgehen kann auf ähnliche Weise realisiert werden wie das Vorgehen der Positionsoptimierung, welches im Beispiel 93 gezeigt ist.

Ähnlich wie die Kennzahl $I_{T,z}$, wäre ein solche Kennzahl nicht sensitiv gegenüber dem Internbau oder der Charakterisierbarkeit des Salzstockes. Dafür kann sie jedoch eine globale Aussage bezüglich des Verhältnis zwischen Flächenbedarf und der tatsächlich verfügbaren Fläche, bzw. Volumen treffen, welche die weitere Differenzierung und Bewertung von Teiluntersuchungsräumen innerhalb der umfassenden Bewertung nach § 10 EndlSiUntV unterstützen kann.

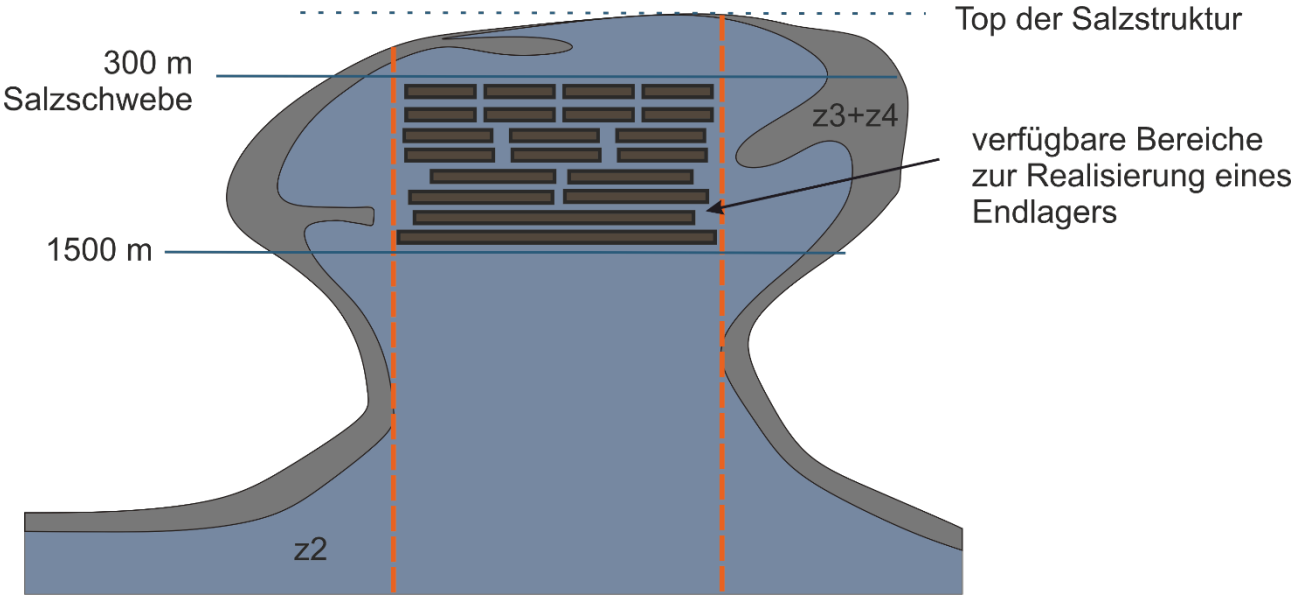


Abbildung 211: Beispielgrafik für die Flächenbedarfskennzahl in einem Salzstock (zur Darstellungszwecken in 2D)

8.6.4 Ungewissheiten bei der kombinierten Bewertung der thermischen Verhältnisse und des Flächenbedarfs

Wie bereits in Kapitel 8.6.3 beschrieben, erfolgt die Bewertung unter anderem anhand der Kennzahl $I_{T,z}$, welche sich aus dem Verhältnis der verfügbare Fläche und des Flächenbedarfs zusammensetzt. Dabei umfasst die verfügbare Fläche nur die Fläche der Bereiche des Teiluntersuchungsraums, in welchen die Mächtigkeit des Wirtsgesteins die Ausweisung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs erlaubt. Die verfügbare Fläche innerhalb eines Teiluntersuchungsraums kann jedoch auch aufgrund der Charakterisierung und Charakterisierbarkeit eingeschränkt sein. Es ist beispielsweise möglich, dass aufgrund der Charakterisierbarkeit die Ausweisung entsprechender homogenen, geeigneten Flächen für ein Endlager in manchen Bereichen oder Teiluntersuchungsräumen schwieriger ist als in anderen Bereichen. Bei kristallinem Wirtsgestein kann dies der Fall sein, da es aufgrund seiner inhärenten Klüftigkeit schwieriger zu charakterisieren ist. Auch im Steinsalz oder im Tongestein kann es je nach Lithologie und Genese heterogene Bereiche geben, welche die Ausweisung von entsprechenden Flächen erschweren oder die verfügbare Fläche einschränken. Insbesondere beim Steinsalz in steiler Lagerung können je nach Internbau günstige Bereiche begrenzt oder zerschnitten sein. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt ist der Internbau der Teilgebiete mit Steinsalz in steiler Lagerung in der Regel noch nicht ausreichend bekannt. Eine Bewertung der Charakterisierbarkeit hinsichtlich des Flächenbedarfs findet bei der Anwendung der Kennzahl $I_{T,z}$ keine Berücksichtigung, da sie als Teil der Bewertung von Aspekt a) „die räumliche Charakterisierbarkeit des Endlagersystems“ (Kapitel 6) bewertet wird. Potenzielle Kopplungen zwischen der Bewertung des Flächenbedarfs und der Charakterisierbarkeit fließen daher unter § 10 EndlSiUntV zusammen.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

8.7 Darstellung der Möglichkeit des sicheren Betriebs

Bestandteil der rvSU ist, wie in Abbildung 212 dargestellt, die Untersuchung der Betriebssicherheit des Endlagers.

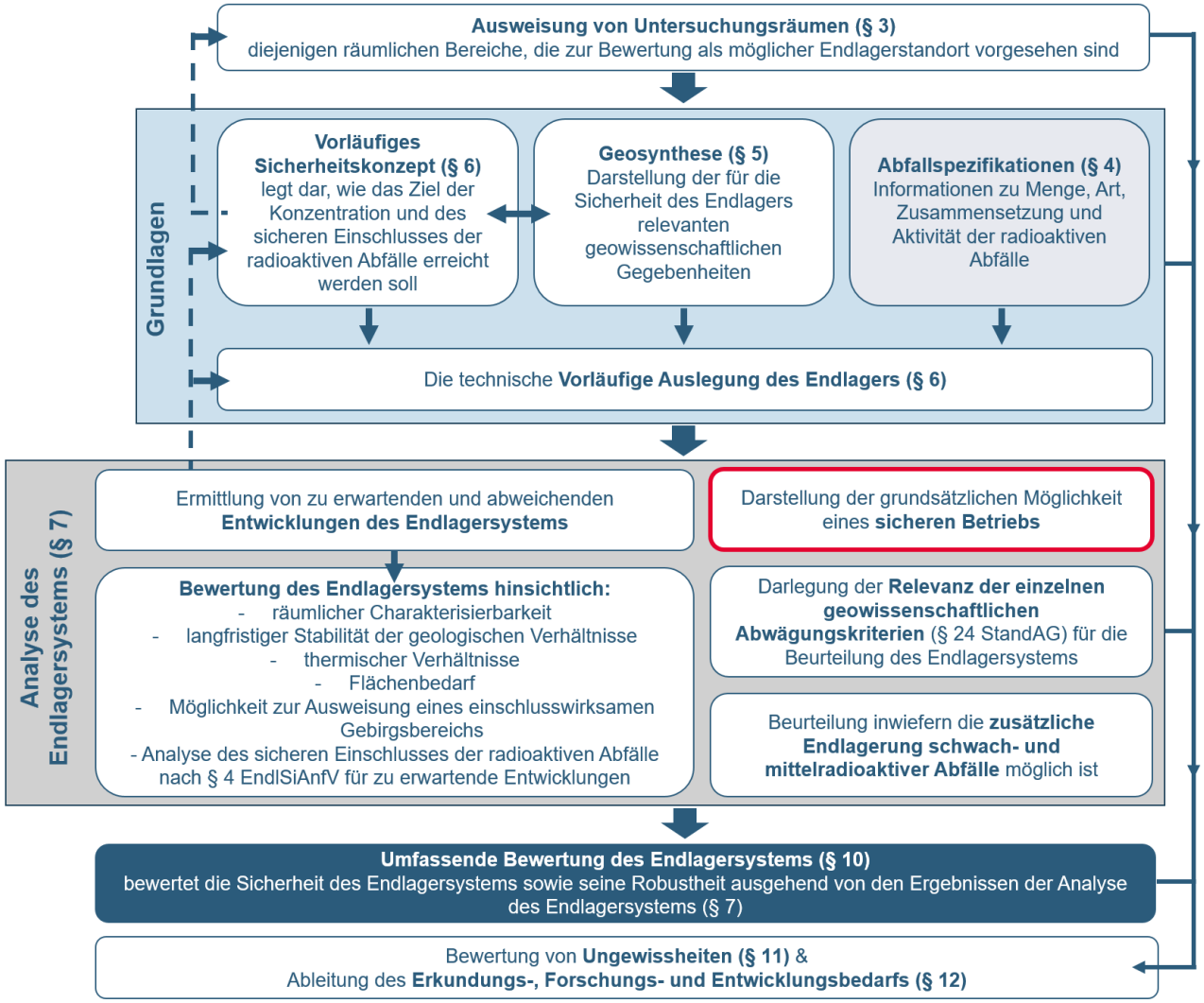


Abbildung 212: Ablauf der rvSU nach EndlSiUntV.
Die Darstellung der grundsätzlichen Möglichkeit des sicheren Betriebs ist Teil der Analyse des Endlagersystems in den rvSU.

Für die rvSU in Phase I Schritt II des Standortauswahlverfahrens ist gemäß § 7 Abs. 6 Nr. 4 EndlSiUntV „*die grundsätzliche Möglichkeit eines sicheren Betriebs darzustellen, jedoch keine vollständige betriebliche Sicherheitsanalyse durchzuführen*“. Hierbei sind in der Verordnung weder der Inhalt noch der Umfang dieser Darstellung näher spezifiziert. Beschrieben sind hingegen die Inhalte und der Umfang der Betriebssicherheitsuntersuchungen und -analysen für die Phasen II und III des Standortauswahlverfahrens sowie im Rahmen eines Genehmigungsverfahrens für ein Endlager. Die geforderte Bearbeitungstiefe für die Darstellung und Bewertung der Betriebssicherheit in den unterschiedlichen Phasen der Standortauswahl und der Genehmigung des Endlagers lässt sich wie folgt einordnen:

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

1. Eine vollumfängliche Bearbeitung der in der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung geforderten Betriebssicherheitsanalyse insbesondere gemäß § 17 EndlSiAnfV ist erst im Rahmen des Genehmigungsantrags für ein Endlager an einem ausgewählten Standort erforderlich.
2. Betriebliche Sicherheitsanalysen gemäß § 8 EndlSiUntV mit Abschätzungen zu Einwirkungen und Auswirkung von Ereignissen sind in den Phasen II und III der Standortauswahl mit zunehmender Detailtiefe erforderlich.
3. Die Darstellung der grundsätzlichen Möglichkeit eines sicheren Betriebs im Schritt 2 der Phase I stellt eine weitere Abstufung im Detaillierungsgrad dar. Eine vollständige betriebliche Sicherheitsanalyse ist dabei gemäß § 7 Abs. 6 Nr. 4 EndlSiUntV nicht durchzuführen.

Das Grundprinzip ist hierbei, dass der Betreiber bzw. Vorhabenträger für die Gewährleistung eines sicheren Betriebes verantwortlich ist. Bezogen auf Schritt 2 der Phase I des Standortauswahlverfahrens bedeutet dies, dass die BGE die vorläufige Auslegung des Endlagerbergwerks nach § 6 Abs. 4 EndlSiUntV definiert und nach § 7 Abs. 6 Nr. 4 EndlSiUntV begründet, ob bzw. dass die Sicherheit des Betriebs im Rahmen der Erkundung, des Betriebs und der Stilllegung grundsätzlich darzustellen ist und anschließend diese Darstellung zur Diskussion stellt.

8.7.1 Zusammenfassung der Methodik zur Betriebssicherheit im Rahmen der rvSU

Die Darstellung der grundsätzlichen Möglichkeit eines sicheren Betriebs erfolgt im Rahmen der rvSU für unterschiedlichen Aspekte der Betriebssicherheit in unterschiedlichen Detailierungsgraden. Für die nicht radiologischen (konventionellen) Aspekte der Betriebssicherheit, wie dem Arbeitsschutz, dem Bergrecht und dem Brandschutz, erfolgt eine ortsunabhängige Betrachtung der regulatorischen Grundlagen und der Ableitung entsprechender Maßnahmen als Anforderung für die vorläufige Endlagerauslegung nach § 6 Abs. 4 EndlSiUntV. Um die grundsätzliche Möglichkeit des sicheren Betriebs für die Betriebssicherheitsaspekte Strahlenschutz und Freisetzung radioaktiver Stoffe in den zu betrachtenden Untersuchungsräumen darzustellen, wird ein übergeordneter Katalog erstellt, der ortsunabhängig und für alle Wirtsgesteine und Endlagerkonzepte abdeckend mögliche Einwirkungen und Maßnahmen zur Erfüllung der an die Betriebssicherheit gestellten Anforderungen zusammenfasst. Im Anschluss werden aus diesem abdeckenden Katalog für jeden einzelnen Untersuchungsraum mögliche spezifische Einwirkungen identifiziert, sodass sich für jeden Untersuchungsraum die notwendigen Maßnahmen ergeben. Hierfür wurde das in Abbildung 213 skizzierte und im Folgenden beschriebene Bearbeitungskonzept erarbeitet.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

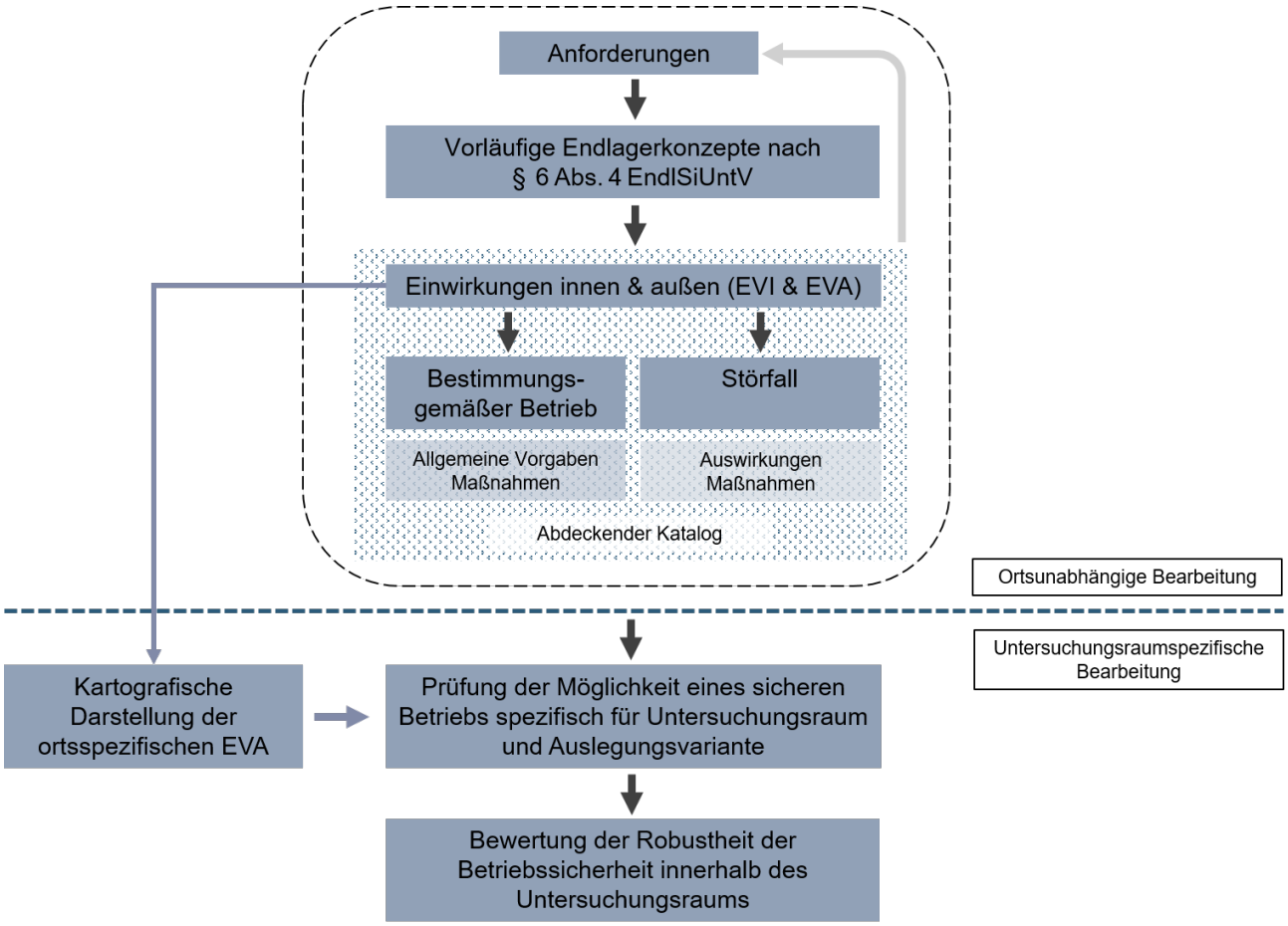


Abbildung 213: Zusammenfassende Darstellung der Methodik zur Darstellung der grundsätzlichen Möglichkeit eines sicheren Betriebs im Rahmen der rvSU nach § 7Abs. 6 Nr. 4 EndlSiUntV

Im ersten Schritt werden im Rahmen der ortsunabhängigen Bearbeitung umfassende Anforderungen an die Betriebssicherheit aus regulatorischen Randbedingungen, aus den Anforderungen an die Langzeitsicherheit und aus dem Sicherheitskonzept abgeleitet. Dabei werden unter anderem Anforderungen formuliert, die sich aus den nicht radiologischen Aspekten der Betriebssicherheit, wie dem Arbeitsschutz, Bergrecht und Brandschutz, ergeben. Hierzu werden die entsprechenden regulatorischen Vorgaben beschrieben und exemplarisch Maßnahmen abgeleitet. Die Anforderungen und Maßnahmen, die sich aus der Betrachtung dieser konventionellen Betriebssicherheitsaspekte ergeben, werden bei der Endlagerauslegung und der Planung der Betriebsabläufe berücksichtigt. Die Darstellung der grundsätzlichen Möglichkeit eines sicheren Betriebs in Bezug auf diese Aspekte erfolgt ortsunabhängig auf Grundlage der Annahmen, dass durch das Befolgen der regulatorischen Vorgaben ein sicherer Betrieb möglich ist. Eine detaillierte Betrachtung der nicht radiologischen Aspekte der Betriebssicherheit ist daher im Rahmen der rvSU nicht erforderlich und erfolgt unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen den Aspekten der Betriebssicherheit erst in Phase II des Standortauswahlverfahrens. Aufbauend auf den gestellten Anforderungen werden die gemäß Kapitel 4.2 entwickelten vorläufigen Endlagerkonzepte zusammengefasst, Systemskizzen der Endlagerkonzepte dargestellt und Teilsysteme in diesen identifiziert (Kapitel 8.7.2). Für die Erstellung

eines abdeckenden Katalogs mit dem Ziel der Betrachtung der Betriebssicherheitsaspekte Strahlenschutz und Freisetzung radioaktiver Stoffe (Kapitel 8.7.3) werden unter anderem für die Anlagenzustände des Endlagers („bestimmungsgemäßer Betrieb“ und „Störfall“) die Einwirkungen von innen (EVI) und von außen (EVA) auf die in Kapitel 8.7.2 beschriebenen Teilsysteme des Endlagers beschrieben. Als Einwirkungen werden nach BMUB (2015b) die *„[a]uf Einrichtungen einwirkende Kraft- und Verformungsgrößen oder Medien mit physikalischem, chemischem oder biologischem Einfluss oder eine Kombination derselben*“ definiert. Bei der Identifikation der EVA wird zwischen der Anlagensicherung und der Anlagensicherheit differenziert. EVA im Sinne der Anlagensicherheit werde im Rahmen der rvSU detailliert entsprechend der beschriebenen Methodik betrachtet. EVA im Sinne der Anlagensicherung dagegen umfassen Störmaßnahmen und sonstige Einwirkungen Dritter. Sie werden aufgrund des frühen Verfahrenszeitpunkts ausschließlich kurz beschrieben. Für alle Einwirkungen (EVI und EVA) werden unter Berücksichtigung der Endlagerkonzepte entsprechende Maßnahmen erläutert, um die im ersten Schritt zusammengestellten Anforderungen an die Betriebssicherheit zu erfüllen.

Bei der Beschreibung der Einwirkungen und Maßnahmen wird generell zwischen den übergeordneten Anlagenzuständen „bestimmungsgemäßer Betrieb“ und „Störfall“ unterschieden. Nach BMUB (2015b) ist der „bestimmungsgemäße Betrieb“ *„[d]er Betrieb, für den eine Anlage nach ihrem technischen Zweck bestimmt, ausgelegt und geeignet ist […]“.* Er umfasst damit die § 17 Abs. 1 Nr. 1 und 2 EndlSiAnfV genannten Anlagenzustände „Normalbetrieb“ und „anomaler Betrieb“ (Betriebsstörungen). Die Kategorie „Störfall“ umfasst die Anlagenzustände „Auslegungsstörfall“ und „auslegungsüberschreitender Unfall“ (§ 17 Abs. 1 Nr. 3 und 4 EndlSiAnfV). Neben Maßnahmen, die aus den Einwirkungen abgeleitet werden, werden bei der Beschreibung des bestimmungsgemäßen Betriebs zusätzlich allgemeine Maßnahmen und Vorgaben betrachtet, die sich nicht unmittelbar aus einer Einwirkung ableiten. Die identifizierten Einwirkungen bilden dann gemeinsam mit den formulierten Maßnahmen und allgemeinen Vorgaben einen abdeckenden Katalog.

Auf Grundlage des abdeckenden Katalogs wird mithilfe von Kartenmaterial (zu den ortsspezifischen EVAs, z. B. Karten zu Hochwasser) eine Prüfung der einzelnen Untersuchungsräume hinsichtlich der grundsätzlichen Möglichkeit eines sicheren Betriebs durchgeführt (Kapitel 8.7.4). Neben der Darstellung der grundsätzlichen Möglichkeit des sicheren Betriebs erfolgt in einem zweiten Schritt die Bewertung der Robustheit der Betriebssicherheit innerhalb des Untersuchungsraums (Kapitel 8.7.5). Die Bewertung der Robustheit der Betriebssicherheit im Untersuchungsraum erfolgt auf Grundlage der Betrachtung der ortsspezifischen EVA und den für diese Einwirkungen notwenigen Vorsorgemaßnahmen.

8.7.2 Vorläufige Endlagerkonzepte und Teilsysteme

Wie eingangs erläutert, werden zunächst die bei der vorläufigen Endlagerauslegung nach § 6 Abs. 4 EndlSiUntV erarbeiteten vorläufigen Endlagerkonzepte beschrieben und Systemskizzen referenziert bzw. angefertigt. Anschließend werden auf Grundlage der Endlagerkonzepte einzelne Teilsysteme des Endlagers definiert. Teilsysteme eines Endlagers sind dadurch gekennzeichnet,

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

dass die enthaltenen Bereiche und Komponenten ähnliche Hauptfunktionen und ähnliche Betriebsabläufe aufweisen. Zudem kann unter Umständen erwarten werden, dass die Folgen einer Einwirkung im Bereich eines Teilsystems auf die Betriebssicherheit des Endlagers vergleichbar sind, weshalb gleiche Sicherheitssysteme sowie technische und organisatorische Maßnahmen innerhalb eines Teilsystems betrachtet werden können. Darüber hinaus ist es erforderlich, das Endlager zusätzlich in Strahlenschutzbereiche gemäß § 52 StrlSchV zu gliedern. Eine solche Unterteilung in Strahlenschutzbereiche ist Teil der Endlagerauslegung. Grundsätzlich ist im Rahmen der Überprüfung der Betriebssicherheit des Endlagers zwischen den folgenden Endlagerteilsystemen zu differenzieren:

- Tagesanlagen (über Tage)
- Tageszugänge (über und unter Tage)
- Infrastrukturbereiche unter Tage
- Einlagerungsbereiche und Richtstrecken (unter Tage)

Das Teilsystem der Tagesanlagen umfasst alle übertägigen Komponenten des Endlagers. Nicht zum Teilsystem Tagesanlagen werden die Fördersysteme der Tageszugänge gezählt. Es wird allgemein zwischen dem kerntechnischen Bereich und dem Bereich des bergbaulichen Betriebs differenziert. Es gelten die im Rahmen der Endlagerauslegung definierten Strahlenschutzbereiche.

Das Teilsystem der Tageszugänge umfasst die Tageszugangsbauwerke sowie alle dafür vorgesehenen über- und untertägigen Fördersysteme. Bei der grundsätzlichen Bewertung der Betriebssicherheit des Teilsystems Tageszugänge werden nach gegenwärtigem Planungsstand sowohl die Erschließung des Endlagerbergwerks über Schächte als auch die Möglichkeit zur Verwendung von Rampen berücksichtigt, da zum jetzigen Zeitpunkt keine Festlegung zur Art der möglichen Tageszugänge getroffen wurde.

Das untertägige Teilsystem der Infrastrukturbereiche und Richtstrecken umfasst die Infrastrukturräume des Endlagers (z. B. Werkstätten zur Instandhaltung von Betriebsmitteln und Räume zu deren Lagerung). Bei diesen Hohlräumen sind deutlich längere Offenhaltungszeiten als in den Einlagerungsbereichen zu erwarten. Wie auch im Teilsystem des Einlagerungsbereichs ist zu beachten, dass entsprechend der vorläufigen Endlagerauslegung nach § 6 Abs. 4 EndlSiUntV eine zusätzliche Unterteilung in Strahlenschutzbereiche vorgenommen wird (siehe Kapitel 4.2).

Im Teilsystem der Einlagerungsbereiche werden Hohlräume zusammengefasst, die zur Einlagerung von Endlagergebinden aufgefahren und gemäß § 9 EndlSiAnfV nach erfolgter Einlagerung der Endlagergebinde schnellstmöglich wieder verschlossen werden. Dazu können je nach Endlagerkonzept Querschläge, Einlagerungsstrecken, Bohrlöcher und Bohrlochüberfahrungsstrecken gezählt werden. Zudem wird der Bereich zur Kalterprobung (Probebetrieb) des Endlagerbergwerkes ebenfalls diesem Teilsystem zugerechnet.

Für die Endlagerkonzepte werden anschließend generische Betriebsabläufe definiert, die eine wesentliche Basis der Darstellung und Bewertung der Betriebssicherheit bilden. Um eine abdeckende

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

Betrachtung zu ermöglichen, werden im Rahmen der Beschreibung auch alternative Betriebsabläufe, wie der gleisgebundene und gleisungebundene Transport, betrachtet.

8.7.3 Erstellung eines abdeckenden Katalogs

Im Rahmen der Erstellung des abdeckenden Katalogs zur Betrachtung der Betriebssicherheitsaspekte Strahlenschutz und Freisetzung radioaktiver Stoffe werden für alle ermittelten Endlagerkonzepte unter Berücksichtigung der angenommenen betrieblichen Abläufe alle EVI und EVA während der Errichtung, des Betriebs und der Stilllegung des Endlagers beschrieben. Anders als im Rahmen der Langzeitsicherheitsuntersuchung ist keine vollständige FEP-Entwicklung mit einer Methodik wie nach Wolf et al. (2020) durchzuführen. Stattdessen werden die Einwirkungen aus bestehenden Regelwerken und Veröffentlichungen (Veröffentlichungen werden in Tabelle 76 und Tabelle 77 genannt) unter Berücksichtigung der verwendeten Endlagerkonzepte zusammengetragen, wobei gleichlautende oder vergleichbare Einwirkungen (in Bezug auf Einwirkung, Geltungsbereich) aus verschiedenen Quellen nur einmal aufgeführt werden. Die Beschreibung der Einwirkungen erfolgt dabei für jedes der in Kapitel 8.7.2 genannten Teilsysteme des Endlagers separat. Es ist daher teilweise notwendig eine Einwirkung mehrfach für verschiedenen Teilsysteme zu beschreiben. EVA sind nach (BMUB 2015b) „*Einwirkung, die durch Umgebungsbedingungen, Naturereignisse oder sonstige zivilisatorisch bedingte Einwirkungen […] von außerhalb des Anlagengeländes hervorgerufen werden*“. EVI werden dagegen als „*Einwirkung resultierend aus Ereignissen auf dem Anlagengelände, innerhalb oder außerhalb von Gebäuden*“ definiert. Wechselwirkungen zwischen den Einwirkungskategorien werden im Rahmen der rvSU nicht berücksichtigt.

Bei der Identifikation der EVA wird zwischen der Anlagensicherung und der Anlagensicherheit differenziert. EVA im Sinne der Anlagensicherheit werde im Rahmen der rvSU entsprechend der beschriebenen Methodik detailliert betrachtet. Sie sind in Tabelle 76 beschrieben. EVA im Sinne der Anlagensicherung dagegen umfassen Störmaßnahmen und sonstige Einwirkungen Dritter (SEWD). Die EVA im Sinne der Anlagensicherung haben keinen Einfluss auf die Standortauswahl und werden daher nicht im Rahmen des Standortauswahlverfahrens berücksichtigt, sondern auf Grundlage von § 10 Abs. 7 EndlSiAnfV im Rahmen des späteren Genehmigungsverfahrens für das Endlager betrachtet. Die regulatorische Einfassung der Sicherung des Endlagers für hoch radioaktive Abfälle gegen Störmaßnahmen und sonstige Einwirkungen Dritter in eine Richtlinie ist noch nicht erfolgt. Bis zur Veröffentlichung einer solchen Richtlinie kann teilweise auf die „Richtlinie zur Sicherung von Zwischenlagern gegen Störmaßnahmen oder sonstige Einwirkungen Dritter (SEWD) - SEWD-Richtlinie Zwischenlager vom 4. Februar 2013“ zurückgegriffen werden. Die Anwendbarkeit dieser Richtlinie bleibt im Wesentlichen jedoch auf die übertägigen Anlagenteile beschränkt. Neben den genannten Richtlinien findet die „Richtlinie für den Schutz von IT-Systemen in kerntechnischen Anlagen und Einrichtungen der Sicherungskategorien I und II gegen Störmaßnahmen oder sonstige Einwirkungen Dritter (SEWD-Richtlinie IT)" Anwendung. Teil der Richtlinien ist auch die Beschreibung der entsprechenden Maßnahmen. Die Unterlagen sind als Verschlusssache deklariert und werden daher nicht eingehender beschrieben.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

Anschließend sind die Maßnahmen der Betriebssicherheit so zu gestalten, dass sie die Erfüllung der Anforderungen an die Betriebssicherheit unter Berücksichtigung aller relevanten Einwirkungen (Anlagensicherheit) für die jeweiligen Betriebsphasen und Teilsysteme des Endlagers gewährleisten.

Für den bestimmungsgemäßen Betrieb des Endlagers sind dementsprechend Präventionsmaßnahmen zu formulieren, um das Eintreten von Störfällen zu verhindern. Dazu sind neben allgemeinen Vorgaben zur Betriebssicherheit (z. B. Gesetze und untergesetzliche Regelwerke) und allgemeinen Maßnahmen, die sich nicht aus einzelnen Einwirkungen ableiten, auch die Einwirkungen (EVI und EVA) während der Betriebsabläufe zu berücksichtigen. Die Bearbeitung wird dabei ebenfalls entsprechend der Teilsysteme des Endlagers untergliedert. Über die Präventionsmaßnahmen hinaus werden Maßnahmen zur Betriebsüberwachung ermittelt, durch die ein Verlassen des bestimmungsgemäßen Betriebs erkannt werden kann, sodass frühzeitig Gegenmaßnahmen eingeleitet werden können. Bei der Beschreibung der Maßnahmen sind Analogieschlüsse zu Maßnahmen in vergleichbaren technischen Systemen möglich.

Neben der Ausweisung von Maßnahmen auf Grundlage der identifizierten und katalogisierten Einwirkungen sind hier auch allgemeine Präventivmaßnahmen zu nennen, die einen sicheren Betrieb gewährleisten. Dazu gehören beispielsweise Maßnahmen infolge allgemeiner Vorgaben und Erkenntnisse bestehender Betriebsstörungsanalysen, wie im Projekt KOSINA (Bertrams et al. 2015). So kann zusätzlich betrachtet werden, welche Betriebsstörungen sich unabhängig von den Einwirkungen ergeben können und welche Maßnahmen dagegen zu treffen sind. Ein Beispiel für diese Betriebsstörungen ist das Entgleisen eines Transportwagens unabhängig von einer zu besorgenden Einwirkung.

Kommt es infolge von EVI und/oder EVA zu Abweichungen vom bestimmungsgemäßen Betrieb (Störfall), werden zunächst die Auswirkungen der aus den Einwirkungen resultierenden Abweichungen vom bestimmungsgemäßen Betrieb bezüglich der Betriebs- und Langzeitsicherheit beschrieben. Dabei sind die erarbeiteten generischen Betriebsabläufe zu berücksichtigen. Auch hier ist wieder die Untergliederung in die Teilsysteme des Endlagers zu beachten. Bei der Darstellung der Auswirkungen ist die Wahl einer angemessenen Detailtiefe unter Verzicht auf die Berücksichtigung von Wechselwirkungen anzunehmen.

Ausgehend von den Einwirkungen und deren Auswirkungen werden Maßnahmen ermittelt, die im Fall eines Störfalls dazu dienen das Endlager wieder in einen bestimmungsgemäßen Betrieb zu überführen bzw. die Auswirkungen der Abweichungen vom sicheren Betrieb im Fall eines auslegungsüberschreitenden Unfalls geringzuhalten. Haben bestimmte Einwirkungen in unterschiedlichen Endlagerkonzepten unterschiedliche Auswirkungen und/oder einzelne Maßnahmen sind zu spezifizieren, werden sie für die unterschiedlichen Endlagerkonzepte differenzieret betrachtet.
Ausgehend von dem in diesem Kapitel beschriebenen Vorgehen zur Erstellung eines abdeckenden Katalog zur Betrachtung der Betriebssicherheitsaspekte „Strahlenschutz und Freisetzung radioaktiver Stoffe“ werden in Beispiel 101 fünf ausgewählte Einwirkungen exemplarisch bearbeitet.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

Beispiel 101: Exemplarische Detailbearbeitung der Aspekte „Strahlenschutz und Freisetzung radioaktiver Stoffe“ des abdeckenden Katalogs Betriebssicherheit für fünf ausgewählte Einwirkungen

Abdeckender Katalog Betriebssicherheit – Beispielbearbeitung einzelner Einwirkungen

Nachfolgend erfolgt eine exemplarische Bearbeitung von fünf Einwirkungen. Die Auswahl der Beispiele erfolgte abdeckend in Bezug auf die Anlagenzustände, die Teilsysteme und die Art der Einwirkung.

Folgende fünf Einwirkungen sind ausgewählt worden:

1. Ausfall Stromversorgung (EVA-01 und EVI-11)
2. Gebindekollision (EVI-07)
3. Flugzeugabsturz zufällig (EVA-08)
4. Hochwasserereignisse (EVA-11)
5. Versagen des Ausbaus (EVI-25)

In den nachfolgenden Beschreibungen werden auch Auswirkungen auf Schutzziele betrachtet, wobei ausschließlich atom- und strahlenschutzrechtliche Schutzziele im bestimmungsgemäßen Betrieb (nachfolgend: Schutzziele) auf Grundlage von § 1 Nr. 2 AtG und § 8 StrlSchG berücksichtigt worden sind.

<u>Ausfall Stromversorgung (EVA-01 & EVI-11)</u>

Unter „Ausfall Stromversorgung“ sind zwei Einwirkungen eingeordnet:

1. Vollständiger Ausfall der Netzeinspeisung seitens des (externen) Energieversorgungsunternehmens. Hierbei handelt es sich um eine Einwirkung von außen (EVA). Dies kann z. B. der Ausfall einer Zuleitung sein.
2. Ausfall der Stromversorgung im gesamten Endlagerbetrieb oder in Teilen des Endlagers durch Versagen von Anlagen, Systemen und Komponenten (ASK) der Stromversorgung des Endlagers, z. B. von Transformatoren, Schaltanlagen und Regeleinrichtungen. Hierbei handelt es sich um eine Einwirkung von innen (EVI).

Von der Einwirkung können alle Teilsysteme bzw. Abläufe des Endlagers betroffen sein, die mit elektrischer Energie betrieben werden. Dieselbetriebene ASK sind von dieser Einwirkung nicht betroffen.

Der Ausfall der Stromversorgung in den Teilsystemen des Endlagers, in denen mit Gebinden umgegangen wird, führt zum Zustand „anomaler Betrieb“. Im anomalen Betrieb werden die atomrechtlichen und strahlenschutzrechtlichen Schutzziele für den bestimmungsgemäßen Betrieb weiterhin eingehalten. Es werden jedoch Maßnahmen eingeleitet, die der Beseitigung der aufgetretenen Störung dienen (in diesem Fall: Stromausfall) und gleichzeitig Maßnahmen ergriffen, um die Schutzziele des bestimmungsgemäßen Betriebs einzuhalten. Beispielhaft sei

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

Abdeckender Katalog Betriebssicherheit – Beispielbearbeitung einzelner Einwirkungen

die Handhabung von Gebinden mit einem Kran genannt: tritt ein Stromausfall ein, während ein Gebinde an einem Kran angeschlagen ist, so ist die Gebindeintegrität weiterhin gesichert, da keine Beschädigung erfolgt. Um jedoch sicherzustellen, dass der Störfall „Absturz eines Gebindes“ nicht eintritt, würde in einem solchen Fall das Gebinde unterbaut (abgestützt) werden oder aber der Kran derart ausgelegt werden, dass das Gebinde auch ohne elektrische Stromversorgung über das Endlager-Betriebsnetz sicher abgelassen werden könnte. Unabhängig von dem Ergreifen dieser präventiven Maßnahmen, erfolgt die Auslegung von Kran und Anschlagmitteln derart, dass das Gebinde auch im angehobenen Zustand bei Stromausfall nicht abstürzen würde.

Durch die Berücksichtigung der im Folgenden genannten Präventionsmaßnahmen bei der Auslegung der Anlagen wird durch den Vorhabenträger Sorge getragen, dass hinsichtlich des Ausfalls von Stromversorgungseinrichtungen keine Arbeits- und Betriebsabläufe vorhanden sind, die zu einer Beschädigung der Gebinde durch Stromausfall führen könnten.

Eine Gefährdung der atomrechtlichen und strahlenschutzrechtlichen Schutzziele für den bestimmungsgemäßen Betrieb wird dadurch ausgeschlossen.

Die Stromversorgung von sicherheitstechnisch relevanten Anlagen, Systemen und Komponenten (wie z. B. Brandschutzeinrichtungen, Strahlenschutzeinrichtungen, Leittechnik), die von einem Stromausfall betroffen sein könnten, wird bei einem Stromausfall durch Netz-Ersatzanlagen weiterhin gewährleistet.

Maßnahmen zur Prävention umfassen die Auslegung der Stromversorgung gemäß den relevanten betrieblichen Anforderungen des Endlagers nach KTA, DIN-VDE, DIN, ElBergV, IEC und ggf. sonstiger einschlägiger, gültiger Regelwerke. Insbesondere sind Kriterien wie ausreichende Dimensionierung z. B. der Hebezeuge (siehe Beispiel Kran), Berücksichtigung der Umgebungsbedingungen (insbesondere unter Tage relevant), Einsatz betriebsbewährter bzw. typgeprüfter Komponenten, Einsatz wartungsarmer Komponenten oder Fernüberwachung der ASK relevant.

Neben den technischen Auslegungsanforderungen gemäß der vorgenannten Regelwerke wird die Betriebssicherheit auch durch organisatorische Maßnahmen im Rahmen von planmäßigen Instandhaltungsmaßnahmen sichergestellt. Diese zur Überwachung zählenden Maßnahmen umfassen nach DBE TEC (1998) Maßnahmen wie regelmäßige Inspektion, wiederkehrende Prüfungen (WKP), Wartungen oder weitere Überprüfungen durch fachkundige (Aufsichts-)Personen und Sachverständige, mit denen die Sicherheit gewährleistet wird.

Der Ausfall der Stromversorgung führt zu einer Unterbrechung des betroffenen Betriebsablaufes. Abweichungen vom bestimmungsgemäßen Betrieb liegen nicht vor.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

Abdeckender Katalog Betriebssicherheit – Beispielbearbeitung einzelner Einwirkungen

Der bestimmungsgemäße Betrieb ist jederzeit eingehalten. Da die Auslegung des Endlagers als Ganzes nach dem im Folgenden beschriebenen Stand der Technik erfolgen wird, ist sichergestellt, dass während des anomalen Betriebs keine Schutzziele des Atomrechts und Strahlenschutzrecht für den bestimmungsgemäßen Betrieb verletzt werden. Die Betrachtung solcher Einwirkungen erfolgt bereits bei der Planung des Endlagers und passende Kompensationsmaßnahmen werden festgelegt. Neben organisatorischen Kompensationsmaßnahmen sind bereits bei heutigem Stand der Technik insbesondere (technische) ASK verfügbar und erprobt, die als Netz-Ersatzanlagen beispielsweise folgende ASK umfassen können:

- Diesel-Aggregate, die bei einem Stromausfall (ggf. erst nach einer vordefinierten Zeitdauer) die Ersatzstromversorgung vorab definierter Anlagen, Systeme und Komponenten übernehmen. Die Ersatzstromversorgung kann auf mehrere Tage ausgelegt werden und Teile des Endlagers oder bedarfsweise auch das gesamte Endlager mit Strom versorgen.
- Anlagen der unterbrechungsfreien Stromversorgung [USV] werden eingesetzt, um bei einem Ausfall (und in der Anlaufphase) der Dieselanlagen ausgewählte Verbraucher während eines definierten Zeitraums (abhängig von der Dimensionierung) mit elektrischer Energie zu versorgen.
- Zentral vorgehaltene Batterien, die z. B. für einige Stunden bei Ausfall des Endlager-Betriebsnetzes und bis zum Hochlaufen Dieselaggregate in Teilbereichen direkt die Versorgung von beispielsweise vorgesehenen Sicherheitsleuchten, Hinweistransparenten und Schließmechanismen übernehmen.

Um zum Normalbetrieb zurückzukehren sind im Falle eines Stromausfalls sowohl als EVA wie auch als EVI die jeweils zuständigen Instandsetzungsmannschaften in der Lage, binnen kurzer Zeit die Schadensursache zu beseitigen und die Stromversorgung wiederherzustellen.

<u>Gebindekollision (EVI-07)</u>

Unter der Einwirkung Gebindekollision wird jedes mechanische Einwirken auf ein Gebinde verstanden, das durch den unmittelbaren Anprall eines Gebindes an einem Hindernis oder die Kollision eines beladenen Transportmittels mit einem Hindernis entsteht und das nicht unter der Einwirkung „Absturz“ (vertikaler Absturz) geführt wird.

Von der Einwirkung können alle Teilsysteme des Endlagers betroffen sein, in denen Gebinde gehandhabt werden.

Durch die Einwirkung Gebindekollision wird im betroffenen Teilsystem und ggf. im gesamten Endlager der Zustand „Störfall“ erreicht werden, weil die Barrierewirkung der Gebinde nicht mehr intakt sein könnte. Z. B. könnten durch die mechanische Lasteinwirkung auf ein Endlagergebinde ggf. radioaktive Stoffe freigesetzt werden.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

Abdeckender Katalog Betriebssicherheit – Beispielbearbeitung einzelner Einwirkungen

Eine Gefährdung der atomrechtlichen und strahlenschutzrechtlichen Schutzziele für den bestimmungsgemäßen Betrieb kann nicht ausgeschlossen werden.

Als Präventionsmaßnahmen zur Verhinderung des Eintretens der beschriebenen Einwirkung kommen eine entsprechende technische Auslegung (Stoßdämpfer, Geschwindigkeitsbegrenzung, Kollisionserkennung etc.) sowie abdeckende Betriebsanweisungen (z. B. Verkehrsführung) und entsprechende Personalqualifikation in Anlehnung an die einschlägigen Regelwerke in Betracht.

Als Überwachungsmaßnahmen werden wiederkehrende Prüfungen (WKP) aller entsprechenden Hebezeuge und Transportmittel vorgesehen. Weiter kann eine Verkehrslenkung mit entsprechender Überwachung geboten sein.

Durch die Einwirkung Gebindekollision wird der Betriebsablauf unterbrochen. Bis zur Klärung des Gebindezustands sind zur Einhaltung der Schutzziele weitere Maßnahmen erforderlich, die die radiologischen Auswirkungen vermeiden oder begrenzen, sofern sie zu besorgen sind. Hierbei sind nach dem Ereignis gemäß zu erstellender Anweisungen durch entsprechend geschultes Personal Prüfungen vorzunehmen, die geeignet sind festzustellen, ob die Schutzziele für den bestimmungsgemäßen Betrieb verletzt worden sind.

Mögliche Abweichungen vom bestimmungsgemäßen Betrieb unterstellen das Szenario der Freisetzung radioaktiver Stoffe aus dem betroffenen Gebinde. Aus diesem Szenario ergeben sich in den Betrachtungen technische und organisatorische Maßnahmen zur Vermeidung oder Minimierung der Auswirkungen auf die Schutzgüter. Solche technischen und organisatorischen Maßnahmen dienen dazu, den Betrieb nach dem Ereignis „Gebindekollision“ in der Störfallbehandlungsphase in einen sicheren Anlagenzustand zu überführen. Technische und organisatorische Maßnahmen, die abweichend vom bestimmungsgemäßen Betrieb ergriffen werden, umfassen beispielsweise die gezielte Unterbrechung der Be- und Entlüftung in den betroffenen Teilsystemen (Verhinderung/Begrenzung Freisetzung radioaktiver Stoffe im Kontrollbereich sowie Verhinderung/Begrenzung der Aktivitätsfreisetzung in die Umgebung), die Anweisung im Alarmfall persönliche Schutzausrüstung (Schutzmasken, Selbstretter unter Tage) anzulegen (Verhinderung/Begrenzung Inkorporation des Betriebspersonals), die Anweisung das betroffene Teilsystem zu räumen (Verhinderung/Begrenzung der Kontamination des Betriebspersonals). Die weiteren Maßnahmen werden durch den SSB (Strahlenschutzbeauftragter) festgelegt. Auf dieser Basis legt der Betriebsführer das weitere Vorgehen fest, sodass das betroffene Teilsystem in einen sicheren Zustand überführt wird, in dem die Schutzziel-Einhaltung für den Bestimmungsgemäßen Betrieb wieder gewährleistet ist.

Nach Erreichen des sicheren Zustands sind in der Störfallfolgenbehandlungsphase, die ggf. ereignisspezifisch notwendigen Dekontaminations- sowie Instandhaltungsarbeiten durchzuführen. Ziel der zu ergreifenden Maßnahmen in der Störfallfolgenbehandlungsphase ist es,

Abdeckender Katalog Betriebssicherheit – Beispielbearbeitung einzelner Einwirkungen

ausgehend von einem sicheren Anlagenzustand nach Umsetzung der Maßnahmen in den bestimmungsgemäßen Betrieb eintreten zu können.

a) Wenn festgestellt wird, dass keine Schutzziele für den bestimmungsgemäßen Betrieb verletzt sind und keine sonstigen Gefahren bestehen, können Maßnahmen ergriffen werden, um in den unterbrochenen Betriebsablauf zurückzukehren und die ggf. entstandenen Schäden zu beseitigen.

b) Wenn festgestellt wird, dass der bestimmungsgemäße Betrieb durch die Einwirkung verlassen wurde, sind entsprechend der gültigen betrieblichen Regelungen oder bereits in Abstimmung mit der zuständigen Aufsichtsbehörde weitere Maßnahmen zu veranlassen. Eine mögliche Maßnahme könnte z. B. eine erneute Prüfung der Dichtheit des betroffenen Gebindes sein.

<u>Flugzeugabsturz zufällig (EVA-08)</u>

Die Einwirkung betrachtet den zufälligen Flugzeugabsturz auf das Endlager im Sinne des RS-Handbuch 3-53 (BMU 1997), RSK-Leitlinien für Druckwasserreaktoren Abschnitt 19.1 (RSK 1996).

Von der Einwirkung können alle Bereiche der Tagesanlagen oder Tageszugänge betroffen sein.

Gemäß ESK (2013) ist die Einwirkung als auslegungsüberschreitendes Ereignis zu bewerten.

Das Eintreten der Einwirkung kann weder durch Maßnahmen zur Prävention oder Überwachung ausgeschlossen werden. Durch entsprechende bauliche Auslegungen der übertägigen Anlagenteile können die potenziellen Auswirkungen reduziert und begrenzt werden. Die Präventionsmaßnahme könnte z. B. darin bestehen, dass die Gebäudehülle derart dimensioniert worden ist, dass die angenommenen Lasteinwirkungen sicher abgetragen werden können.

Durch die Einwirkung Flugzeugabsturz wird der gegenwärtige Betriebsablauf unterbrochen und durch den unklaren Zustand bezüglich der Einhaltung der Schutzziele für den bestimmungsgemäßen Betrieb sind weitere Maßnahmen erforderlich.

Potenziell resultieren aus der Einwirkung mechanische und thermische Lasten. Diese Lasten können zu einer Verhinderung der Wärmeabfuhr der Gebinde z.B. durch Verschüttung führen oder zu einer Undichtigkeit der Gebinde mit einer möglichen Freisetzung radioaktiver Stoffe.

Nach Abschluss der Einwirkung sind als erstes unter Berücksichtigung von Strahlenschutzmaßnahmen Maßnahmen zur Brandbekämpfung im Fall eines Feuers durchzuführen. Nach dem erfolgreichen Abschluss der Brandbekämpfung ist durch eine Inspektion festzustellen ob und welche Schäden an den Tagesanlagen entstanden sind.

Abdeckender Katalog Betriebssicherheit – Beispielbearbeitung einzelner Einwirkungen

Sofern Gebinde durch die Einwirkung betroffen sind und damit möglicherweise Schutzziele für den bestimmungsgemäßen Betrieb verletzt sein könnten, sind gemäß zu erstellender Anweisungen/ Konzepte durch entsprechend geschultes Personal Prüfungen vorzunehmen die geeignet sind festzustellen ob die Schutzziele für den bestimmungsgemäßen Betrieb verletzt worden sind.

a) Wenn festgestellt wird, dass keine Schutzziele verletzt sind und keine sonstigen Gefahren bestehen, können Maßnahmen ergriffen werden um in den unterbrochenen Betriebsablauf zurückzukehren und die ggf. entstandenen Schäden zu beseitigen.

b) Wenn festgestellt wird, dass der bestimmungsgemäße Betrieb verlassen wurde, sind entsprechend der gültigen betrieblichen Regelungen oder bereits in Abstimmung mit der zuständigen Aufsichtsbehörde weitere Maßnahmen zu veranlassen.

Unabhängig von der Bekämpfung der Auswirkung sind die vorgehaltenen Einrichtungen zur Überwachung der Umgebung zu kontrollieren und ggf. sind hier weitere Maßnahmen in Absprache mit den zuständigen staatlichen Stellen zu veranlassen.

<u>Hochwasserereignis (EVA-11)</u>

Die Einwirkung Hochwasser betrachtet den Zustand, dass auf dem Gelände des Endlagers der Wasserzufluss größer ist als der Wasserabfluss und sich infolgedessen auf dem Gelände ein Rückstau bildet (Anstieg des Wasserstandes). Für die Bestimmung des standortspezifischen Bemessungshochwassers ist die ESK Leitlinie zum Schutz von Endlagern gegen Hochwasser anzuwenden (ESK 2018).

Von der Einwirkung können alle Bereiche der Tagesanlagen oder Tageszugänge betroffen sein. Eine Betrachtung der untertägigen Teilsysteme erfolgt im Rahmen der Einwirkung Flutung Grube (EVA-09).

Durch die alleinige Einwirkung Hochwasser kann im Endlager, vorbehaltlich einer standortspezifischen dem gültigen Regelwerk entsprechenden Auslegung, nur der Zustand „anomaler Betrieb“ erreicht werden.

Durch die Berücksichtigung der im Folgenden genannten Präventionsmaßnahmen bei der Auslegung der Anlagen und geeignete Standortauswahl für die übertägigen Anlagen wird durch den Vorhabenträger Sorge getragen, dass keine Arbeits- und Betriebsabläufe vorhanden sind, die zu einem Verlassen des bestimmungsgemäßen Betriebs führen könnten. Diese ortspezifische Einwirkung findet im Rahmen der Bewertung der Robustheit der Betriebssicherheit in Untersuchungsräumen Berücksichtigung. Die Bewertung der Robustheit der Betriebssicherheit in einem Untersuchungsraum ist eine mögliche Grundlage für den sicherheitsge-

Abdeckender Katalog Betriebssicherheit – Beispielbearbeitung einzelner Einwirkungen

richteten Diskurs von Untersuchungsräumen im Rahmen der rvSU und kann unter Berücksichtigung der weiteren Eingangsgrößen einen Einfluss auf die Bewertung eines Untersuchungsraums nehmen.

Zur Prävention und Überwachung sind die Hochwasserschutzwassermaßnahmen gemäß der ESK Leitlinie zum Schutz von Endlagern gegen Hochwasser (ESK 2018) in sinngemäßer Ergänzung mit der KTA 2207 anzuwenden. Diese Maßnahmen teilen sich grundsätzlich in permanente und temporäre auf. In den Bereich der permanenten Maßnahmen fallen z.B. die Auswahl und Bauausführung der Zugänge zum Gebäude. In den Bereich der temporären Maßnahmen fallen z. B. die Anbringung von mobilen Hochwasserbarrieren oder das Verschließen von Zugängen. Zusätzlich kann dem Risiko durch eine entsprechende Standortauswahl für die übertägigen Anlagenteile begegnet werden.

Abweichungen vom bestimmungsgemäßen Betrieb liegen nicht vor. Es sind daher keine Maßnahmen für die Rückkehr in den bestimmungsgemäßen erforderlich.

Um zum Normalbetrieb zurückzukehren sind im Falle eines Hochwassers die jeweils zuständigen Betriebsmannschaften in der Lage, binnen kurzer Zeit Maßnahmen zu ergreifen, um den Wasserabfluss vom Endlagergelände zu unterstützen.

<u>Versagen des Ausbaus (EVI-25)</u>

Die Einwirkung betrachtet nach Herold et al. (2020a) jede Form der Beeinträchtigung des Ausbaus mit und ohne Folgen für die Stützwirkung (z. B. Ausbruch und herabstürzen von Komponenten des Ausbaus). Zu unterscheiden sind folgende Fälle:

1. Versagen des Ausbaus in den Teilsystemen, in denen Gebinde gehandhabt werden, ohne mechanische Einwirkungen auf ein Gebinde.
2. Versagen des Ausbaus in den Teilsystemen, in denen Gebinde gehandhabt werden, mit mechanischer Einwirkung auf ein Gebinde durch Sturz schwerer Lasten (versagender Ausbau und/oder hereinbrechendes Gebirge).

Durch eine geeignete Wahl der Endlagerteufe in Verbindung mit einer entsprechenden gebirgsmechanischen Auslegung inklusive einer Optimierung des Hohlraumausbaus wird großflächiges Versagen des Ausbaus ausgeschlossen.

Von der Einwirkung können Tageszugänge und alle untertägigen Bereiche der Systeme Infrastruktur und Richtstrecke sowie der Einlagerungsbereich betroffen sein. Es werden nur die Teilsysteme betrachtet, in denen Gebinde gehandhabt werden.

Fall 1: Kein Gebinde durch Versagen des Ausbaus betroffen:

Die Einwirkung Versagen des Ausbaus führt in diesem Fall im betroffenen Bereich des Teilsystems zum Betriebszustand „anomaler Betrieb“.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

Abdeckender Katalog Betriebssicherheit – Beispielbearbeitung einzelner Einwirkungen

Eine Gefährdung der atomrechtlichen und strahlenschutzrechtlichen Schutzziele für den bestimmungsgemäßen Betrieb ist somit nicht erkennbar.

Fall 2: Mechanische Einwirkung auf ein Gebinde durch Versagen des Ausbaus:

Tritt das Ereignis, die Einwirkung durch Versagen des Ausbaus, ein, während sich ein Gebinde unter der betroffenen Stelle befindet, kann eine Gefährdung atomrechtlicher und strahlenschutzrechtlicher Schutzziele nicht ausgeschlossen werden.

Durch eine entsprechende Erkundung der geplanten Strecken im Zusammenspiel mit einer gebirgsschonenden Auffahrung der benötigten Strecken gefolgt mit einem den Anforderungen genügenden Ausbau kann präventiv sehr viel getan werden um ein Versagen des Ausbaus erheblich zu reduzieren. Ziel kann es dabei sein bei einem nicht tragfähigen Gebirge unter Berücksichtigung der Maßnahmen zur Geringhaltung der Schädigung der wesentlichen Barrieren die Robustheit des tragenden Ausbaus zu optimieren. Dabei ist die Teufenlage des Endlagers eine entscheidende Einflussgröße. Eine weitergehende Betrachtung der Ausbaudimensionierung für das Wirtsgestein Opalinuston findet sich in Kapitel 4.2.7.

Maßnahmen zur Überwachung des Ausbaus bestehen in regelmäßigen Inspektionen, Prüfungen, WKP und ggf. Ausbesserungsarbeiten.

Die Beschreibung der Auswirkungen und Abweichungen vom bestimmungsgemäßen Betrieb erfolgt für die beiden Fälle wie folgt:

Fall 1: Abweichungen vom bestimmungsgemäßen Betrieb liegen nicht vor.

Fall 2: Siehe Einwirkung Gebindekollision.

Daraus ergeben sich entsprechende Maßnahmen um in den bestimmungsgemäßen Betrieb zurückzukehren und um die Auswirkungen zu begrenzen:

Fall 1: Es sind keine Maßnahmen für die Rückkehr in den bestimmungsgemäßen erforderlich.

Fall 2: Siehe Einwirkung Gebindekollision.

Für beide Fälle:

Um zum Normalbetrieb zurückzukehren ist im Falle eines Versagens des Ausbaus die jeweils zuständigen Instandsetzungsmannschaften in der Lage sind, binnen kurzer Zeit die Beschädigung zu beseitigen und den genehmigungskonformen Zustand wiederherzustellen.

Neben einer ausführlichen Beschreibung der Einwirkungen, Auswirkungen und Maßnahmen werden zwei Übersichtstabellen (Tabelle 76 und Tabelle 77) angefertigt, die eine Zusammenstellung aller Einwirkungen beinhalten, die in Bezug auf die Betriebssicherheitsaspekte Strahlenschutz und Freisetzung von radioaktiven Stoffen eine Relevanz besitzen. Die Tabellen stellen den aktuellen Arbeits- und Kenntnisstand im Rahmen der rvSU dar. Sie sind nicht als Vorfestlegung für die detaillierte

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

Bewertung der Betriebssicherheit und der einzelnen Einwirkungen in zukünftigen Verfahrensphasen zu verstehen. Zur übersichtlichen Darstellung und um eine spätere Bezugnahme zu erleichtern, sind die EVAs und EVIs gruppiert worden. Die EVAs sind dabei alphabetisch sortiert worden und mit der Nomenklatur: EVA-nn (nn = 01, 02, …) bezeichnet worden. Die EVIs sind mit der analogen Nomenklatur (EVI-nn; nn = 01, 02, …) nummeriert aufgeführt, wobei die Reihenfolge nach betroffenem Teilsystem gewählt wurde, beginnend mit EVIs, die sämtliche Teilsysteme betreffen, über die Teilsysteme über Tage bis zu den Teilsystemen unter Tage. In den Tabellen sind alle identifizierten Einwirkungen mit einer kurzen Beschreibung und soweit möglich und erforderlich mit einer Abgrenzung zu anderen Einwirkungen erläutert worden.

Die Betrachtung der grundsätzlichen Möglichkeit des sicheren Betriebs ist nur unter Berücksichtigung der Aspekte des Strahlenschutzes und der Freisetzung von radioaktiven Stoffen vorgenommen worden und stellt keine vollständige Sicherheitsanalyse dar. Daraus ergibt sich, dass Einwirkungen nur dann die Betriebssicherheit beeinflussen, wenn der Zustand des bestimmungsgemäßen Betriebes verlassen wird. Dieses Verlassen des bestimmungsgemäßen Betriebs wird in der Tabelle mit einem „+“ gekennzeichnet. Wird der bestimmungsgemäße Betrieb nicht verlassen, wird dies durch ein „-“ gekennzeichnet. Die gleiche Kennzeichnung gilt bei der Bewertung des Einflusses der Einwirkung auf die Langzeitsicherheit des Endlagers. Auf Grund der generischen Bewertungsgrundlage war nicht bei allen Einwirkungen gegenwärtig eine eindeutige Zuordnung möglich. Diesen Einwirkungen wurde eine „-/+“ zugeordnet

Die potenzielle Betroffenheit der Teilsysteme im atomrechtlichen und strahlenschutzrechtlichen Sinne durch die entsprechende Einwirkung wird durch eine „1“ kenntlich gemacht. Sofern ein Teilsystem durch eine Einwirkung betroffen sein kann, wurde in den Spalten „Tagesanlagen“, „Tageszugänge“, „Infrastruktur & Richtstrecke“ und „Einlagerungsbereich“ eine „1“ eingetragen. Sofern ein Teilsystem nicht betroffen sein kann, wurde eine „0“ eingetragen.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

Tabelle 76 Zusammenstellung aller atomrechtlich und strahlenschutzrechtlich relevanten Einwirkungen von außen (EVA) im Rahmen des abdeckenden Katalogs Betriebssicherheit

Nummer	Name der Einwirkung	Kurzbeschreibung der Einwirkung	Teilsysteme des Endlagers				Einflussbereiche		Quelle/ Ursprung
			Tages-anlagen	Tages-zugänge	Infrastruktur & Richtstrecke	Einlage-rungs-be-reich	Betriebs-sicherheit	Langzeit-sicherheit	
EVA-01	Ausfall externe Strom-versorgung	Vollständiger Ausfall der Netzeinspeisung (EVA)	1	1	1	1	-	-	Filbert & Pöhler (2008)
EVA-02	Bläser	Gasexhalationen mit hohem Druck und hohen Volumenströmen	0	1	1	1	-/+	-	Herold et al. (2020a)
EVA-03	Blitzschlag	Diese Ereignisse sind standortbedingt und zu berücksichtigen.	1	1	0	0	-	-	Filbert & Pöhler (2008)
EVA-04	Einwirken gefährlicher Stoffe	BMU-Sicherheitskriterien für KKW Abschnitt 3.2.1.4	1	1	0	0	+	-	Filbert & Pöhler (2008)
EVA-05	Erdbeben	Seismische Aktivität ist nicht größer als in Erdbebenzone 1 nach DIN EN 1998-1/NA 2011-01	1	1	0	0	-	-	Filbert & Pöhler (2008)
EVA-06	Explosionsdruckwelle	BMI-Richtlinie für den Schutz von Kernkraftwerken gegen Druckwellen aus chemischen Reaktionen	1	1	0	0	+	-	Filbert & Pöhler (2008)
EVA-07	Externer Brand	Diese Ereignisse sind standortbedingt und zu berücksichtigen.	1	1	0	0	-	-	Filbert & Pöhler (2008)
EVA-08	Flugzeugabsturz zufällig	RSK-Leitlinien für Druckwasserreaktoren	1	1	0	0	+	-	Filbert & Pöhler (2008)
EVA-09	Flutung Grube	Jeder ungeplante und unkontrollierte Zutritt von Fluiden in signifikanter Menge in das Grubengebäude. Die Einwirkung Hochwasserereignis (EVA-13) kann hier eine mögliche Ursache sein.	0	1	1	1	+	+	Herold et al. (2020a)
EVA-10	Gebirgsmechanische Einwirkungen	Schadensereignisse in Form von Firstsenkung, Stoßwanderung, Sohlenhebung oder eines Gebirgsschlages oder First-zusammenbruchs mit und ohne Einwirkung auf Gebinde	0	1	1	1	-/+	+	Filbert & Pöhler (2008)
EVA-11	Hochwasserereignisse	Diese Ereignisse sind standortbedingt und entsprechend zu berücksichtigen. Grundlage für alle Planungen bildet die ESK-Leitlinie zum Schutz von Endlagern gegen Hochwasser. Flutung Grube (EVA-11) wird gesondert betrachtet.	1	1	0	0	-	-	Filbert & Pöhler (2008)
EVA-12	Rutschung	Verschüttung/Beschädigung von Zugangsbauwerken, Schaden an Schachtkopf / Portal Zugangstunnel und von Ver- und Entsorgungssystemen durch: Erdrutsch, Hangrutsch, Murgang, Steinschlag etc.	1	1	0	0	-	-	Nagra (2014b)

Nummer	Name der Einwirkung	Kurzbeschreibung der Einwirkung	Teilsysteme des Endlagers				Einflussbereiche		Quelle/ Ursprung
			Tages-anlagen	Tages-zugänge	Infrastruktur & Richtstrecke	Einlage-rungs-be-reich	Betriebs-sicherheit	Langzeit-sicherheit	
EVA-13	Sonstige standortbe-dingte Einwirkungen	Diese Ereignisse sind standortbedingt zu ermitteln und zu berücksichtigen und schließt ggf. erkennbare zukünftige Ent-wicklungen mit ein. Wahrscheinlich ergeben sich durch den ausgewählten Standort keine ergänzenden Einwirkungen, die nicht bereits erfasst sind.	1	1	0	0	-/+	-	Filbert & Pöhler (2008)
EVA-14	Wind und Schneelasten	Diese Ereignisse sind standortbedingt und zu berücksichtigen.	1	0	0	0	-	-	Filbert & Pöhler (2008)
EVA-15	Zutritt Schachtwässer in das Grubengebäude	Wetterlaugen	0	1	1	1	-	-	Filbert & Pöhler (2008)
EVA-16	Zutritt von Lösungen und natürlichen Gasen	Lokaler Zutritt von Lösungen aus dem Wirtsgestein, welches in Lösungsreservoirs eingeschlossen gewesen ist und durch Änderung des Spannungszustandes des Gebirges Wegsamkeiten zum Grubengebäude gefunden hat. In gleicher Weise können natürliche Gase auftreten.	0	0	1	1	-	-	Filbert & Pöhler (2008)

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

Tabelle 77 Zusammenstellung aller atomrechtlich und strahlenschutzrechtlich relevanten Einwirkungen von innen (EVI) im Rahmen des abdeckenden Katalogs Betriebssicherheit

Nummer	Name der Einwirkung	Kurzbeschreibung der Einwirkung	Teilsysteme des Endlagers				Einflussbereiche		Quelle/ Ursprung
			Tages-anlagen	Tages-zugänge	Infrastruktur & Richtstrecke	Einlage-rungsbereich	Betriebs-sicherheit	Langzeit-sicherheit	
EVI-01	Versagen technischer Einrichtungen	Jede Einwirkung die zum Ausfall und oder Versagen technischer Einrichtungen mit und ohne Gebindehandhabung führt. Dies kann z. B. der Ausfall der Kommunikationstechnik oder die Beschädigung von Fahrbahnen oder Schienen sein.	1	1	1	1	-/+	-	Herold et al. (2020a)
EVI-02	Freisetzung von radioaktiven Stoffen	Freisetzung von radioaktiven Gasen/ Aerosolen aus Gebinden z. B. aufgrund von Behälterversagen	1	1	1	1	+	+	Filbert & Pöhler (2008)
EVI-03	Explosion intern (Radiolysegase, zündfähige Gase)	Ansammlung von zündfähigen Gasen inkl. Radiolysegasen und deren Explosion	1	1	1	1	+	-	Filbert & Pöhler (2008)
EVI-04	Fehlbedienung	Jede Personalhandlung die einen unerwünschten bis nicht definierten Zustand herbeiführen kann (Störfall).	1	1	1	1	+	-	Filbert & Pöhler (2008)
EVI-05	Freisetzung chemotoxischer Stoffe	Jede Freisetzung von chemotoxischen Stoffen, die die zulässigen Grenzweite vor Ort oder in den Abluft/ Abwetter überschreitet. Eine Ursache kann z. B. im Versagen von Maschinen liegen.	1	1	1	1	+	-	Herold et al. (2020a)
EVI-06	Gebindeabsturz	Gebindeabsturz durch Versagen von Hebezeugen inkl. Einlagerungsvorrichtungen	1	1	1	1	+	-	Filbert & Pöhler (2008)
EVI-07	Gebindekollision	Jedes horizontale mechanische Einwirken auf ein Gebinde (z. B. Anprall eines Gebindes an etwas oder die Kollision eines beladenen Transportfahrzeugs mit einem Hindernis).	1	1	1	1	+	-	Filbert & Pöhler (2008)
EVI-08	Interner Brand	Anlageninternes Feuer, das ohne einen bestimmungsgemäßen Herd entstanden ist oder ihn verlassen hat und das sich aus eigener Kraft auszubreiten vermag. (Gabler Wirtschaftslexikon)	1	1	1	1	+	-	Filbert & Pöhler (2008)
EVI-09	Kritikalität	Der Neutronenmultiplikationsfaktor (keff) überschreitet den Wert 0,95 nicht. (ESK LL trockene Zwischenlagerung)	1	1	1	1	+	-	Filbert & Pöhler (2008)
EVI-10	Lastabsturz auf ein Gebinde	Alle Lastabstürze auf ein Gebinde. Diese können durch das Versagen von Hebezeugen entstehen, aber auch alle anderen Ursachen haben z. B. Versagen von Ausbau, Abschalungen und Löser.	1	1	1	1	+	-	Filbert & Pöhler (2008)
EVI-11	Ausfall interne Stromversorgung	Vollständiger/ teilweiser Ausfall der Stromversorgung innerhalb der Anlage (EVI) durch z. B. Komponentenversagen.	1	1	1	1	-	-	Filbert & Pöhler (2008)

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

Nummer	Name der Einwirkung	Kurzbeschreibung der Einwirkung	Teilsysteme des Endlagers				Einflussbereiche		Quelle/ Ursprung
			Tages-anlagen	Tages-zugänge	Infrastruktur & Richtstrecke	Einlage-rungsbereich	Betriebs-sicherheit	Langzeit-sicherheit	
EVI-12	Ausfall Leittechnik	Ein Ausfall der Leittechnik bedeutet, dass die Steuerung wichtiger Betriebssysteme, die Überwachung wichtiger Betriebszustände oder die Registrierung von Störmeldesignalen von ASK beeinträchtigt ist. Gleiches gilt wenn die Abfrage von Überwachungseinrichtungen beeinträchtigt ist. Eine Beeinträchtigung kann ein ganz oder teilweiser Ausfall, aber auch bereits eine Störung der Verbindung/ Übertragung sein.	1	1	1	1	-	-	BfS (2002)
EVI-13	Ausfall Zulufttechnik	ESK-Leitlinie: Jede unzulässige Beeinträchtigung der Wärmeabfuhr der Behälter. Hier nur Pufferlagerung und Handhabung über Tage	1	1	0	0	+	-	BfS (2002)
EVI-14	Leckagen (z. B. Sammelbecken)	Jede Feststellung einer Undichtigkeit am System der Betriebsabwässer, unabhängig davon ob es zu einer Leckage von Abwässern gekommen ist oder nicht.	1	0	1	1	+	-	BfS (2002)
EVI-15	Versagen von Transportfahrzeugen	Jedes Versagen eines beladenen Transportfahrzeuges mit und ohne Folgen für ein Gebinde.	1	0	1	1	+	-	Herold et al. (2020a)
EVI-16	Ausfall Unterdruckhaltung	BMU-Sicherheitskriterien KKW Rev. D	1	0	0	0	+	-	BMUB (2015b)
EVI-17	Ausfall Bewetterung	Wetterstillstand oder -umkehr im durchgehend bewetterten Bereich unter Tage, sowie sonstiger ganz oder teilweiser Ausfall der Bewetterung in sonstigen Grubenbereichen.	0	1	1	1	+	-	Filbert & Pöhler (2008)
EVI-18	Versagen von Verschlüssen	Das Versagen eines Verschlusses ist die Entstehung einer potenziellen Wegsamkeit für Lösungen, Gase oder Radionuklide von einem abgeworfenen Grubenbereich in einen offenen	0	1	1	1	-	+	Herold et al. (2020a)
EVI-19	Abschalungen und Löser	Gesteinsbrocken, der sich ablöst und herunterfallen kann oder bereits heruntergefallen ist.	0	1	1	1	-	-	Herold et al. (2020a)
EVI-20	Versagen des Schacht- und Rampenausbaus	Beeinträchtigung der Stützwirkung des Ausbaus, die zu Gesteinsauflockerungen und Gesteinsverbruch führen können mit der Folge von herabstürzendem Ausbruch, welcher zu Beschädigungen von Einbauten und Fördertechnik führen kann.	0	1	0	0	-/+	-	Herold et al. (2020a)
EVI-21	Versagen der Schachtfördertechnik	Jedes Versagen der Komponenten der Schachtfördertechnik was zu einem auch nur vorübergehenden undefinierten Zustand an einem Gebinde und auch zu Beschädigungen der Schachteinbauten und Schachtausbauten führen kann.	0	1	0	0	+	-	Filbert & Pöhler (2008)
EVI-22	Versagen der Seilbahntechnik	Jedes Versagen der Komponenten der Seilbahntechnik was zu einem auch nur vorübergehenden undefinierten Zustand an einem Gebinde führt und auch zu Beschädigungen der Rampeneinbauten und Rampenausbauten führen kann.	0	1	0	0	+	-	Herold et al. (2020a)
EVI-23	Entgleisung beladenes Transportfahrzeug u. T.	Verlassen der Fahrspur durch das gleisgebundene Fahrzeug.	0	0	1	1	+	-	Filbert & Pöhler (2008)
EVI-24	Versagen des Versatzes	Jede Beeinträchtigung der beabsichtigten Stabilisierungs- und oder Barrierewirkung des Versatzes.	0	0	1	1	-	+	Herold et al. (2020a)

Nummer	Name der Einwirkung	Kurzbeschreibung der Einwirkung	Teilsysteme des Endlagers				Einflussbereiche		Quelle/ Ursprung
			Tages-anlagen	Tages-zugänge	Infrastruktur & Richtstrecke	Einlage-rungsbereich	Betriebs-sicherheit	Langzeit-sicherheit	
EVI-25	Versagen des Ausbaus	Jede Form der Beeinträchtigung des Ausbaus mit und ohne Folgen für die Stützwirkung (z. B. Ausbruch und herabstürzen von Komponenten des Ausbaus). Mechanische Einwirkungen auf ein Gebinde sind nicht Teil dieser Einwirkung.	0	0	1	1	-	-	Herold et al. (2020a)
EVI-26	Versagen von Bergbaumaschinen	Jedes Versagen einer Bergbaumaschine mit und ohne Folgen für den Grubenbetrieb.	0	0	1	1	-	-	Herold et al. (2020a)
EVI-27	Versagen von Einlagerungsmaschinen	Jedes Versagen einer in der Gebindehandhabung involvierten Einlagerungsmaschine mit und ohne Folgen für ein Gebinde.	0	0	0	1	+	-	Herold et al. (2020a)
EVI-28	Versagen des Buffers	Jede Reduzierung der Konturstabilität oder hydraulischen Abschirmwirkung des Buffers.	0	0	0	1	-	+	Herold et al. (2020a)
EVI-29	Versagen der Bohrlocheinbauten	Jede Veränderung die den Einlagerungsablauf behindern kann.	0	0	0	1	-	-	Herold et al. (2020a)

8.7.4 Prüfung der Möglichkeit eines sicheren Betriebs für einen Untersuchungsraum

Auf Grundlage der ortsunabhängigen Bearbeitung kann die Bearbeitung der einzelnen Untersuchungsräume bzw. Teiluntersuchungsräume konsistent erfolgen. Dabei wird die grundsätzliche Möglichkeit des sicheren Betriebs jedoch nicht einmalig für den gesamten Untersuchungsraum bewertet. Stattdessen werden Bereiche im Untersuchungsraum definiert, in denen die grundsätzliche Möglichkeit des sicheren Betriebs dargestellt werden kann, und solche, in denen dies nicht möglich ist. So kann abschließend die Fläche des gesamten Untersuchungsraums bewertet werden. Diese Prüfung beruht auf dem aktuellen Arbeits- und Kenntnisstand im Rahmen der rvSU. Sie stellt keine Vorfestlegung für die detailliertere Bewertung der Betriebssicherheit in zukünftigen Verfahrensphasen dar.

Hierzu wird zunächst auf Grundlage des abdeckenden Katalogs für die atomrechtlichen und strahlenschutzrechtlichen Aspekte der Betriebssicherheit, der gewählten Endlagerkonzepte und der zusammengestellten Informationen zum möglichen Auftreten ortsspezifischer äußerer Einwirkungen die Relevanz der einzelnen Einwirkungen und Maßnahmen im Bereich des spezifischen Untersuchungsraums geprüft. Als ortsspezifische äußere Einwirkungen werden EVA definiert, die temporär in einem Untersuchungsraum auftreten können und standortspezifisch charakterisierbar sind. Die kartographische Darstellung bildet eine weitere Grundlage für die Bewertung der Betriebssicherheit für die Untersuchungsräume. Die Liste der ortsspezifischen äußeren Einwirkungen umfasst:

- EVA-03 Blitzschlag
- EVA-04 Einwirken gefährlicher Stoffe
- EVA-05 Erdbeben
- EVA-06 Explosionsdruckwelle
- EVA-07 Externer Brand
- EVA-08 Flugzeugabsturz zufällig
- EVA-09 Flutung Grube
- EVA-11 Hochwasserereignisse
- EVA-12 Rutschung
- EVA-14 Wind und Schneelasten

Für ortsspezifische äußere Einwirkungen, insbesondere für Hochwasserereignisse, wird zusätzlich, soweit möglich, eine Eintrittswahrscheinlichkeit ermittelt. Gleiches gilt für die Quantifizierung der ortsspezifischen äußeren Einwirkungen (z. B. Wassermengen/Wasserstände und Einzugsgebiet eines möglichen Hochwassers) für den Fall, dass eine solche Bemessung von Einwirkungen zur Abgrenzung verschiedener Bereiche erforderlich ist. Einzelne ortsspezifische EVA, wie Blitzschlag, sind dabei unspezifischer als solche wie Hochwasserereignisse. Außerdem haben einzelne ortsspezifische EVA wie Explosionsdruckwellen einen lokal begrenzten Einfluss, während andere Einflüsse, wie Erdbeben häufig großräumig auftreten. Gebirgsmechanische Einwirkungen (EVA-10) sind

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

grundsätzlich ebenfalls ortsspezifisch. Sie werden jedoch nicht in Form von Karten dargestellt und bereits im Rahmen der vorläufigen Endlagerauslegung in Kapitel 4.2 umfassend berücksichtigt, sodass die grundsätzliche Möglichkeit eines sicheren Betriebs für diese Einwirkung als gegeben angenommen werden kann. Die ortsspezifische EVA gebirgsmechanische Einwirkungen wird im Rahmen der Prüfung der grundsätzlichen Möglichkeit eines sicheren Betriebs betrachtet. Die umfassende Betrachtung der ortsspezifischen gebirgsmechanischen Einwirkungen und deren Einfluss auf die Betriebssicherheit und Langzeitsicherheit erfolgt bereits im Rahmen der gebirgsmechanischen Betrachtung des Untersuchungsraums in Kapitel 4.2.7. Aus diesem Grund wird diese ortspezifische EVA auch nicht gesondert bei der Bewertung der Robustheit in Kapitel 8.7.5 herangezogen.

Die Darstellung einer grundsätzlichen Möglichkeit zu einem sicheren Betrieb im Bereich der nicht radiologisch relevanten Aspekte der Betriebssicherheit ist bereits im Rahmen der Formulierung der Anforderungen und durch deren Berücksichtigung in der vorläufigen Endlagerauslegung gegeben.

8.7.5 Bewertung der Robustheit der Betriebssicherheit in einem Untersuchungsraum

In den Bereichen eines Untersuchungsraums für die gemäß Kapitel 8.7.4 die Möglichkeit eines sicheren Betriebs grundsätzlich dargestellt werden kann, wird anschließend die Robustheit der Betriebssicherheit in Bezug auf die Aspekte Strahlenschutz und Freisetzung radioaktiver Stoffe überprüft. Im Rahmen der Robustheitsprüfung wird lokal geprüft, welche ortsabhängigen Einwirkungen auftreten und wie diesen zu begegnen ist. So ist es möglich Lokationen zu identifizieren, an denen die Betriebssicherheit weniger von solchen ortsabhängigen Einwirkungen beeinflusst wird als an anderen Lokationen. Grundlage hierfür ist das Auftreten ortsspezifischer äußerer Einwirkungen. Ziel ist es, auf Grundlage dieser ortsspezifischen Charakteristika Bereiche mit unterschiedlicher Robustheit der Betriebssicherheit im Untersuchungsraum zu identifizieren und zu beschreiben. Die Bewertung erfolgt mithilfe eines Zeugnis für die einzelnen Bereiche. Dafür wird die Robustheit der Betriebssicherheit sowohl verbalargumentativ beschrieben als auch in Form von Noten dargestellt. Das Bewertungsschema umfasst die Noten „-1“, „0“ und „+1“. Die Bewertung „+1“ gibt an, dass im Bereich des Untersuchungsraums günstigere Bedingungen für die Betriebssicherheit in Hinblick auf die ortsspezifischen EVA vorherrschen. Die Bewertung „-1“ spiegelt dagegen ungünstigere Voraussetzungen im Hinblick auf die Betriebssicherheit wider.

Die Überprüfung der Robustheit der Betriebssicherheit gegenüber ortsspezifischen äußeren Einwirkungen erfolgt mithilfe der Kartendarstellungen der Verteilung dieser Einwirkungen, die im Kapitel 8.7.4 eingeführt wurden. So kann zwischen einzelnen Bereichen innerhalb eines Untersuchungsraumes differenziert werden. Bereiche in denen eine ortsspezifische äußere Einwirkung auftritt und somit technische Maßnahmen notwendig werden, werden grundsätzlich als weniger robust eingestuft („-1“ bzw. „0“) als solche, in denen diese Einwirkung nicht auftritt („+1“). Darüber hinaus ist die Robustheit in Bereichen, in denen eine oder mehrere ortsspezifischer äußere Einwirkungen auftreten, die vergleichsweise geringfügige technische Maßnahmen erfordern („0“ bzw. „+1“), günstiger zu bewerten, als in Bereichen, in denen Einwirkungen intensive technische Präventiv- oder Gegenmaßnahmen erforderlich machen (z. B. Hochwasser- oder Überflutungsgebiete) („-1“).

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

Die Bewertung der Robustheit findet Eingang in die umfassende Bewertung des Endlagersystems für jeden Untersuchungsraum gemäß § 10 EndlSiUntV berücksichtigt.

8.8 Relevanz der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien

8.8.1 Einleitung

Nach § 7 Abs. 4 EndlSiUntV ist für einen Untersuchungsraum darzulegen, „*welche Relevanz die einzelnen Abwägungskriterien nach den Anlagen 1 bis 11 des Standortauswahlgesetzes für die Beurteilung des jeweiligen Endlagersystems haben. Dabei ist zu unterscheiden nach:*

1. der Bedeutung des Kriteriums für die Sicherheitsfunktionen des vorgesehenen Endlagersystems und seiner Komponenten,
2. der aktuellen Kenntnis der lokalen Sachverhalte zum jeweiligen Abwägungskriterium und
3. dem Potenzial für den Erkenntnisgewinn zum jeweiligen Kriterium aufgrund künftiger Erkundungstätigkeiten.“

Im Begründungstext zu § 7 Absatz 4 EndlSiUntV wird ausgeführt, dass die Darlegung der Relevanz der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien im Rahmen einer vorläufigen Sicherheitsuntersuchung (vSU), in der eine vertiefte Betrachtung sowohl der geologischen Gegebenheiten als auch des Endlagersystems in einem Untersuchungsraum oder Teiluntersuchungsraum durchgeführt wird, als Grundlage für die Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien dienen soll.

Die Aufgabe besteht darin, durch die Arbeiten in den vSU den geowissenschaftlichen Abwägungskriterien für die weitere Anwendung im Rahmen von § 14 StandAG gemäß § 24 StandAG eine Relevanz zuzuweisen. Die Darlegung dieser Relevanz erfolgt in Analogie zum Vorgehen bei der Abwägung durch die geowissenschaftlichen Abwägungskriterien im ersten Schritt auf der Ebene der Indikatoren; im zweiten Schritt erfolgt eine Zusammenfassung der Relevanz auf der Ebene des Abwägungskriteriums. Unter Relevanz eines Indikators bzw. eines geowissenschaftlichen Abwägungskriteriums wird in diesem Zusammenhang der Grad des Einflusses verstanden, den der Indikator bzw. das geowissenschaftliche Abwägungskriterium auf die Bewertung eines Endlagersystems durch das geowissenschaftliche Abwägungskriterium nehmen soll.

Im Folgenden wird ein allgemeines Verständnis sowie ein Vorgehen zur Bearbeitung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien Relevanz vorgestellt. Jedoch findet die Anwendung aller geowissenschaftlichen Abwägungskriterien erst nach Abschluss der rvSU im Rahmen von § 14 StandAG statt und ist somit nicht Bestandteil der rvSU-Methode. Deshalb wurde die Anwendung der Relevanz noch nicht an praktischen Beispielen in den GzME getestet. Dies ist Teil zukünftiger Veröffentlichungen zu der methodischen Ausgestaltung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien. Aus diesem Grund ist die in Kapitel 8.8.2 vorgestellte Methode zur Bearbeitung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien Relevanz zunächst als vorläufig zu betrachten.

8.8.2 Mögliche Vorgehensweise zur Bearbeitung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien Relevanz

8.8.2.1 Allgemeines Vorgehen

Die methodische Darlegung der Relevanz eines Indikators erfolgt gemäß der in § 7 Abs. 4 EndlSiUntV vorgegebenen Reihenfolge: Zunächst wird die Bedeutung des Indikators für die Sicherheitsfunktion (SF) bewertet (Relevanzaspekt RA1, § 7 Abs. 4 Nr. 1 EndlSiUntV), danach der heutige Kenntnisstand zum Indikator (Relevanzaspekt RA2, § 7 Abs. 4 Nr. 2 EndlSiUntV) und letztlich das Potenzial zum Erkenntnisgewinn (Relevanzaspekt RA3, § 7 Abs. 4 Nr. 3 EndlSiUntV). Eine Zusammenfassung der Bewertungen der drei Relevanzaspekte (RA) ergibt die Relevanz des Indikators.

Die Bewertung der Relevanzaspekte erfolgt in Analogie zur Vorgabe bei der Abwägung mit den geowissenschaftlichen Abwägungskriterien verbalargumentativ. Es wird ein möglichst formalisiertes Vorgehen gewählt, um eine gute Nachvollziehbarkeit und Vergleichbarkeit der Bewertung zu ermöglichen. Das Vorgehen zur Bewertung der drei Relevanzaspekte wird im Folgenden beschrieben.

Für alle drei Relevanzaspekte wird jeweils eine Bewertung in i) gering, ii) mittel oder iii) hoch durchgeführt. Die Aufteilung der Bewertung der Relevanzaspekte in drei Gruppen ist ein Kompromiss zwischen notwendiger Differenzierung und einer handhabbaren Anzahl von Klassen für die weitere Bearbeitung. Aus der Zusammenfassung der Bewertungen der drei Relevanzaspekte wird die Relevanz des Indikators für die Bewertung durch das geowissenschaftliche Abwägungskriterium abgeleitet und eine entsprechende Klasse ausgewählt (Tabelle 78).

Tabelle 78: Klassen zur Darstellung der Relevanz eines Indikators bzw. geowissenschaftlichen Abwägungskriteriums

Relevanzklassen			Relevanz des Indikators für die Bewertung durch das geoWK	Klasse
Bedeutung für die SF	Vorhandene Kenntnis	Potenzial Erkundung		
hoch	hoch	gering/mittel/hoch	hoch	I
hoch	mittel	mittel/hoch	vorläufig mittel	II
hoch	mittel	gering	mittel	III.1
mittel	mittel/hoch	gering/mittel/hoch	mittel	III.2
gering	gering/mittel/hoch	gering/mittel/hoch	gering	V.1
mittel/hoch	gering	mittel/hoch	vorläufig gering	IV
mittel/hoch	gering	gering	gering	V.2

Die Klassen III und V werden jeweils in zwei Unterklassen eingeteilt, da sie aus zwei unterschiedlichen Bewertungen der drei Relevanzaspekte resultieren. Sie gehören aber der gleichen Relevanzklasse an, da ihnen die gleiche Relevanz für die Bewertung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien zugewiesen wird. Die verwendeten Klassen für die Relevanz der Indikatoren (Tabelle 78) sind wie folgt zu verstehen:

1. **hoch (Klasse I)**: der Indikator hat eine hohe Bedeutung für die SF und es gibt bereits einen hohen Kenntnisstand. Daraus folgt eine hohe Relevanz des Indikators bei Bewertung des Endlagersystems durch die geowissenschaftlichen Abwägungskriterien.
2. **vorläufig mittel (Klasse II)**: der Indikator hat eine hohe Bedeutung für die SF mit einem mittleren vorliegenden Kenntnisstand. Es besteht ein mittleres bis hohes Potenzial, weitere Kenntnisse zu gewinnen. Daraus folgt eine vorläufig mittlere Relevanz des Indikators bei Bewertung des Endlagersystems durch die geowissenschaftlichen Abwägungskriterien. Bei einem entsprechenden Erkenntnisgewinn ist später Klasse I möglich.
3. **mittel (Klasse III)**: der Indikator hat entweder bei einer hohen Bedeutung für die SF und bei einem mittleren vorliegenden Kenntnisstand nur ein geringes Potenzial für einen weiter Erkenntnisgewinn (Klasse III.1) oder bei einer mittleren Bedeutung für die SF einen mittleren oder hohen vorliegenden Kenntnisstand (Klasse III.2). Aus beiden Fällen folgt eine mittlere Relevanz des Indikators bei Bewertung des Endlagersystems durch die geowissenschaftlichen Abwägungskriterien.
4. **vorläufig gering (Klasse IV)**: für den Indikator mit einer mittleren oder hohen Bedeutung für die SF liegt nur ein geringer Kenntnisstand vor, es existiert aber ein mittleres bis hohes Potenzial, weitere Kenntnisse zu gewinnen. Daraus folgt eine vorläufig geringe Relevanz bei Bewertung des Endlagersystems durch die geowissenschaftlichen Abwägungskriterien. Bei einem entsprechenden Erkenntnisgewinn ist später eine höhere Klasse möglich.
5. **gering (Klasse V)**: der Indikator hat entweder nur eine geringe Bedeutung für die SF (Klasse V.1) oder bei einer mittleren oder hohen Bedeutung für SF einen geringen vorliegenden Kenntnisstand und nur ein geringes Potenzial, weitere Kenntnisse zu gewinnen (Klasse V.2). Aus beiden Fällen folgt eine geringe Relevanz des Indikators bei Bewertung des Endlagersystems durch die geowissenschaftlichen Abwägungskriterien.

Grundsätzlich gilt, dass ein Indikator, der eine geringe Relevanz hat, in die Gesamtbewertung durch das geowissenschaftlichen Abwägungskriterium nur in geringem Maß einfließen sollte. Für eine geringe Relevanz kann es verschiedene Gründe geben: Entweder hat der Indikator beim betrachteten (Teil-) Untersuchungsraum nur eine geringe Bedeutung für die SF (RA1), oder unabhängig von einer geringen oder hohen Bedeutung des RA1 kann die Datenlage (RA2 und RA3, s. u.) die für die Abwägung abgegebene Bewertung (z. B. „günstig“, „bedingt günstig“ oder „weniger günstig“) nicht hinreichend absichern. Ein Indikator bzw. das zugehörige geowissenschaftlichen Abwägungskriterium mit einer geringen Relevanz sollte bei der verbalargumentativen Abwägung mittels der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien nicht mit großem Gewicht in die Bewertung der geologischen Gesamtsituation einfließen und so möglicherweise zu einem Ausschluss oder zu einer Bevorzugung eines Teilgebiets (oder später einer Standortregion oder eines Standortes) beitragen.

Hinsichtlich der Datenlage ist gemäß § 7 Abs. 4 EndlSiUntV zwischen aktuellem Kenntnisstand (RA2) und potenziellem Kenntniszuwachs durch künftige Erkundung (RA3) zu unterscheiden. Wenn der aktuelle Kenntnisstand gering ist, dann sollte der Indikator nicht mit einer hohen Gewichtung in

die Bewertung des Endlagersystems einfließen, solange nicht durch weitere Erkundung eine deutliche Verbesserung der Datenlage zu erwarten ist. In diesem Fall wäre der Indikator als vorläufig gering relevant einzustufen. Angenommen, ein Indikator mit hoher Bedeutung für die SF wird nach heutigem, niedrigem Kenntnisstand mit “weniger günstig” bewertet, aber es besteht Potenzial für weitere Erkundung. Nach einem Kenntniszuwachs im Laufe des Verfahrens kann es sein, dass sich die zuerst getroffene Bewertung des Indikators von “weniger günstig” aufgrund des Kenntniszuwachses später in "günstig" ändern wird. Dem Indikator darf vorläufig also keine hohe Relevanz zugewiesen werden, wodurch womöglich das Endlagersystem fälschlich abgewertet würde oder gar aus dem Suchprozess ausschiede. Erst nach dem erwarteten Erkenntniszuwachs kann (und wird) er eine höhere Relevanz für die weitere Bewertung bekommen. Eine vorläufige Relevanz kann später in keinem Fall kleiner werden. Wenn dagegen heute bereits klar ist, dass auch durch weitere Erkundung kein deutlich höherer Kenntnisstand erreicht werden kann, dann darf der Indikator auch künftig nicht oder nur in geringem Ausmaß in die Gesamtbewertung einfließen, d. h. er bekommt eine dauerhaft geringe Relevanz.

Bei der Bewertung der Relevanzaspekte werden zwei Ebenen unterschieden:

1. **Generelle Bedeutung**: Auf der Grundlage der im wirtsgesteinsspezifischen Sicherheitskonzept definierten generellen Sicherheitsfunktionen des Endlagersystems wird die Bedeutung des Indikators bzw. Kriteriums bewertet. Die generelle Bedeutung ist Grundlage für:

   a) die notwendigen Prüfschritte der rvSU (insbesondere § 7 Abs. 6 Nr. 3 Buchst. a) und b) EndlSiUntV) sowie

   b) einen möglichen Vergleich unterschiedlicher Untersuchungsräume[26] mit gleichem wirtsgesteinsspezifischem Sicherheitskonzept.

2. **Lokalspezifische Bedeutung**: Auf der Grundlage der Ergebnisse der rvSU (insbesondere Geosynthese) erfolgt eine auf die vorhandenen Kenntnisse des zu betrachtenden Bereichs fokussierte Bewertung der Bedeutung des Indikators bzw. Kriteriums. Die lokalspezifische Bedeutung ist die Grundlage für die Bewertung der geologischen Situation für einen möglichen Vergleich von Bereichen innerhalb eines Untersuchungsraums mithilfe der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien. Die lokalspezifische Bedeutung wird dabei ausschließlich für Bereiche betrachtet, die im Rahmen der umfassenden Bewertung (§ 10 EndlSiUntV) in Kategorie A bewertet wurden.

Beispiel[27] für den Indikator “Abstandsgeschwindigkeit” (Anlage 1 (zu § 24 Abs. 3) StandAG): Generell hat die Abstandgeschwindigkeit eine hohe Bedeutung für die Sicherheitsfunktion eines Endla-

[26] Ob dies auch in Untersuchungsräumen mit unterschiedlichen Sicherheitskonzepten und/oder Wirtsgesteinen angewendet werden kann, ist noch zu prüfen.

[27] Die im Folgenden genannten Beispiele beziehen sich zwar auf das GzME „Opalinuston“ (01_00UR), inwieweit für diesen Untersuchungsraum oder Bereiche davon eine Bewertung der lokalspezifischen Bedeutung erfolgt muss bei der Durchführung der rvSU für das Gebiet ermittelt werden.

gersystems in Tongestein, insbesondere als Indikator für die SF „Ver- bzw. Behinderung der Radionuklidausbreitung“. Für das GzME „Opalinuston“ (01_00UR) ist aber eine sehr geringe Abstandsgeschwindigkeit zu erwarten, sodass die lokalspezifische Bedeutung voraussichtlich geringer einzuschätzen ist. Für einen Vergleich des Opalinuston im GzME 01_00UR mit Tongestein in anderen Untersuchungsräumen wird dann die generelle Bedeutung des Indikators für die SF des Endlagersystems als hoch eingestuft, für die lokalspezifische Bedeutung im Untersuchungsraum als gering.

Beispiel für die Indikatoren des Kriteriums zur Bewertung der langfristigen Stabilität (Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG): Die drei definierten Indikatoren bewerten die Prognostizierbarkeit der Eigenschaften “Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs”, “Ausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs” und “Gebirgsdurchlässigkeit”. Alle drei Indikatoren haben eine hohe generelle Bedeutung für ein Endlagersystem mit einem einschlusswirksamen Gebirgsbereich und müssen sowohl bei Analyse eines Endlagersystems nach § 7 EndlSiUntV und einem Vergleich von Untersuchungsräumen berücksichtigt werden. Lokalspezifisch für das GzME 01_00UR im Opalinuston ist eine vorhandene gute Prognostizierbarkeit der Gebirgsdurchlässigkeit des Opalinuston für den Bewertungszeitraum, sodass die lokalspezifische Bedeutung dieses Indikators beim Vergleich von Bereichen geringer einzuschätzen ist.

Daraus ergibt sich, dass die in Tabelle 78 dargestellten Klassen zur Bewertung der Relevanz entweder auf die generelle Bedeutung (Tabelle 79) oder auf die lokalspezifische Bedeutung (Tabelle 80) bezogen werden müssen.

Tabelle 79: Ableitung der Klassen zur Darstellung der generellen Relevanz eines Indikators bzw.geowissenschaftlichen Abwägungskriteriums, (G = generell)

Relevanzklassen			Relevanz (G) für die Bewertung durch das geoWK	Klasse
Bedeutung für die SF (G)	Kenntnis im UR (G)	Potenzial Erkundung (G)		
hoch	hoch	gering/mittel/hoch	hoch	I-G
hoch	mittel	mittel/hoch	vorläufig mittel	II-G
hoch	mittel	gering	mittel	III.1-G
mittel	mittel/hoch	gering/mittel/hoch	mittel	III.2-G
gering	gering/mittel/hoch	gering/mittel/hoch	gering	V.1-G
mittel/hoch	gering	mittel/hoch	vorläufig gering	IV-G
mittel/hoch	gering	gering	gering	V.2-G

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

Tabelle 80: Ableitung der Klassen zur Darstellung der lokalspezifischen Relevanz eines Indikators bzw. geowissenschaftlichen Abwägungskriteriums, (L = lokalspezifisch)

Relevanzklassen			Relevanz (L) für die Bewertung durch das geoWK	Klasse
Bedeutung für die SF (L)	Kenntnis Region (L)	Potenzial Erkundung (L)		
hoch	hoch	gering/mittel/hoch	hoch	I-L
hoch	mittel	mittel/hoch	vorläufig mittel	II-L
hoch	mittel	gering	mittel	III.1-L
mittel	mittel/hoch	gering/mittel/hoch	mittel	III.2-L
gering	gering/mittel/hoch	gering/mittel/hoch	gering	V.1-L
mittel/hoch	gering	mittel/hoch	vorläufig gering	IV-L
mittel/hoch	gering	gering	gering	V.2-L

Das Vorgehen zur Bewertung der in den Spalten 2 und 3 der in Tabelle 79 und Tabelle 80 abgefragten Kenntnis im (Teil-) Untersuchungsraum bzw. des Potenzials der Erkundung im (Teil-) Untersuchungsraum wird in den nächsten beiden Unterkapiteln erläutert.

Die ermittelten Klassen I bis V sind zu berücksichtigende Entscheidungshilfen bei der verbalargumentativen Abwägung mittels der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien.

8.8.2.2 Bedeutung für die Sicherheitsfunktion

Zur Ableitung der Bedeutung der Indikatoren für die Sicherheitsfunktionen (siehe Kapitel 4.1) werden die Indikatoren der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien für das jeweilige zu bewertende Endlagersystem dahingehend untersucht, welche Bedeutung sie für die Sicherheitsfunktionen für die Barrieren im Endlagersystem gemäß dessen Sicherheitskonzept haben. Dazu wird für jede Sicherheitsfunktion der Barrieren eine Einschätzung der Bedeutung mit Begründung abgegeben. Die Einschätzung wird eine der drei Gruppen i) gering, ii) mittel oder iii) hoch zugeordnet.

Aus den Begründungen zu den einzelnen Sicherheitsfunktionen wird ein Gesamturteil für den Indikator abgeleitet. Die Zusammenfassung der einzelnen Bewertungen zu dem Gesamturteil erfolgt verbalargumentativ.

8.8.2.3 Aktuelle Kenntnis der lokalen Sachverhalte

Bezüglich der Kenntnis der lokalen Sachverhalte ist nach den oben definierten Ebenen zu unterscheiden: Kenntnisse auf der generellen Ebene gelten für den gesamten Untersuchungsraum einheitlich, Kenntnisse auf der lokalspezifischen Ebene sind auf eine bestimmte Region bezogen. Solange die Einteilung des Untersuchungsraums in Bereiche noch nicht gegeben ist, können lokalspezifische Kenntnisse nicht identifiziert oder bewertet werden. Das in § 7 Abs. 4 EndlSiUntV verwendete Wort „lokal“ bezieht sich im Folgenden auf die jeweils betrachtete Ebene, also entweder den gesamten Untersuchungsraum oder die betrachtete Region.

Zur Bewertung des aktuellen Kenntnisstands der lokalen Sachverhalte zum jeweiligen Abwägungskriterium wird sowohl für die im StandAG quantifizierten Indikatoren als auch für die Indikatoren, die eine geowissenschaftliche Bewertung der gegebenen Situation im Endlagersystem benötigen, die Verfügbarkeit entsprechender lokale Daten bzw. bewertungsrelevanter lokaler Kenntnisse geprüft. Ist diese gegeben, wird der Kenntnisstand mindestens als „mittel“ eingestuft. Gibt es keine lokalen Daten oder Kenntnisse, dafür aber grundlegendes Wissen zu dem Indikator, das auf den Untersuchungsraum übertragen werden kann, fällt die Kenntnis zu dem Indikator in die Gruppe “mittel”. Ein Beispiel ist die Gesteinsdurchlässigkeit, die in einem Untersuchungsraum mit einem Wirtsgestein Steinsalz nicht bekannt ist, bei der auf Grund der allgemeinen Kenntnis zu Durchlässigkeiten im Steinsalz aber eine Bewertung auf den Untersuchungsraum übertragbar ist.

Zur Bewertung des aktuellen Kenntnisstands ist in einem ersten Schritt zu definieren, für welche Sachverhalte die Kenntnis vorliegen muss. Dazu wird geprüft, ob im Rahmen der Zusammenstellung von Erkundungszielen für die übertägige Erkundung (Kneuker et al. 2020) entsprechende Erkundungsziele definiert sind. Diese Ziele definieren, für welche Größen künftige Erkundungstätigkeiten für die Indikatoren bewertet werden (siehe Kapitel 8.8.2.4).

Für lokal verfügbare Daten oder geowissenschaftliche Bewertungen wird in einem zweiten Schritt geprüft, inwieweit diese Informationen als gesichert oder belastbar gelten können. Das Urteil, ob etwas als gesichert angesehen werden kann, lässt sich nicht sinnvoll anhand von formalen Kriterien (z. B. Anzahl Messwerte, Studie in einem anerkannten wissenschaftlichen Journal) a priori festlegen. Diese Entscheidung muss letztlich bei der Bearbeitung der Geosynthese (§ 5 EndlSiUntV) und der Analyse des Endlagersystems (§ 7 EndlSiUntV) begründet und dokumentiert werden. Gesicherte lokal verfügbare Daten führen zur Einstufung des Kenntnisstandes als “hoch”. Lokal nicht gesicherte Daten begründen die Einstufung als “mittel”, sie werden damit den übertragbaren Kenntnissen gleichgestellt (Abbildung 214).

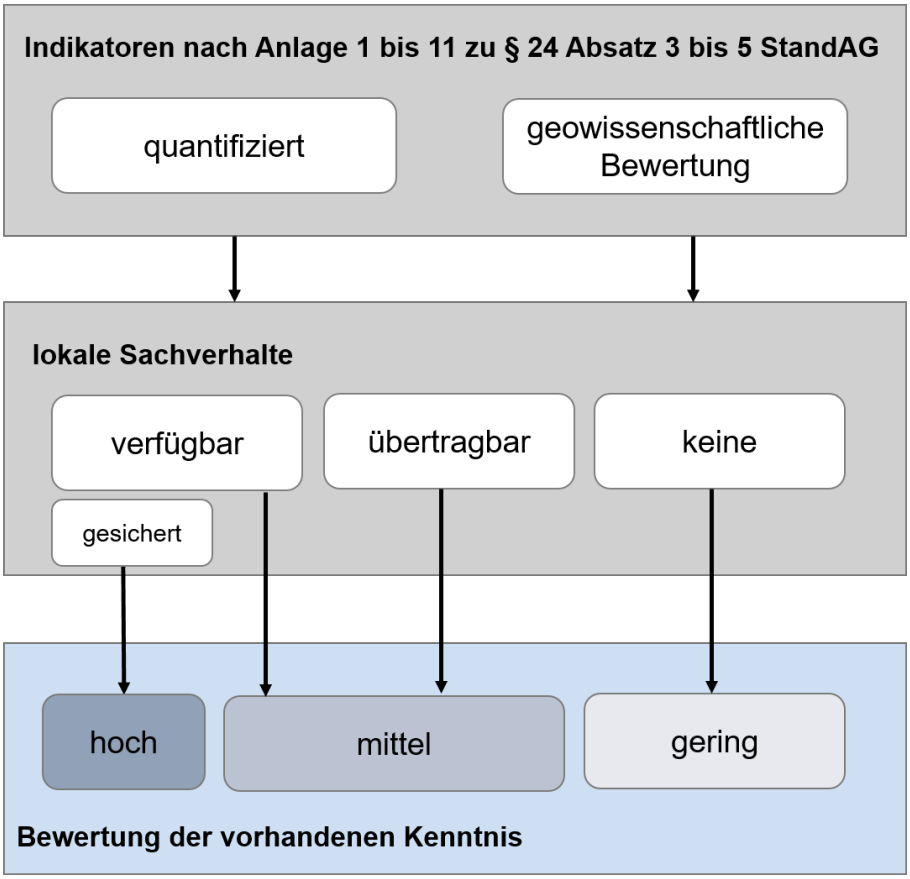


Abbildung 214: Ableitung der Bewertung der lokalen Sachverhalte

Die ermittelten Gruppen i) gering, ii) mittel oder iii) hoch haben folgende Bedeutung:

1. **hoch**: Es liegen ausreichend Informationen vor, um eine Bewertung mittels des Indikators gesichert durchführen zu können; ein zukünftiger Erkenntnisgewinn führt mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht zu einer Änderung der Bewertung des Endlagersystems durch den Indikator
2. **mittel**: Es liegen Informationen vor, um eine Bewertung mittels der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien durchführen zu können, die Information ist (teilweise) nicht abgesichert; es ist nicht ausgeschlossen, dass ein zukünftiger Erkenntnisgewinn zu einer Änderung der Bewertung des Endlagersystems durch den Indikator führen kann
3. **gering**: Es liegen keine ausreichenden Informationen vor, um eine Bewertung mittels der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien gesichert durchführen zu können

8.8.2.4 Potenzial für den Erkenntnisgewinn

Als dritten zu bewertenden Relevanzaspekt definiert § 7 Abs 4 EndlSiUntV das Potenzial für den Erkenntnisgewinn zum jeweiligen Kriterium aufgrund künftiger Erkundungstätigkeiten. Nach dem generellen Ansatz erfolgt dazu jeweils eine begründetet Kategorisierung in i) gering, ii) mittel oder iii) hoch.

Wie bei den ersten beiden Relevanzaspekten wird das Potenzial für den Erkenntnisgewinn für die Indikatoren der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien auf der generellen und der lokalspezifische Ebene bestimmt. Solange die Einteilung des Untersuchungsraums in Bereiche noch nicht gegeben ist, können lokalspezifische Kenntnisse nicht identifiziert oder bewertet werden.

Zur Bewertung der Indikatoren zu den geowissenschaftlichen Abwägungskriterien werden wie bei der Bewertung der Kenntnis zu den lokalen Sachverhalten (Kapitel 8.8.2.3) die Erkundungsziele für die Indikatoren aus (Kneuker et al. 2020) herangezogen. Diese Ziele definieren, für welche Größen künftige Erkundungstätigkeiten für die Indikatoren bewertet werden.

Im zweiten Schritt werden aus der Datenbank GeM-DB (Kneuker et al. 2021)[28] die den Erkundungszielen zugeordneten geophysikalischen und geowissenschaftlichen Erkundungsmethoden abgefragt hinsichtlich des Potenzials für den Erkenntnisgewinn bewertet[29]. In der Datenbank GeM-DB werden allen Indikatoren der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien geeignete Methoden zugeordnet und in drei Gruppen unterteilt

1. Sehr gut geeignete Methoden
2. Gut geeignete Methoden und
3. Weniger gut geeignete Methoden.

Diese Einteilung wird genutzt, um das Potenzial für den Erkenntnisgewinn zum jeweiligen Kriterium aufgrund künftiger Erkundungstätigkeiten zu bewerten (Abbildung 215): Liegen für den zu bewertenden Indikator sehr gut geeignete Methoden vor, ist das Potenzial für den Erkenntnisgewinn als „hoch“ zu bewerten. Liegen zumindest gut geeignete Methoden vor, ist das Potenzial für den Erkenntnisgewinn als „mittel“ zu bewerten. Liegen gar keine oder nur weniger gut geeignete Methoden vor, ist das Potenzial für den Erkenntnisgewinn gering.

[28] https://gem-db.bgr.de

[29] Weitere Quellen für mögliche zu bewertende Erkundungsmethoden sind in (Haneke et al. 2021) und (Kock et al. 2021) dokumentiert.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

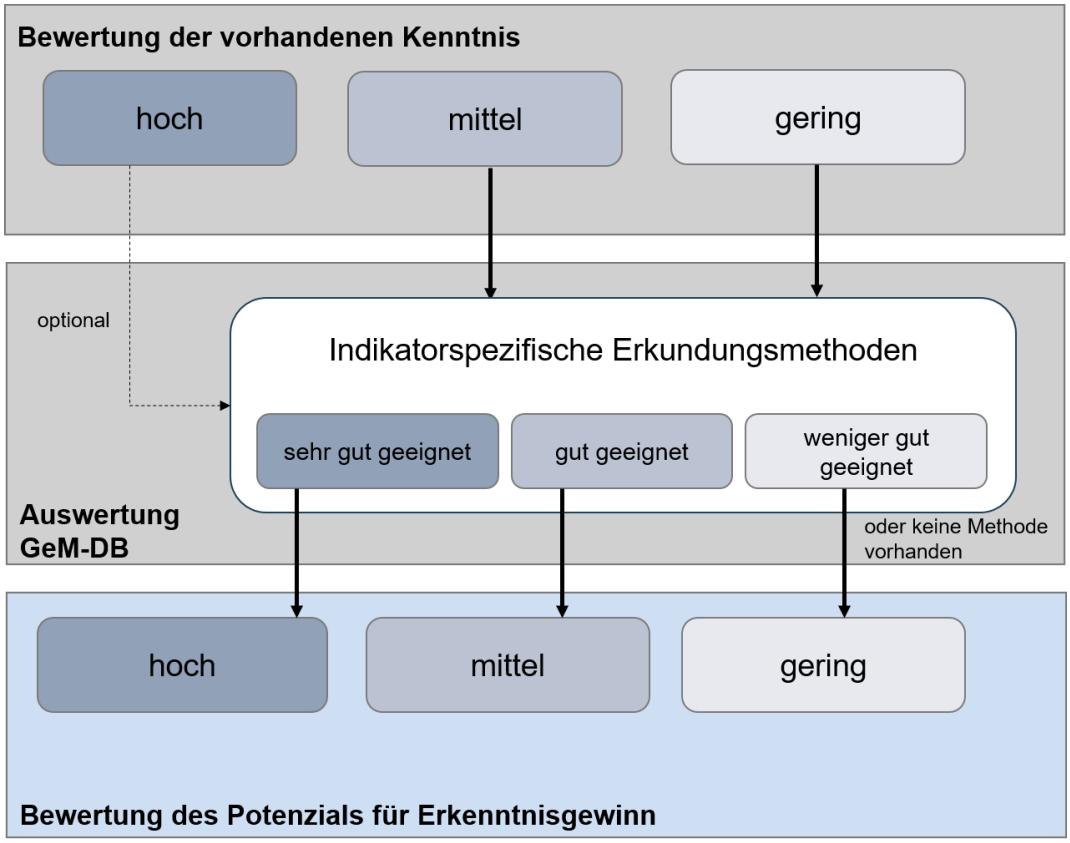


Abbildung 215: Ableitung der Bewertung des Potenzials für einen Erkenntnisgewinn

8.9 Beurteilung der zusätzlichen Einlagerung von schwach- und mittelradioaktiven Abfällen (SMA)

Im Rahmen des Standortauswahlverfahrens ist auch zu untersuchen, ob die Endlagerung von SMA in einem Endlager am gleichen Standort möglich ist. Gemäß § 1 Abs. 6 StandAG ist die Endlagerung SMA am auszuwählenden Standort zulässig, „*wenn die gleiche bestmögliche Sicherheit des Standortes wie bei der alleinigen Endlagerung hochradioaktiver Abfälle gewährleistet ist*“. Im Rahmen der rvSU ist zunächst gemäß § 7 Abs. 6 Nr. 6 EndlSiUntV anhand des Volumens des potenziell vorkommenden Wirtsgesteins zu beurteilen, inwiefern die zusätzliche Endlagerung größerer Mengen SMA im gleichen Untersuchungsraum möglich ist. Dazu ist in § 21 Abs. 2 EndlSiAnfV geregelt, dass „ein separates Endlagerbergwerk aufzufahren“ ist. Zur Bewertung werden zunächst das Mengengerüst für ein SMA-Endlager beschrieben und anschließend die Vorgehensweise zur Beurteilung, inwiefern die zusätzliche Endlagerung größerer Mengen SMA unter Berücksichtigung der Anforderungen nach § 21 EndlSiAnfV im gleichen Untersuchungsraum möglich ist. Die Beurteilung der Möglichkeit einer zusätzlichen SMA- Endlagerung hat keine Auswirkung auf die Bewertung der Möglichkeit des sicheren Einschlusses eines Untersuchungsraums und ist für diejenigen Untersuchungsräume vorgesehen, die als Standortregionen in Frage kommen.

8.9.1 Mengengerüst für die zusätzliche Einlagerung größerer Mengen SMA

Die für eine zusätzliche Einlagerung heranzuziehenden Abfälle lassen sich in vier Gruppen einteilen: die rückzuholenden Abfälle aus der Schachtanlage Asse II, die verbliebenen Abfallmengen aus der Urananreicherung, graphithaltige Abfälle aus Forschungs-, Versuchs- und Prototypreaktoren und sonstige nicht-Konrad-gängige Abfälle. Diese vier Gruppen werden nachfolgend kurz beschrieben.

8.9.1.1 Rückzuholende Abfälle aus der Schachtanlage Asse II

In der Schachtanlage Asse II sind insgesamt 125 787 Gebinde mit radioaktiven Abfällen mit einer Gesamtmasse von ca. 89 000 Mg und einem Abfallvolumen von ca. 47 000 m³ eingelagert (BMU 2021b). Nach der Rückholung dieser Gebinde (BMUB 2015a) sowie größerer Mengen kontaminierten oder den Gebinden anhaftenden Salzgruses und nach Konditionierung und Verpackung dieser Abfälle wird von einem endzulagernden Abfallgebindevolumen von 175 000 m³ bis 220 000 m³ ausgegangen. Für die Beurteilung der zusätzlichen Einlagerung von SMA wird konservativ ein Abfallgebindevolumen von 220 000 m^3 verwendet.

8.9.1.2 Abfälle aus der Urananreicherung

Aus der kommerziellen Urananreicherung zur Herstellung von Brennelementen für Leichtwasserreaktoren sind Abfälle in Form abgereicherten Urans angefallen. Chemisch liegt dieses abgereicherte Uran als Uranhexaflourid (UF6) aus dem Anreicherungsprozess vor, das in Fässern gelagert wird. Für die Endlagerung ist eine Konversion in nahezu wasserunlösliches Uran(V,VI)-oxid (U_3O_8) vorgesehen.

Für die VSG wurde ein Gesamtaufkommen von 109 760 Mg Uranoxid und 2 240 Mg Uranhexaflourid angegeben. Mit der unterstellten Konditionierung in Konrad-Stahlblechcontainer Typ VI wurde daraus eine Anzahl von 7 217 Behältern mit einem Gesamtgebindevolumen von 39 261 m³ ermittelt (Peiffer et al. 2012a). Mit der in (Peiffer et al. 2012a) angenommenen Schüttdichte von U_3O_8 ergäbe sich bei vollständiger, restfreier Konversion eine Abfallmenge von ca. 115 120 Mg Uranoxid mit einem Trockenvolumen von ca. 36 000 m³.

Im Verzeichnis radioaktiver Abfälle wurde für das abgereicherte Uran ein Gesamtgebindevolumen von bis zu 100 000 m³ angegeben, falls eine weitere Verwertung nicht erfolgt (BMU 2021b), ebenso im Bericht zur 7. Überprüfungskonferenz des Gemeinsamen Übereinkommens über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle (BMU 2020).

8.9.1.3 Graphithaltige Abfälle

Im Mengengerüst der VSG (Peiffer et al. 2012a) wurde eine (in Gebinde konditionierte) Abfallmenge von 2 900 m³ Graphit bzw. graphithaltiger Abfälle aus dem Rückbau der beiden Hochtemperaturreaktoren AVR und THTR-300 angegeben. Aufgrund der errechneten hohen Konzentrationen an Tritium (H-3) und Radiokohlenstoff (C-14) besteht die Möglichkeit, dass eine Verbringung in das Endlager Konrad aufgrund der Begrenzung dieser Radionuklide nicht zulässig ist (Peiffer et al. 2012a).

Im Forschungsvorhaben „Carbonforest“ (Dörr et al. 2014) wurde das zu erwartende Inventar an Graphit und graphithaltigen Abfällen aus sämtlichen Forschungs-, Versuchs- und Prototypreaktoren ermittelt und unter der Annahme einer Konditionierung in Konrad-Behälter auch ein Mengengerüst endzulagernder Abfallgebinde erstellt. Demzufolge wäre ein Abfallgebindevolumen von ca. 24 410 m³ endzulagern. Das Abfallgebindevolumen wird konservativ auf 25 000 m³ aufgerundet.

8.9.1.4 Sonstige Abfallvolumina

Weitere SMA, „die aufgrund ihres Nuklidinventars und/oder ihrer chemischen Zusammensetzung oder dem Zeitpunkt ihres Anfalls nicht für eine Einlagerung in das Endlager Konrad geeignet sind“ (BMU 2020), müssen hier ebenfalls betrachtet werden.

Im Bericht zur 7. Überprüfungskonferenz zum Gemeinsamen Übereinkommen wird unter den Massen und Volumina radioaktiver Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung zum Stand 31.12.2019 ein Volumen von 124 590 m³ an zwischengelagerten Abfällen in verschiedenen Konditionierungen angegeben, die für das Endlager Konrad vorgesehen sind. Zusätzlich zu dieser Abfallmenge ist für eine im Bericht aufgeführte vergleichsweise geringe Abfallmenge von 146 m³ mit einer Masse von 230 Mg eine Verbringung in ein anderes SMA-Endlager zu bewerten. Es handelt sich hierbei größtenteils um Rohabfälle (unverarbeitete radioaktive Abfälle), Abfälle in Innenbehältern und vorbehandelte Abfälle sowie bereits konditionierte Abfallgebinde (BMU 2020).

Frühere Ergänzungen und Abschätzungen weiterer, nicht-Konrad-gängiger Abfallaufkommen mündeten in einem Mengengerüst von bis zu ca. 15 000 m³ sonstiger SMA für das Abfallmengengerüst der VSG (Peiffer et al. 2012a). Diese als abdeckend angenommene Abschätzung eines zusätzlichen Abfallgebindevolumens von 15 000 m³ wird für die Beurteilung der zusätzlichen Einlagerung von SMA verwendet.

8.9.1.5 Zusammenfassung des SMA-Abfallmengengerüstes

Die in den vorhergehenden Abschnitten beschriebenen Angaben zu Referenzwerten und Abschätzungen des für die Bewertung der Möglichkeit einer Endlagerung von SMA am gleichen Standort wie dem des Endlagers für hochradioaktive Abfälle notwendigen SMA-Abfallmengengerüstes sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 81: Übersicht der Abschätzungen zum zu erwartenden SMA-Inventar

Art der Abfälle	Abfallgebindevolumen in m³	Quelle
Rückzuholende Abfälle aus der Schachtanlage Asse II	220 000	(BMU 2020)
Abfälle aus der Urananreicherung, zu berücksichtigen für den Fall, dass eine weitere Verwertung des abgereicherten Urans nicht erfolgt	100 000	(BMU 2020)

Art der Abfälle	Abfallgebindevolumen in m³	Quelle
Graphithaltige Abfälle	25 000	(Dörr et al. 2014)
Sonstige Abfälle, die aufgrund ihres Nuklidinventars und/oder ihrer chemischen Zusammensetzung oder dem Zeitpunkt ihres Anfalls nicht für eine Einlagerung in das Endlager Konrad geeignet sind	15 000	(Peiffer et al. 2012a)
Summe	**360 000**	

Insgesamt ergibt sich damit ein für die Beurteilung der zusätzlichen Einlagerung von SMA zu berücksichtigendes Mengengerüst von bis zu 360 000 m³.

8.9.2 Vorgehensweise bei der Beurteilung der zusätzlichen Einlagerung von SMA

Um eine Beurteilung durchführen zu können, inwiefern die zusätzliche Endlagerung größerer Mengen SMA im gleichen Untersuchungsraum möglich ist, ist es notwendig sowohl das verfügbare Volumen an potenziellem Wirtsgestein im jeweiligen Untersuchungsraum bzw. Teiluntersuchungsraum als auch das benötigte Volumen für ein Endlagerbergwerk für die zusätzliche Endlagerung von SMA zu quantifizieren. Dafür wird das in Kapitel 8.9.1.5 beschriebene Abfallgebindevolumen für eine Beurteilung der Einlagerung von SMA in ein zusätzliches SMA-Endlager herangezogen.

In den rvSU wird im Rahmen der vorläufigen Auslegung des HAA-Endlagers gemäß § 6 Abs. 4 Nr. 2 EndlSiUntV die maximale Größe eines möglichen Endlagerbergwerks ermittelt, woraus das dafür benötigte Wirtsgesteinsvolumen abgeleitet wird. Daraus folgend wird für ein betrachtetes Gebiet das anschließend noch freie verfügbare Volumen an potenziellem Wirtsgestein bestimmt. Dieses Volumen wird mit dem ermittelten Volumenbedarf eines SMA-Endlagerbergwerk einschließlich eines zu definierenden Mindestabstands zwischen den SMA- und HAA-Endlagerbergwerken verglichen. Der Volumenbedarf des SMA-Endlagerbergwerks wird dabei planerisch erarbeitet und stellt somit eine erste Machbarkeitsindikation dar. Ein reiner Abgleich zwischen dem benötigten und dem vorhandenen Volumen besitzt jedoch nur eine begrenzte Aussagekraft bezüglich der Beurteilung der Möglichkeit der zusätzlichen Endlagerung von größeren Mengen SMA. Es muss dabei berücksichtigt werden, aus welcher Mächtigkeit und horizontalen Ausdehnung sich das noch vorhandene Wirtsgesteinsvolumen zusammensetzt und auf welchem Flächenbedarf sowie vertikaler Ausdehnung der Volumenbedarf des SMA-Endlagerbergwerks basiert.

Zur Bestimmung des Flächenbedarfs eines Bergwerks für die zusätzliche Endlagerung von SMA werden eigene Endlagerauslegungen erarbeitet. Dazu wird die Teufenabhängigkeit des Flächenbedarfs auf Grundlage von gebirgsmechanischen Berechnungen für jedes der Wirtsgesteine untersucht. Analog zur vorläufigen Auslegung des HAA-Endlagers werden Teufen betrachtet, die abdeckend sind und mit denen für verschiedene Teufen der Volumenbedarf für ein zusätzliches

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

SMA-Endlager einschließlich des Mindestabstands mit dem verfügbaren Wirtsgesteinsvolumen nach Abzug des Volumenbedarfs eines HAA-Endlagers verglichen werden kann.

Für das beschriebene Vorgehen werden in einem ersten Schritt wesentliche Ausgangsdaten und -informationen zusammengetragen i) zur Art und Menge der Abfälle, die in einem deutschen SMA-Endlager eingelagert werden müssen (vgl. Kapitel 8.9.1), ii) zu den in Deutschland zugelassenen Behältern zur Endlagerung SMA und iii) zu bereits bestehenden nationalen und internationalen SMA-Endlagerkonzepten.

Neben der Erarbeitung der allgemeinen Grundlagen werden wirtsgesteinsspezifische Vorarbeiten durchgeführt. Dazu zählt zum einen die Zusammenstellung von geomechanischen Eigenschaften der verschiedenen Wirtsgesteine für die Berücksichtigung zur Auslegung des Endlagers. Zum anderen werden die teufenabhängigen Parameter (insb. Gebirgsdrücke) ermittelt und Berechnungsverfahren zur Abschätzung der Teufenabhängigkeit dieser Parameter bei der Endlagerflächenberechnung erarbeitet.

Im nächsten Schritt folgt die wirtsgesteinsspezifische und teufenabhängige SMA-Endlagerauslegung. Dazu sind einige konzeptionelle Festlegungen zu treffen, auf denen die Endlagerauslegung basiert, z. B. zum Einlagerungskonzept und zur untertägigen Infrastruktur. Für die Ermittlung der maximal notwendigen horizontalen Ausdehnung wird zunächst eine einsöhlige Einlagerung betrachtet. Eine mehrsöhlige Einlagerung ist nur bei größerer Mächtigkeit des Wirtsgesteins möglich; hierbei würde die horizontale Ausdehnung des Endlagers reduziert.

Ebenso wichtig ist die Festlegung der eingangs dargelegten grundlegende Planungsgrößen, zum Teil auf Basis der eingangs durchgeführten Recherchearbeiten, wie z. B. des zur Endlagerung verwendeten Behältertyps, der Behältermenge und der Streckenquerschnitte. Mithilfe der verschiedenen Festlegungen lässt sich anschließend das grundlegende Layout des Endlagerbergwerks entwickeln und graphisch darstellen.

Unter Berücksichtigung dieser Vorgehensweise und den abgeleiteten Festlegungen für die Endlagerauslegung erfolgt mittels Berechnungsverfahren eine überschlägige Abschätzung der teufenabhängigen Flächenbedarfe für die jeweiligen Wirtsgesteine. Dabei werden für die jeweiligen identifizierten Parameter mögliche Abhängigkeiten des Flächenbedarfs für unterschiedliche Teufen ermittelt und bewertet. Ausgehend von den ermittelten Flächenbedarfen wird unter Berücksichtigung der vertikalen Ausdehnung des Endlagerbergwerks der entsprechende Volumenbedarf bestimmt. Schließlich wird auf Basis des Abgleichs der Volumina von Endlagerbergwerk und verfügbaren potenziellen Wirtsgestein die Beurteilung der Möglichkeit einer zusätzlichen Endlagerung von größeren Mengen SMA im gleichen Untersuchungsraum bzw. Teiluntersuchungsraum eines HAA-Endlagers durchgeführt. Liegt das berechnete Volumen unterhalb des zur Verfügung stehenden Wirtsgesteinsvolumen, so ist die zusätzliche Endlagerung möglich.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

9 Umfassende Bewertung des Endlagersystems für jeden Untersuchungsraum (§ 10 EndlSiUntV)

In den rvSU muss für jeden Untersuchungsraum eine umfassende Bewertung gemäß § 10 EndlSiUntV durchgeführt werden (siehe Abbildung 216). Nach BT-Drs. 19/19291, S. 52 stellt „d*ie umfassende Bewertung des Endlagersystems [.] die zentrale Aussage einer vorläufigen Sicherheitsuntersuchung dar. Im Kern beinhaltet sie nach § 27 Abs. 1 StandAG eine Prognose über die zu erwartende Qualität des erreichbaren Einschlusses der radioaktiven Abfälle im jeweiligen Untersuchungsraum, wobei die entsprechenden Anforderungen nach § 4 EndlSiAnfV als Maßstab heranzuziehen sind.“*

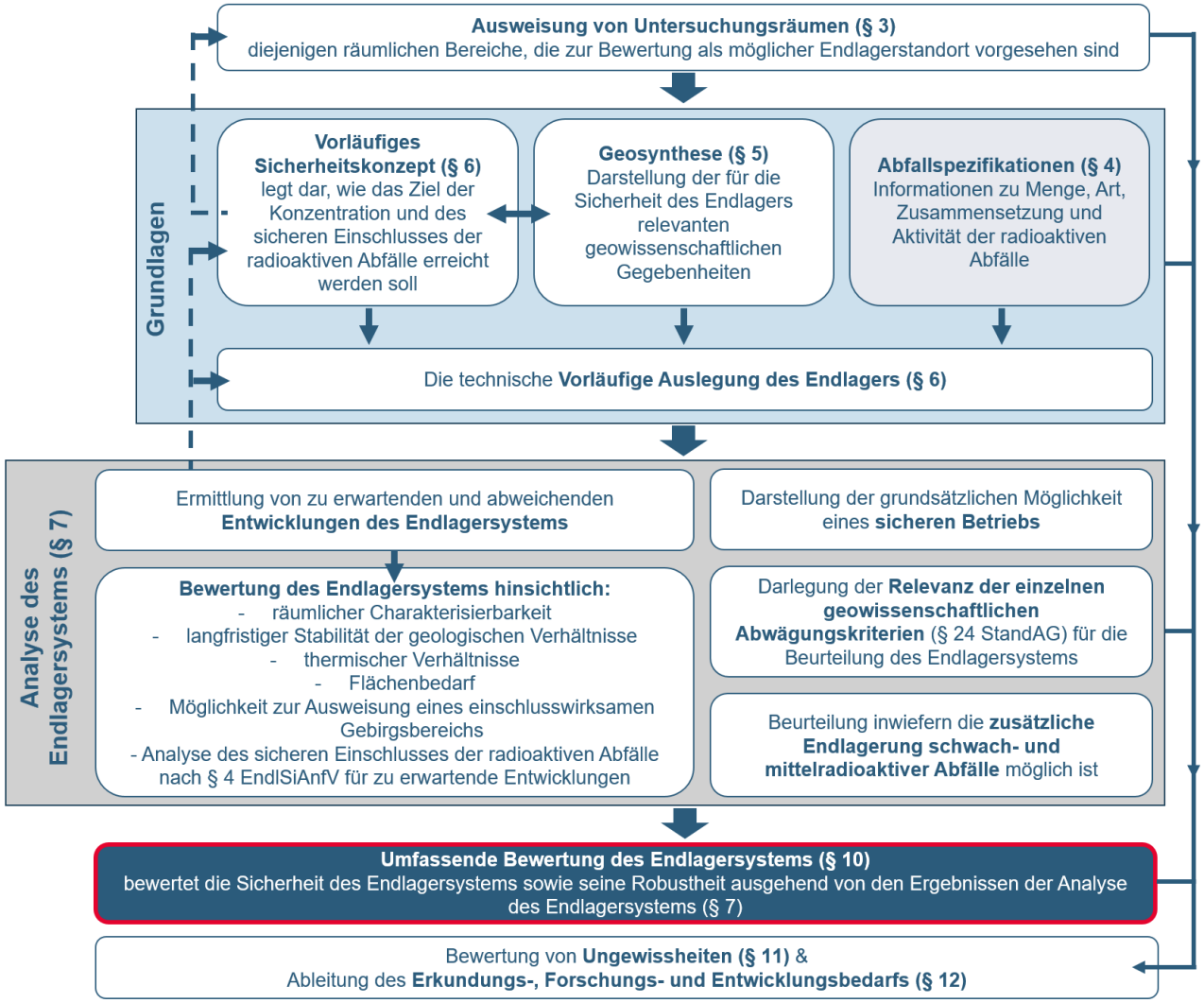


*Abbildung 216: Einordnung der umfassenden Bewertung in den Kontext der rvSU in Phase I, Schritt 2 des Standortauswahlverfahrens*Das Ziel der Bearbeitung von § 10 EndlSiUntV ist die Bewertung der *Sicherheit und Robustheit des Endlagersystems* je Untersuchungsraum ausgehend von den Ergebnissen der Analyse des Endlagersystems (§ 7 EndlSiUntV). Im Gegensatz zu § 7 EndlSiUntV, in der jeder Aspekt

fokussiert und separat bewertet wird, bringt die umfassende Bewertung des Endlagersystems alle Aspekte und die Ergebnisse der Prüfschritte zusammen und führt zu einer Gesamtbewertung. Diese Gesamtbewertung erfolgt je Untersuchungsraum. Wurde ein Untersuchungsraum in Laufe der rvSU in Teiluntersuchungsräume unterteilt (vgl. Kapitel 5.6), so erfolgt zwar eine separate umfassende Bewertung der Sicherheit je Teiluntersuchungsraum, die Ergebnisse werden jedoch anschließend für den gesamten Untersuchungsraum zusammengeführt. Ergebnis der umfassenden Bewertung kann dabei eine differenzierte Bewertung bezüglich der Sicherheit sein.

Wie in Kapitel 1.2.1 erläutert und in Abbildung 6 dargestellt, erzeugt der prozessuale Ablauf der rvSU eine Bewertung der Sicherheit und Robustheit des Endlagersystems in Kategorien, die sich aus der Bearbeitung der vier Prüfschritte ableiten. Die Kategorisierung der Bewertungen soll der transparenten Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse der Prüfschritte dienen und kann darüber hinaus für eine flächendifferenzierte Darstellung herangezogen werden. Abbildung 217 zeigt schematisch eine solche Darstellung für einen fiktiven Untersuchungsraum. Eine wesentliche Motivation bei diesem Vorgehen ist, dadurch eine gestaffelte Bearbeitungstiefe anwenden zu können, um eine möglichst detaillierte Bearbeitung der am besten geeigneten Gebiete zu gewährleisten. Zugleich wird sichergestellt, dass alle Gebiete, auch diejenigen die keine überwiegend gute Bewertung erhalten haben, einer transparenten Eignungsprüfung unterzogen worden sind.

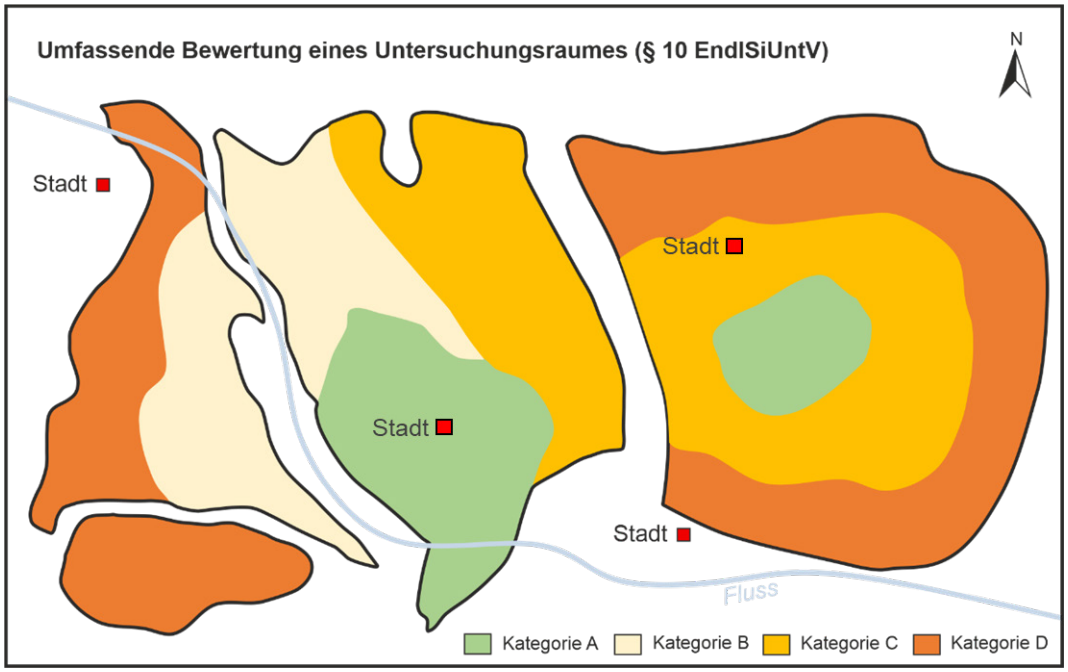


Abbildung 217: Beispielhafte Darstellung der Bewertungen in die Kategorien A bis D nach § 10 EndlSiUntV eines fiktiven Untersuchungsraums

Im Folgenden wird die Bedeutung der Bewertungen von Untersuchungsraum bzw. Teiluntersuchungsraum (oder Bereichen davon, im Folgenden als Bereiche bezeichnet) anhand der Kategorien erläutert:

- Kategorie D: Bereiche, die mit Kategorie D bewertet werden erfüllen entweder ein Ausschlusskriterium (§ 22 StandAG) oder erfüllen nicht die Mindestanforderungen (§ 23 StandAG) und dementsprechend nicht die Anforderungen an einen Endlagerstandort. Da die Anwendung der Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen in den rvSU zielgerichtet erfolgt, kann die Bewertung in Kategorie D auf jeder der Ebenen (2) bis (4) der Bearbeitungsschritte (vgl. Kapitel 1.2.1) erfolgen.
- Kategorie C: enthält Bereiche, die ungeeignet sind oder keine überwiegend gute Eignung in Bezug auf die Sicherheit und Robustheit des Endlagersystems aufweisen, da sie bei den Prüfschritten der qualitativen oder quantitativen Bewertung des sicheren Einschlusses überwiegend schlecht abgeschnitten haben.
- Sicherheitsgerichteter Diskurs: Es wird zum jetzigen Zeitpunkt in der Methodenentwicklung erwartet, dass die Bereiche, die nicht in Kategorie C oder D fallen, anschließend weiter nach ihrer Eignung in einer integralen Sichtweise diskutiert werden, um die am besten geeigneten von den weniger guten Bereichen zu trennen. In einem letzten Prüfschritt, dem sicherheitsgerichteten Diskurs, sollen daher im Rahmen von § 10 EndlSiUntV alle bislang erfolgten qualitativen und quantitativen Bewertungen gemeinsam betrachtet werden. Dieser Diskurs wird verbalargumentativ erfolgen, aber ergänzend die Evaluierung von entsprechenden Kennzahlen enthalten. Das Ergebnis des sicherheitsgerichteten Diskurs sind Bereiche, die in Kategorie A oder Kategorie B fallen. Kategorie A enthält Bereiche, welche die am besten geeigneten Gebiete in Bezug auf Sicherheit und Robustheit aufweist.

Im Ergebnis der umfassenden Bewertung ist vorgesehen, dass ausschließlich Bereiche, die nach Kategorie A bewertet wurden, im Anschluss an die rvSU im Rahmen von § 14 StandAG einer erneuten Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien unterzogen werden. Darüber hinaus erfolgt nur für diese Bereiche der Kategorie A die Bewertung von Ungewissheiten (§ 11 EndlSiUntV, siehe Kapitel 10), die Ableitung des Erkundungs-, Forschungs- und Entwicklungsbedarf (§ 12 EndlSiUntV, siehe Kapitel 11), die Beurteilung der Möglichkeit zur zusätzlichen Endlagerung von schwach- und mittelradioaktiven Abfällen (§ 7 Abs. 6 Nr. 4 EndlSiUntV, siehe Kapitel 8.9) sowie die Bewertung der Relevanz der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien (§ 7 Abs. 4 EndlSiUntV, siehe Kapitel 8.8).

In einem Untersuchungsraum können, wie oben dargestellt, mehrere räumlich getrennt voneinander liegende Bereiche als am besten geeignet (Kategorie A) ermittelt werden. Im Sicherheitsuntersuchungsbericht zu jedem Untersuchungsraum werden diese Bereiche dann jeweils einzeln vorgestellt.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

10 Bewertung von Ungewissheiten (§ 11 EndlSiUntV)

10.1 Gesetzliche Grundlagen

Im Zuge der rvSU wird in § 11 Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung (EndlSiUntV) die „Bewertung von Ungewissheiten“ geregelt (vgl. Abbildung 218). § 11 Abs. 1 EndlSiUntV umfasst dabei die systematische Ausweisung und Charakterisierung der Ungewissheiten, welche zum Zeitpunkt der Erstellung der jeweils durchzuführenden vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (vSU) bestehen. Dementsprechend bezieht sich die Ausweisung von Ungewissheiten in Phase I, Schritt 2 des Standortauswahlverfahrens (§ 14 StandAG) auf die rvSU. Eine vergleichbar detaillierte Vorgabe für die Betrachtung von Ungewissheiten war in den ehemaligen Sicherheitsanforderungen aus dem Jahr 2010 (BMU 2010) nicht enthalten. Diese erste, gezielte Auseinandersetzung mit Ungewissheiten im Kontext des Standortauswahlverfahrens bildet die Grundlage für die Betrachtung von Ungewissheiten in den weiterentwickelten (wvSU) und umfassenden (uvSU) vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen in den Phasen II (vgl. § 16 StandAG) und III (vgl. § 18 StandAG) des Verfahrens.

Die EndlSiUntV gibt vor, dass:

1. alle bestehenden Ungewissheiten systematisch ausgewiesen und charakterisiert werden müssen (§ 11 Abs. 1 EndlSiUntV). Hierbei ist zu beschreiben, auf welchen Sachverhalten und Kenntnisdefiziten die Ungewissheiten beruhen. Ebenfalls sind Verknüpfungen von Ungewissheiten untereinander zu berücksichtigen und aufgrund von Ungewissheiten getroffene Annahmen zu erläutern und zu begründen. Ungewissheiten in Zusammenhang mit der Modellierung in der Langzeitsicherheitsanalyse (§ 9 Abs. 2 EndlSiUntV) sind in den rvSU noch nicht zu betrachten.
2. der Umgang mit den bestehenden Ungewissheiten und deren Auswirkungen dokumentiert werden sollen (§ 11 Abs. 2 EndlSiUntV). Im Fokus steht dabei der Einfluss der bestehenden Ungewissheiten auf die Aussagekraft des Ergebnisses der rvSU und auf die Zuverlässigkeit sicherheitsgerichteter Aussagen.
3. darzustellen ist, ob und in welchem Umfang bestehende Ungewissheiten durch weitere Erkundungs-, Forschungs- und Entwicklungsmaßnahmen reduziert werden können (§ 11 Abs. 3 EndlSiUntV). Insbesondere ist in diesem Zusammenhang darzulegen, inwieweit durch weitere Erkundungs-, Forschungs- und Entwicklungsmaßnahmen die Zuverlässigkeit sicherheitsgerichteter Aussagen verbessert werden kann.

In den folgenden Kapiteln wird zunächst der Begriff „Ungewissheiten“ erläutert und der aktuelle Wissensstand hinsichtlich Ungewissheiten in Zusammenhang mit der Endlagerung radioaktiver Abfälle beschrieben. Anschließend wird die Strategie zur Umsetzung der Vorgaben der EndlSiUntV in den rvSU vorgestellt.

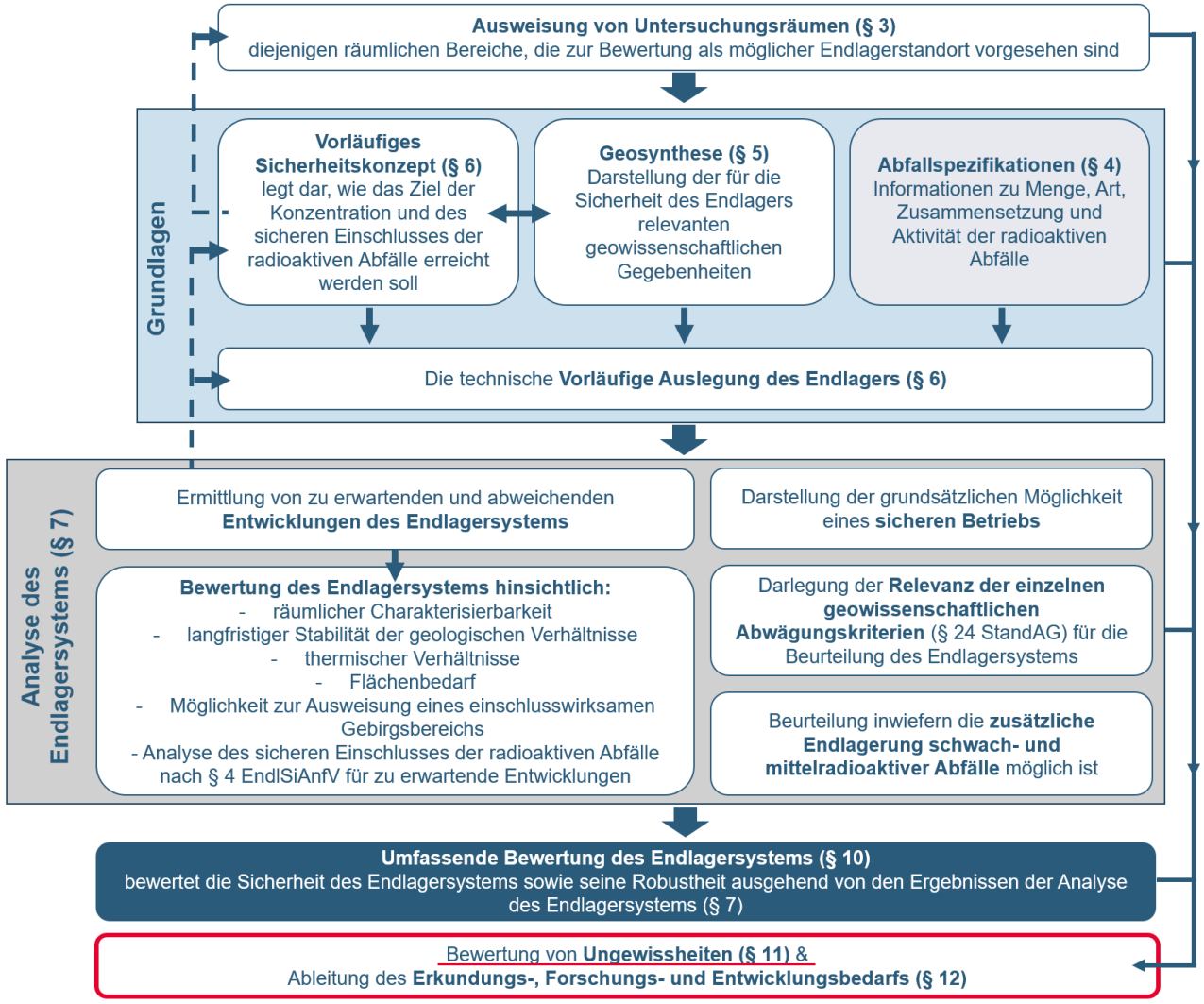


Abbildung 218: Einordnung der Betrachtung von Ungewissheiten in den übergeordneten Kontext der rvSU in Phase I, Schritt 2 des Standortauswahlverfahrens

10.2 Definition und Verwendung des Begriffs „Ungewissheit“

Wie in Kapitel 10.1 dargestellt, ist die Betrachtung von Ungewissheiten elementarer Bestandteil der vSU im Standortauswahlverfahren. Es ist absehbar, dass Ungewissheiten im Dialog mit der Öffentlichkeit einen bedeutenden Aspekt darstellen, insbesondere hinsichtlich der Fragestellung, inwieweit die Sicherheit eines Endlagers über den Bewertungszeitraum von einer Million Jahren (vgl. § 1 Abs. 2 StandAG) gewährleistet werden kann. Um ein allgemeines Verständnis des Begriffs zu ermöglichen, ist es erforderlich, den Begriff „Ungewissheit“ im Kontext des Standortauswahlverfahrens zu definieren und einzuordnen.

Der Begriff „Ungewissheit“ wird, insbesondere in Kombination mit den Begriffen „Risiko“ und „Unsicherheit“, je nach Kontext anders verwendet und definiert (Eckhardt 2020). Ungewissheiten, bzw. die englische und international übliche Bezeichnung „uncertainties“, werden nach Zimmermann (2001) beispielsweise wie folgt definiert:

*"Uncertainty implies that in a certain situation a person does not dispose about information which quantitatively is appropriate to describe, prescribe and predict deterministically and numerically a system, its behavior or other characteristic." (*deutsch: *„Ungewissheit impliziert, dass in einer bestimmten Situation eine Person nicht über die Information verfügt, welche quantitativ angemessen ist, um ein System, dessen Verhalten oder andere Charakteristika deterministisch und numerisch zu beschreiben oder vorherzusagen.")*

Die „International Atomic Energy Agency" (IAEA) führt in ihrem Glossar (IAEA 2019) keine konkrete Definition des Begriffs „Ungewissheiten" auf. Der Begriff „uncertainty" wird im Glossar zwar erwähnt, allerdings wird lediglich darauf hingewiesen, dass sowohl aleatorische, als auch epistemische Ungewissheiten existieren (siehe Kapitel 10.3.1).

Die in Finnland für die Entsorgung nuklearer Abfälle zuständige Organisation „Posiva Oy" definiert den Begriff „uncertainty" in Nummi (2019) als:

*"Uncertainty is understood as a lack of certainty in describing and modelling a system. Uncertainty is caused by a combination of incomplete knowledge (epistemic uncertainty) and random variability (aleatory uncertainty)" (*deutsch: *„Ungewissheit wird als ein Mangel an Gewissheit zur Beschreibung und Modellierung eines Systems verstanden. Ungewissheit entsteht durch eine Kombination unvollständigen Wissens (epistemische Ungewissheiten) und zufälliger Variabilität (aleatorische Ungewissheiten)")*

In diesem Kontext wird hervorgehoben, dass die Begriffe „Ungewissheiten" und „Risiko" nicht gleichbedeutend sind, und dass Ungewissheiten auch Faktoren miteinschließen, die während der Erstellung des „Safety Cases"[30] unbekannt bleiben (Nummi 2019). Im Vergleich dazu beschreibt die schwedische Organisation SKB („Svensk Kärnbränslehantering AB"), die für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in Schweden verantwortlich ist, Ungewissheiten wie folgt (SKB 2015):

*"Lack of knowledge and other uncertainties in the calculation presumptions (assumptions, models, data) are in this context denoted as uncertainties." (*deutsch: *„Ein Mangel an Wissen und andere Ungewissheiten in den Berechnungsgrundlagen (Annahmen, Modelle, Daten) werden in diesem Kontext als Ungewissheiten bezeichnet.")*

Eckhardt (2020) führt eine allgemeine Definition des Begriffs „Ungewissheit" auf, welche an den „Safety Case" anschließt:

„Ungewissheit besteht im Safety Case dort, wo Informationen nicht ausreichend oder nicht eindeutig genug sind, um die Möglichkeit eines Schadens im Bewertungszeitraum […] einzuschätzen."

[30] Ein „Safety Case" bezeichnet allgemein eine Sammlung von Argumenten und Beweisen zur Demonstration der Sicherheit einer Anlage und kann als eine während der Lebensdauer eines Projektes fortgeschriebene Sammlung von Argumenten und Beweisen verstanden werden, auf deren Basis im gesamten Projektverlauf Entscheidungen getroffen, gerechtfertigt und dokumentiert werden (BGE 2020af).

Im deutschen Sprachgebrauch wird der Begriff „Ungewissheit“ oft synonym mit dem Begriff „Unsicherheit“ verwendet. Im StandAG selbst und dessen Begründung (BT-Drs. 18/11398) findet der Begriff „Unsicherheit“ Anwendung. Demgegenüber wird in der Endlagersicherheitsanforderungsverordnung (EndlSiAnfV) und der EndlSiUntV generell der Begriff „Ungewissheit“ verwendet, mit Ausnahme der einmaligen Verwendung des Begriffs „Unsicherheitsanalyse“. In den vorherigen Sicherheitsanforderungen aus dem Jahr 2010 (BMU 2010) wurde wiederum ausschließlich der Begriff „Unsicherheit“ verwendet. Allerdings liegt hier eine gewisse Doppeldeutigkeit vor, da der Begriff „Unsicherheit“ sowohl eine unvollständige Informationslage (englisch: „uncertainty“), als auch das Bestehen einer potenziellen Gefährdung (englisch: „insecurity“) beschreiben kann. Eckhardt (2020) plädiert dafür, ausschließlich den Begriff „Ungewissheit“ zu verwenden und die Bezeichnung „Unsicherheit“ nur in Zusammenhang mit dem Begriff „Unsicherheitsanalyse“ zu nutzen, da es sich hierbei um eine etablierte Terminologie handelt. Auch Fischer-Appelt et al. (2013) weisen darauf hin, dass der Begriff „Unsicherheit“ mit *„einer möglichen Gefährdung verwechselt werden kann“*. Basierend darauf wird im Projekt „Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben“ (VSG), das noch auf den ehemaligen Sicherheitsanforderungen aus dem Jahr 2010 (BMU 2010) aufbaut, auf den Begriff „Unsicherheit“ verzichtet und der Begriff „Ungewissheit“ verwendet (Fischer-Appelt et al. 2013). Die Begriffe „Ungewissheitsanalyse“ und „Unsicherheitsanalyse“ finden in der VSG jedoch beide Anwendung (Fischer-Appelt et al. 2013).

Basierend auf der etablierten Verwendung des Begriffs „Ungewissheit“, z. B. in der EndlSiUntV, Eckhardt (2020) und Fischer-Appelt et al. (2013), präferiert auch die BGE den Begriff „Ungewissheit“ gegenüber „Unsicherheit“. Dementsprechend verwendet die BGE auch den Begriff „Ungewissheitsanalyse“.

Unter Einbezug vorhergehender und unter Berücksichtigung internationaler Arbeiten definiert die BGE Ungewissheiten im Zusammenhang mit dem Standortauswahlverfahren wie folgt:

- Ungewissheit ist ein Mangel an Gewissheit und/oder Informationen zur Beschreibung des Systems und somit zur Einschätzung möglicher negativer Konsequenzen.
- Ungewissheiten können sowohl durch fehlendes Wissen, als auch durch natürliche Variabilität entstehen.

10.3 Aktueller Wissensstand

10.3.1 Ursachen für Ungewissheiten und Kategorisierungsansätze

Im folgenden Kapitel wird ein kurzer Überblick über die Natur und die Ursachen von Ungewissheiten gegeben. Darüber hinaus werden internationale Kategorisierungsansätze von Ungewissheiten, z. B. von der IAEA, Posiva Oy oder der Nagra, die in der Schweiz für die Entsorgung nuklearer Abfälle zuständige Organisation, beschrieben. Die von der BGE verwendete Kategorisierung von Ungewissheiten wird in Kapitel 10.4.3 vorgestellt.

International besteht Konsens über die Klassifizierung von Ungewissheiten anhand ihres natürlichen Ursprungs und ihrer Quellen in Sicherheitsbewertungen radioaktiver Abfällen, auch wenn teilweise

unterschiedliche Terminologie verwendet wird (Röhlig et al. 2012). In der Regel werden die Ungewissheiten, die mit der Repräsentation von Systemen der realen Welt verbunden sind, auf Basis ihrer Natur und ihrer Quellen folgendermaßen kategorisiert (IAEA 2019; Nummi 2019; IAEA 2013):

1. **Aleatorische Ungewissheit** ist die inhärente, natürliche Variabilität eines Sachverhalts, die von dem stochastischen Charakter des zu Grunde liegenden Prozesses (wie zum Beispiel dem Prozess des Atomzerfalls) entsteht. Diese Ungewissheit ist nicht reduzierbar.
2. **Epistemische Ungewissheit** resultiert aus fehlendem Wissen. Diese Art von Ungewissheit ist deshalb zumindest theoretisch durch Gewinnung von neuen Informationen anhand weiterführender Forschung oder Experimente reduzierbar. Die Ungewissheit resultierend aus Vereinfachungen in der Beschreibung eines komplexen Phänomens sowie das Expertenwissen über einen Sachverhalt zählen zu epistemischen Ungewissheiten.

In verschiedenen Fällen können beide Arten von Ungewissheiten in demselben Sachverhalt auftreten, beispielsweise bei der Beschreibung von einem stochastischen (aleatorischen) Phänomen mit nicht ausreichender Datenlage (epistemisch) (siehe auch Abbildung 219):

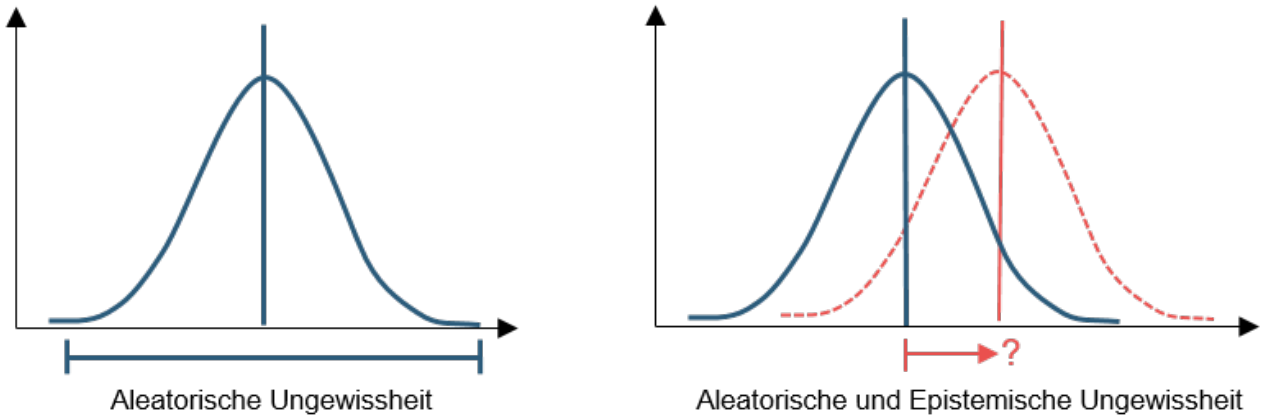


Abbildung 219: Exemplarische Illustration aleatorischer und epistemischer Ungewissheiten anhand einer fiktiven Parameterverteilung.
Links: Aufgrund der statistischen Variabilität des Parameters ergibt sich eine Verteilung von Parameterwerten, in diesem Fall eine Normalverteilung mit einem bestimmten Mittelwert und einer Standardabweichung. Dies ist eine aleatorische Ungewissheit. Rechts: Aufgrund von Kenntnisdefiziten kann die Verteilung der Parameterwerte nicht genau bestimmt werden, sodass keine genaue Aussage über den Mittelwert gemacht werden kann. Die Ungewissheit bezüglich der Art und des Aussehens der Parameterverteilung wird als epistemische Ungewissheit bezeichnet.

Ferner gibt es weitere Möglichkeiten, wie Ungewissheiten kategorisiert werden können. Je nach Anwendung können dabei unterschiedliche Vor- und Nachteile bestehen. Hinsichtlich der Beschreibung von Endlagersystemen haben sich die folgenden Kategorien international etabliert (IAEA 2012; Nagra 2002a; Nummi 2019; Röhlig et al. 2012; OECD-NEA 1997; Nagra 2016b; Baltes & Röhlig 2004):

1. **Szenarienungewissheiten**: Diese Kategorie wird beispielsweise von Nummi (2019) und Nagra (2016b) verwendet und beschreibt Ungewissheiten in Bezug auf die allgemeine Entwicklung des Endlagersystems und seiner Umgebung, d. h. das Verhalten des technischen Systems, der physikalischen Prozesse und der geologischen Standortbedingungen im Laufe der Zeit vor und nach dem Verschluss des Endlagers.
2. **Modellungewissheiten**: Ungewissheiten in Zusammenhang mit unvollständigem Wissen und/oder eingeschränktem Verständnis der natürlichen und technischen Systeme oder der zugrundeliegenden physikalischen Prozesse und deren Wechselwirkungen. Dies umfasst ebenfalls Einschränkungen der (Computer-)Modelle, diese Prozesse ohne Genauigkeitsverlust abzubilden. Dies rührt vor allem von den notwendigen Vereinfachungen und Annahmen durch mathematische Darstellungen und Abstraktionen, die zur Betrachtung des Systems und der Prozesse verwendet werden müssen. Nagra (2016b) bezeichnet diese Ungewissheit auch als konzeptionelle Ungewissheit.
3. **Parameterungewissheiten**: Ungewissheiten in Bezug auf die Parameter, die in den implementierten Bewertungsmodellen (Computermodellen) verwendet werden. Sie resultieren in der Regel aus der natürlichen Variabilität bestimmter Parameter über Raum und/oder Zeit, aus unzureichenden Daten, aus der Extrapolation eines Parameterwerts von Laborbedingungen auf den realen Systemmaßstab, oder aus Messfehlern bei Experimenten (Nagra 2002a; OECD-NEA 1997). Diese Ungewissheit wurde in Röhlig et al. (2012) als Parameter- und Datenungewissheit und in Nummi (2019) nur als Datenungewissheit bezeichnet.

In SKB (2015) sind die Ungewissheiten, die die Unvollständigkeit der Beschreibung des Endlagersystems mit seinen maßgeblichen Merkmalen, Ereignissen und Prozessen (FEPs) darstellen, als „Systemungewissheit“ definiert. Die „Modellungewissheit“ wird verwendet, um Fehler in den Berechnungsmodellen zu beschreiben. Der Begriff „Parameterungewissheit“ wird von SKB darüber hinaus für die Bezeichnung der nicht vollständig bekannten Eingangsparameter der Berechnungsmodelle verwendet. Außerdem wird der Begriff „räumliche Parametervariation“ eingesetzt, um sich hauptsächlich auf physikalische Parameter, wie hydraulische, mechanische und chemische Prozesse mit räumlicher Variabilität, zu beziehen (SKB 2015).

Die seitens der BGE vorgenommene Kategorisierung wird im Kapitel 10.4.3 vorgestellt.

10.3.2 Etablierte Strategien zum Umgang mit Ungewissheiten

Im folgenden Unterkapitel werden sowohl die international anerkannte, allgemeine Herangehensweise zum Umgang mit Ungewissheiten, als auch diverse Methoden zum Umgang mit Ungewissheiten skizziert. Die Herangehensweise der BGE, welche sich an internationalen Arbeiten orientiert, wird in Kapitel 10.4.4 erläutert.

Die allgemein anerkannte Strategie zum Umgang mit Ungewissheiten umfasst (IAEA 2013; Vigfusson et al. 2007):

1. die Identifikation von Ungewissheiten,
2. deren Charakterisierung und Bewertung sowie
3. die Vermeidung und/oder Reduzierung von Ungewissheiten.

Vigfusson et al. (2007) empfehlen, Ungewissheiten zu identifizieren und einen Katalog für alle signifikanten Ungewissheiten zu erstellen, in welchem alle Ungewissheiten nachverfolgt werden können. Falls eine Ungewissheit als nicht signifikant für eine weitere Betrachtung und Analyse eingeordnet wird, sollen dies und die entsprechenden Gründe dafür dokumentiert werden.

Um Szenarienungewissheiten zu charakterisieren und zu bewerten, werden nach IAEA (2012) im Allgemeinen eine Anzahl verschiedener Szenarien betrachtet, welche ein Referenzszenario (im Englischen auch oft: „base case scenario“) und weitere Alternativszenarien umfassen. Diese Szenarien sollen anhand einer gut definierten Methodik unter der Berücksichtigung der FEPs abgeleitet werden (Nummi 2019; IAEA 2012).

Für jedes Szenario müssen demnach Modell- und Parameter- bzw. Datenungewissheiten betrachtet werden. Dazu dient oft der Vergleich von unterschiedlichen alternativen Modellen. Laut IAEA (2012) können darüber hinaus Sensitivitäts- und Ungewissheitsanalysen genutzt werden, um z. B. zu zeigen, dass das System bezüglich bestimmter Parameter nicht sensitiv ist, auch wenn diese stark verändert werden. Des Weiteren können Ungewissheiten hinsichtlich der Daten und Modelle mittels konservativer Annahmen berücksichtigt werden. Hier hebt die IAEA aber klar hervor, dass diese Annahmen gewisse Vor- und Nachteile mit sich bringen können (IAEA 2012). Einerseits kann eine konservative Annahme die Demonstration der Einhaltung einer regulatorischen Vorgabe unterstützen, anderseits können zu viele konservative Annahmen dazu führen, dass das System nicht realistisch abgebildet wird (IAEA 2012). Zur Charakterisierung von Ungewissheiten empfiehlt die IAEA (IAEA 2013) sowohl die Verwendung von deterministischen als auch probabilistischen Ansätzen (siehe auch Kapitel 10.3.3). Insbesondere bei der Kommunikation von Ergebnissen aus probabilistischen Ansätzen gegenüber Entscheidungsträgern können deterministische Rechnungen hilfreich sein. Darüber hinaus weist die IAEA darauf hin, dass, wenn Ungewissheiten genannt werden, auch eine Bewertung hinsichtlich der Sicherheit und eine Strategie zum zukünftigen Umgang mit der Ungewissheit mit angeführt werden sollten (IAEA 2012).

Die Strategie der Nagra, beispielweise zum Umgang mit Ungewissheiten, umfasst eine vorhergehende Untersuchung der identifizierten Ungewissheiten hinsichtlich ihrer potenziellen sicherheitsge-

richteten Relevanz, basierend u. a. auf Ergebnissen aus Sensitivitätsanalysen oder wissenschaftlichem Verständnis (Nagra 2002a). Alle Ungewissheiten, die in Folge der Analyse als nicht relevant bezüglich der Sicherheit bewertet werden, werden bei dem Vorgehen der Nagra entweder nicht weiter in folgenden Analysen betrachtet, oder werden mittels „What If“[31]-Fällen analysiert. Der Umgang mit den verbliebenen, relevanten Ungewissheiten ist davon abhängig, ob deren radiologische Konsequenzen anhand eines Modells weiter analysiert werden können und ob die Ungewissheit generell reduzierbar ist. Im Falle, dass ein entsprechendes Modell vorhanden ist und die Ungewissheit reduzierbar ist, führt die Nagra einen probabilistischen Ansatz und/oder ggf. weitere Analysen durch, um die radiologische Konsequenz zu untersuchen. Falls keine Modelle vorhanden sind, oder eine Reduktion nicht möglich ist, trifft die Nagra eine konservative Annahme. Diese gewährleistet, dass radiologische Konsequenzen nicht unterschätzt werden (Nagra 2002a).

Generell stellt der Umgang mit Ungewissheiten im Kontext der Endlagerung einen iterativen Prozess dar, bei welchem mit jeder Iteration im Verfahren identifizierte Ungewissheiten reduziert oder sogar eliminiert werden können, z. B. durch Erkundungen (Fischer-Appelt et al. 2013). Trotz der Durchführung von Reduzierungsmaßnahmen werden allerdings nicht alle Ungewissheiten in Gänze reduziert oder vermieden werden können. Darüber hinaus wird es immer Ungewissheiten geben, welche nicht identifiziert werden. Diese sind per Definition nicht Teil der Ungewissheitsanalyse (Nummi 2019). Ziel ist es, mittels der Betrachtung und Bewertung von Ungewissheiten das Verständnis des Systems und möglicher radiologischer Konsequenzen zu verbessern (Nagra 2002a) und durch die Reduzierung von Ungewissheiten und deren Auswirkungen ein robustes Endlagerkonzept zu erlangen, welches resistent ist gegenüber inneren und äußeren Einflüssen (Nummi 2019).

10.3.3 Möglichkeiten der Charakterisierung von Ungewissheiten

Im folgenden Kapitel werden verschiedene Möglichkeiten zur Charakterisierung von Ungewissheiten dargestellt, die international Anwendung finden. Ansätze, welche von der BGE bei der Charakterisierung von Ungewissheiten verfolgt werden, werden in Kapitel 10.4, insbesondere in Kapitel 10.4.5, beschrieben.

Nachdem Ungewissheiten im Endlagersystem identifiziert wurden, folgt in einem nächsten Schritt im Allgemeinen deren Beschreibung (Charakterisierung), um unter den identifizierten Ungewissheiten eine Sicherheitsbewertung des Systems zu ermöglichen. Diese Charakterisierung erfolgt in der Regel nach Art der durchgeführten Sicherheitsanalyse.

Nach Röhlig et al. (2012) werden bei der quantitativen Sicherheitsbewertung von geologischen Endlagern radioaktiver Abfälle hauptsächlich zwei quantitative Analyseansätze verwendet: die deterministische und die probabilistische Methode. Diese werden in den meisten Ländern sogar als komplementäre Ansätze verwendet. In Vigfusson et al. (2007) und Röhlig et al. (2012) ist angegeben,

[31] „What if“- Szenarien/Fälle entsprechen den hypothetischen Entwicklungen, die in den rvSU noch nicht abgeleitet werden sollen (siehe Kapitel 8.2.2

dass sowohl deterministische, als auch probabilistische Analysemethoden bei der Sicherheitsbewertung des Endlagers eingesetzt werden können, um das Verhalten des Systems besser zu verstehen und möglichst viele seiner Variationen zu erfassen.

In der deterministischen Analyse wird die Ungewissheit in der Regel nicht nach ihrem Typ differenziert und es werden nur einige Grenzen definiert, die die unbestimmten Phänomene oder Eigenschaften umfassen. Anschließend wird eine Reihe von deterministischen Modellrechnungen durchgeführt, die in den meisten Fällen erwartete typische Situationen, Grenzsituationen und exemplarische Extremsituationen darstellen. Laut Vigfusson et al. (2007) können diese Berechnungen zeigen, dass das System auch unter konservativen Annahmen sicher ist.

Demgegenüber werden in der probabilistischen Analyse die ungewissen Parameter oder Phänomene, die normalerweise die Merkmale („Features“) des Systems repräsentieren, als Zufallsvariablen oder Zufallsfelder behandelt. Dabei werden Wahrscheinlichkeitsverteilungen, die aus verfügbaren Daten ermittelt wurden, verwendet, um die entsprechenden Ungewissheiten zu quantifizieren (Bjorge et al. 2022). Die Ermittlung dieser Verteilungen kann, wie in Nummi (2019) beschrieben, auch durch die Bayes‘sche-Aktualisierung („Bayesian Updating“) erfasst werden. Darin werden a priori Verteilungsfunktionen auf Basis verfügbarer Daten erfasst. Anschließend werden diese Verteilungen anhand neuer Informationen, z. B. aus Literaturquellen oder durch Expertenwissen, aktualisiert, um die a posteriori Verteilungsfunktionen zu gestalten (Nummi 2019).

Den Wahrscheinlichkeitsverteilungen werden auch Ungewissheiten zugeordnet, die sich auf epistemische Ungewissheiten in der Beschreibung der physikalischen Prozesse des Endlagersystems beziehen. Ein Beispiel ist die Ungewissheit verbunden mit einem rein mathematischen Parameter (deterministischer Wert, aber unbekannt), der in der mathematischen Repräsentation der Prozesse verwendet wird. In diesem Fall repräsentieren die Wahrscheinlichkeitsverteilungen den Grad der Überzeugung („degree of belief“), d. h. die Gültigkeit einer Modellannahme (Vigfusson et al. 2007).

Nach der Quantifizierung der Ungewissheiten mittels Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktionen wird in der Regel der Einfluss dieser Ungewissheiten auf Basis einer Monte-Carlo-Simulation unter Verwendung eines geeigneten Stichprobenverfahrens bewertet (Nummi 2019).

Bei der Modellierung der epistemischen (subjektiven) Ungewissheiten durch eine Wahrscheinlichkeitsverteilung, die den Grad der Überzeugung („degree of belief“) wiedergibt, können verzerrte und irreführende Ergebnisse erzielt werden, die Artefakte der Bewertung sind (Vigfusson et al. 2007). Daher werden z. B. hybride Ansätze verwendet, welche in der Lage sind, die aleatorische und die epistemische Ungewissheit (Grad der Überzeugung oder Expertenurteil) adäquat zu modellieren. Zwei Beispiele für diese Methoden sind der unpräzise Wahrscheinlichkeitsansatz („Imprecise Probability“) (Beer et al. 2013) und der „Fuzzy-Randomness-Ansatz“ (Möller & Beer 2004). Diese Methoden sind von besonderer Bedeutung bei der Charakterisierung der Eigenschaften, die gleichzeitig epistemische und aleatorische Ungewissheiten beinhalten – z. B. bei der Beschreibung eines Parameters (Eigenschaft) mit natürlicher Variabilität anhand unzureichender Daten. Darüber hinaus kann die „Fuzzy-Theory“-Methodik (Bandemer & Gottwald 1995), die zu den nicht-deterministischen An-

sätzen gehört, zur Ungewissheitscharakterisierung verwendet werden. Dieser Ansatz überführt näherungsweise semi-quantitative oder rein qualitative Aussagen zu Ungewissheiten in numerische Werte (Bereiche).

10.4 Umgang und Bewertung von Ungewissheiten in den rvSU

10.4.1 Überblick der Herangehensweise

Kapitel 10.1 beschreibt die in der EndlSiUntV enthaltenen Vorgaben in Bezug auf die Betrachtung von Ungewissheiten in den rvSU. Diese Vorgaben sowie der unter Kapitel 10.3 dargelegte aktuelle Wissensstand zum Thema Ungewissheiten bilden die Rahmenbedingungen der Konzeptentwicklung. Das nachfolgende Kapitel skizziert die Herangehensweise, wie mit Ungewissheiten in den rvSU umgegangen werden soll.

Die Herangehensweise basiert dabei einerseits auf den regulatorischen Vorgaben und andererseits auf dem übergeordneten Konzept zur Durchführung der rvSU (BGE 2022a). Herausforderung war insbesondere, für die komplexe Thematik der Ungewissheiten ein für die rvSU bzw. Phase I, Schritt 2 des Standortauswahlverfahrens angemessenes Abstraktionslevel zu finden.

Das übergeordnete Konzept zur Durchführung der rvSU (BGE 2022a) sieht eine detaillierte Betrachtung von Ungewissheiten in den rvSU nur für Teiluntersuchungsräume der Kategorie „A“ vor (Abbildung 220). Diese enthält von den vier verschiedenen Kategorien („A“, „B“, „C“, „D“, vgl. Abbildung 220) die am besten geeignetsten Teiluntersuchungsräume.

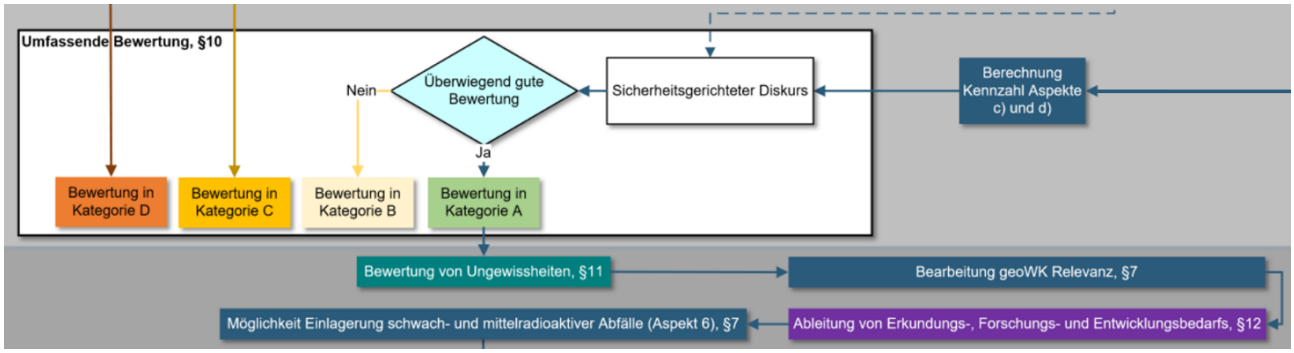


Abbildung 220: Ausschnitt aus dem allgemeinen Arbeitsablauf der rvSU gemäß des übergeordneten Konzepts zur Durchführung der rvSU (verändert nach BGE 2022a)

Anzumerken ist jedoch, dass, unabhängig davon, Ungewissheiten trotzdem während eines jeden Arbeitsschritts der rvSU zu identifizieren und entsprechend den Vorgaben der EndlSiUntV einzuordnen sind. Die Betrachtung von Ungewissheiten erfolgt somit grundsätzlich über die gesamte rvSU hinweg. Die detailliertere Betrachtung von Ungewissheiten für Teiluntersuchungsräume der Kategorie A soll als Teil der bzw. im Nachgang der umfassenden Bewertung des Endlagersystems in Berichtsform erfolgen. Die generelle Vorgehensweise zum Umgang mit Ungewissheiten in den rvSU orientiert sich an den Vorgaben der EndlSiUntV und ist in schematischer Form in Abbildung 221 dargestellt. Basierend auf den Anforderungen der EndlSiUntV und international anerkannten Herangehensweisen, lässt sich die generelle Vorgehensweise wie folgt beschreiben:

- Identifikation und Ausweisung der bestehenden Ungewissheiten, wobei eine systematische Erfassung der bestehenden Ungewissheiten je wesentlichem Arbeitsschritt der rvSU (z. B. „Geosynthese“ – § 5 EndlSiUntV oder „Analyse des Endlagersystems“ – § 7 EndlSiUntV, etc.) in einer Erfassungstabelle (siehe Kapitel 10.4.2) erfolgt.
- Charakterisierung und Kategorisierung der bestehenden Ungewissheiten.
- Beschreibung und Dokumentation des Umgangs mit den identifizierten Ungewissheiten – beispielsweise die Betrachtung von Ungewissheiten anhand von Ungewissheits- oder Sensitivitätsanalysen.
- Beschreibung der Auswirkungen der bestehenden Ungewissheiten, insbesondere hinsichtlich der Sicherheit des Endlagersystems.
- Abschätzung des Einflusses weiterer Erkundungs-, Forschungs- und Entwicklungsmaßnahmen auf die identifizierten Ungewissheiten.

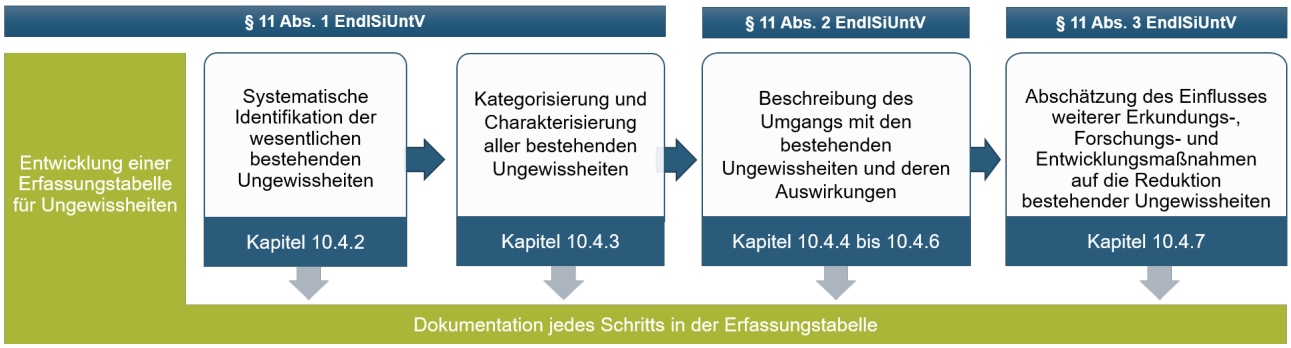


Abbildung 221: Schematische Darstellung der Herangehensweise zum Umgang mit Ungewissheiten in den rvSU basierend auf den Anforderungen von § 11 EndlSiUntV mit Verweisen zu den jeweiligen Kapiteln in diesem Dokument

Es ist anzumerken, dass mit Fortlauf der Überlegungen zur Durchführung der rvSU ggf. Anpassungen des hier vorgestellten Konzepts möglich sind („lernendes Verfahren“). Ebenso ist abzusehen, dass sich die Vorgehensweise in Bezug auf den Umgang mit Ungewissheiten im Laufe des Standortauswahlverfahrens mit zunehmendem Kenntnisstand weiterentwickeln wird, beispielsweise durch verstärkt durchgeführte Sensitivitätsanalysen in den verwendeten Modellen und die Berücksichtigung der Arbeiten und Ergebnisse des von der BGE initiierten und gegenwärtig laufenden Forschungsvorhabens zu Ungewissheiten („Ungewissheiten und Robustheit mit Blick auf die Sicherheit eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle – URS“). Es ist also z. B. zu erwarten, dass die Herangehensweise in Bezug auf Ungewissheiten in Phase II des Standortauswahlverfahrens (vgl. § 16 StandAG) abweichend und komplexer sein wird.

10.4.2 Systematische Erfassung und Dokumentation von Ungewissheiten

Basierend auf den Vorgaben von § 11 EndlSiUntV bzw. den Anforderungen der einzelnen Absätze in Bezug auf die rvSU, wurde initial eine Erfassungstabelle zur systematischen Erfassung und Einordnung der bestehenden Ungewissheiten sowie zur Dokumentation des Umgangs mit den Ungewissheiten entwickelt. Jede identifizierte Ungewissheit soll innerhalb der Erfassungstabelle aufgeführt, entsprechend den Anforderungen der EndlSiUntV eingeordnet und mit den verschiedenen Arbeitsschritten der rvSU in Verbindung gebracht werden. Die Erfassungstabelle dient der Erfüllung sämtlicher Anforderungen des § 11 EndlSiUntV in Hinblick auf den Umgang mit Ungewissheiten in den rvSU und somit den gesetzlichen Bestimmungen des Standortauswahlverfahrens. Die Erfassungstabelle ist für jeden Teiluntersuchungsraum individuell ausfüllbar.

Die Identifikation von Ungewissheiten erfolgt für jeden Arbeitsschritt der rvSU (s. u.) systematisch über gezielte, auf der Erfassungstabelle basierenden Abfragen an die für die einzelnen Arbeitsschritte jeweils zuständigen Bearbeiterinnen und Bearbeiter. Die Erfassungstabelle zielt darauf ab, die während der rvSU auftretenden Ungewissheiten systematisch zu dokumentieren und entsprechend den Vorgaben von § 11 EndlSiUntV einzuordnen und zu bewerten. Die Erfassungstabelle ist so aufgebaut, dass eine systematische Ausweisung und Betrachtung von Ungewissheiten entsprechend § 11 EndlSiUntV erfolgen kann. Mögliche Ungewissheiten sollen dabei abhängig von den für die rvSU erforderlichen, wesentlichen Arbeitsschritten ausgewiesen werden. Diese entsprechen grundsätzlich den folgenden Vorschriften der EndlSiUntV:

- § 3 EndlSiUntV (Untersuchungsraum),
- § 5 EndlSiUntV (Geosynthese),
- § 6 EndlSiUntV (vorläufiges Sicherheitskonzept, vorläufige Auslegung des Endlagers),
- § 7 EndlSiUntV (Analyse des Endlagersystems),

Hinzu kommen methodische Vorüberlegungen bzw. vorbereitende Arbeiten zu den rvSU. Jeder Arbeitsschritt kann darüber hinaus, in Anlehnung an das übergeordnete Konzept zur Durchführung der rvSU (BGE 2022a), bei Bedarf noch in weitere Teil-Arbeitsschritte unterteilt werden. Generell wird jede Ungewissheit dem jeweiligen Arbeitsschritt zugeordnet, in dem sie identifiziert wurde. Die in den jeweiligen Arbeitsschritten ausgewiesenen Ungewissheiten werden anschließend mit Bezug zu den unterschiedlichen Anforderungen von § 11 EndlSiUntV noch detaillierter beschrieben und bewertet. Zum Ausfüllen besteht entweder die Möglichkeit, einen Text einzugeben, oder eine vorgegebene Antwortmöglichkeit auszuwählen. Letzteres bietet die Möglichkeit des Filterns für eine weiterführende Auswertung der bestehenden Ungewissheiten und eine Identifikation von Verknüpfungen zwischen verschiedenen Ungewissheiten.

Die Bearbeitung der Erfassungstabelle erfolgt, entsprechend den unterschiedlichen Bestimmungen von § 11 EndlSiUntV, in drei Bearbeitungsabschnitten:

1. Charakterisierung (vgl. § 11 Abs. 1 EndlSiUntV),
2. Umgang und Auswirkungen (vgl. § 11 Abs. 2 EndlSiUntV),

3. Reduktion durch Erkundungs-, Forschungs- und Entwicklungsbedarf (vgl. § 11 Abs. 3 EndlSiUntV).

Im ersten Bearbeitungsabschnitt „Charakterisierung“, werden die pro wesentlichem Arbeitsschritt der rvSU identifizierten Ungewissheiten zunächst hinsichtlich der Anforderungen von § 11 Abs. 1 EndlSiUntV eingeordnet (Abbildung 222). Dies beinhaltet, neben der eigentlichen Identifikation der bestehenden Ungewissheiten, insbesondere eine allgemeine Erläuterung bzw. Darstellung des jeweils zugrundeliegenden Sachverhalts inkl. Angabe der jeweiligen Ursachen der identifizierten Ungewissheiten. Des Weiteren wird beispielsweise der Bezug zum jeweiligen Teiluntersuchungsraum, Untersuchungsraum, Teilgebiet und zum entsprechenden Wirtsgestein (Steinsalz, Tongestein oder Kristallingestein, vgl. § 1 Abs. 3 StandAG) hergestellt. Innerhalb des Bearbeitungsabschnitts „Charakterisierung“ werden die identifizierten Ungewissheiten außerdem noch einer der vier fest definierten Ungewissheits-Kategorien (siehe dazu Kapitel 10.4.3) zugewiesen. Den Abschluss des Bearbeitungsabschnitts „Charakterisierung“ bilden die Beschreibung der jeweils auf Basis der identifizierten Ungewissheiten getroffenen Annahmen, sowie eine Begründung dieser Annahmen.

§ 11 Abs. 1 EndlSiUntV (Charakterisierung)									
Identifizierte Ungewissheit	Erläuterung der Ungewissheit	Ursache der Ungewissheit	Untersuchungs-raum	Teiluntersuchungs-raum	Teilgebiet	Wirtsgestein	Kategorie der Ungewissheit	Getroffene Annahmen	Begründung der Annahmen

Abbildung 222: Ausschnitt aus der Erfassungstabelle, der die Eingabefelder zur Charakterisierung einer Ungewissheit zeigt

Im nachfolgenden Bearbeitungsabschnitt „Umgang und Auswirkungen“ (vgl. § 11 Abs. 2 EndlSiUntV) sollen der Umgang mit den Ungewissheiten und die Auswirkungen der jeweils bestehenden Ungewissheiten aufgezeigt werden (Abbildung 223). Dabei sind entsprechend § 11 Abs. 2 EndlSiUntV insbesondere die Auswirkungen der Ungewissheiten auf die Aussagekraft der rvSU und die Auswirkungen der Ungewissheiten auf sicherheitsgerichtete Aussagen zu dokumentieren. Hierzu stehen innerhalb der Erfassungstabelle fünf Felder zur Verfügung, in denen zu Beginn zunächst beschrieben wird, ob und inwieweit eine ausgewiesene Ungewissheit Einfluss auf die Ergebnisse der rvSU hat. Nachfolgend ist anzugeben, ob die identifizierte Ungewissheit einen Einfluss auf die Zuverlässigkeit von sicherheitsgerichteten Aussagen hat (ja/nein Aussage). Falls dies zutrifft, ist abzuschätzen, in welchem Maße sie beeinflusst werden. Dies kann, soweit es möglich ist, in Form einer quantitativen oder semi-quantitativen Einschätzung erfolgen. Außerdem ist eine Begründung anzuführen, unabhängig davon, ob die Ungewissheit die sicherheitsgerichteten Aussagen beeinflusst, oder nicht. Abgeschlossen wird der Bearbeitungsabschnitt „Umgang und Auswirkungen“ mit einer Darstellung des Umgangs mit den jeweils identifizierten Ungewissheiten.

§ 11 Abs. 2 EndlSiUntV (Umgang und Auswirkungen)				
Erwartete Auswirkung der Ungewissheit auf die Aussagekraft des Ergebnisses der vSU	Beeinflusst die Ungewissheit die Zuverlässigkeit sicherheitsgerichteter Aussagen?	Wie groß ist das Ausmaß der Beeinflussung?	Warum beeinflusst die Ungewissheit die Zuverlässigkeit sicherheitsgerichteter Aussagen (nicht)?	Umgang mit der Ungewissheit

Abbildung 223: Ausschnitt aus der Erfassungstabelle, der die Eingabefelder zum Umgang mit Ungewissheiten und die Dokumentation ihrer Auswirkungen zeigt

Der letzte Bearbeitungsabschnitt „Reduktion durch Erkundungs-, Forschungs- und Entwicklungsbedarf“ (vgl. § 11 Abs. 3 EndlSiUntV) zielt auf die Einschätzung der Möglichkeit einer Reduktion der identifizierten Ungewissheiten durch weitere Erkundungs-, Forschungs- und Entwicklungsmaßnahmen ab Abbildung 224. Diesbezüglich stehen der Erfassungstabelle vier Felder zur Verfügung. Dabei soll zunächst festgestellt werden, ob sich eine identifizierte Ungewissheit überhaupt reduzieren ließe, und im Weiteren, durch welche konkrete Maßnahme (z. B. Forschung, Entwicklung, Erkundung, etc.) dies bestmöglich erreicht werden könnte. Im Anschluss erfolgen, unter Berücksichtigung der vorherigen Angaben, eine Einschätzung des möglichen Umfangs der Reduktion und eine Abschätzung, ob eine Reduktion der Ungewissheit potenziell die Zuverlässigkeit sicherheitsgerichteter Aussagen erhöhen würde.

§ 11 Abs. 3 EndlSiUntV (Reduktion durch Erkundungs-, Forschungs- und Entwicklungsbedarf)			
Reduzierung der Ungewissheit durch Erkundungs-, Forschungs- und Entwicklungsmaßnahmen möglich?	Reduzierung der Ungewissheit insbesondere durch…	Ausmaß der Reduzierung der Ungewissheit durch Erkundungs-, Forschungs- und Entwicklungsmaßnahmen	Potential zur Erhöhung der Zuverlässigkeit der sicherheitsgerichteten Aussagen durch Erkundungs-, Forschungs- und Entwicklungsmaßnahmen

Abbildung 224: Ausschnitt aus der Erfassungstabelle, der die Eingabefelder zur Reduktion einer Ungewissheit zeigt

Unabhängig von den drei an § 11 EndlSiUntV angelehnten Bearbeitungsabschnitten soll in der Tabelle außerdem noch eine Priorisierung der identifizierten Ungewissheiten in den rvSU vorgenommen werden. Dabei soll insbesondere das Potenzial zur Erhöhung der Zuverlässigkeit sicherheitsgerichteter Aussagen und das Ausmaß und die Möglichkeiten der Reduzierung betrachtet werden. Ferner können für jede Ungewissheit weiterführende Informationen und/oder Kommentare erfasst werden (Abbildung 225).

Übergeordnet	
Priorität der Ungewissheit in den rvSU	Bemerkungen

Abbildung 225: Ausschnitt aus der Erfassungstabelle, der das Eingabefeld zur übergeordneten Priorisierung einer Ungewissheit sowie das Bemerkungsfeld zeigt

10.4.3 Kategorisierung von Ungewissheiten

Um Ungewissheiten hinsichtlich ihrer Quelle einordnen zu können, werden innerhalb der rvSU vier verschiedene Kategorien für Ungewissheiten eingeführt. Diese bilden ein zentrales Element der Erfassungstabelle (siehe Kapitel 10.4.2). Die Notwendigkeit einer Kategorisierung geht aus den in § 11 EndlSiUntV gestellten Anforderungen hervor. Die Kategorien orientieren sich an international üblichen Herangehensweisen (vgl. Kapitel 10.3.1):

1. **Methodische Ungewissheiten**

   Methodische Ungewissheiten beschreiben zum jeweiligen Zeitpunkt im Standortauswahlverfahren grundsätzlich bestehende, übergeordnete Ungewissheiten, die z. B. in Zusammenhang mit gewählten Bearbeitungs- und Herangehensweisen sowie Methoden stehen.

2. **Szenarienungewissheiten**

   Szenarienungewissheiten beziehen sich auf Ungewissheiten im Zusammenhang mit der zukünftigen Entwicklung des Endlagersystems. Sie ergeben sich einerseits aus der Ungewissheit der Zukunft selbst, und andererseits aus einem limitierten Verständnis des Systems sowie der vorhandenen Komponenten und der wirkenden Prozesse.

3. **Modellungewissheiten**

   Modellungewissheiten entstehen durch den Grad der Abstraktion und die damit verbundene vereinfachte Darstellung des Systems. Sie können sowohl konzeptionellen, mathematischen oder rechnerischen Ursprungs sein oder auch durch ein begrenztes Verständnis des modellierten Systems entstehen.

4. **Daten- und Parameterungewissheiten**

   Daten- und Parameterungewissheiten beschreiben Ungewissheiten in Verbindung mit den zur Verfügung stehenden bzw. verwendeten Daten, die als Grundlage zur Bewertung oder als Eingangsgrößen der Modelle dienen. Der Begriff „Daten“ ist dabei weit gefasst und beinhaltet u. a. (Modell-) Parameterdaten, Messdaten zur Modellkalibrierung und Erkundungsdaten. Datenungewissheiten können von limitierter Verfügbarkeit (fehlende Daten oder auch nicht nutzbare Daten, z. B. bei fehlender Digitalisierung), Messungenauigkeiten, oder inhärenter Variabilität herrühren.

Im Vergleich zu den meisten internationalen Ansätzen, welche drei Kategorien (Daten-, Szenarien- und Modellungewissheiten) verwenden, wird innerhalb der rvSU mit den „Methodischen Ungewissheiten“ eine weitere Kategorie eingeführt. Die Entwicklung von Methoden für die rvSU stellt ein wichtiges Element dar, da aufgrund der Einzigartigkeit des Verfahrens – insbesondere in Hinblick auf die große Anzahl der zu betrachtenden Gebiete unterschiedlicher Wirtsgesteine – ein Großteil der Methoden neu entwickelt und geprüft werden muss.

Es ist zu betonen, dass es sich bei Ungewissheiten der oben genannten vier Kategorien um Ungewissheiten handelt, die mit dem Input in die Analyse des Endlagersystems (§ 7 EndlSiUntV) verknüpft sind. Diese sind nicht mit Prognoseungewissheiten (dem Streubereich der Modellergebnisse,

siehe Kapitel 10.4.5) zu verwechseln, die keine eigenständige Kategorie darstellen und ein Teil der Analyseergebnisse und eine Auswirkung der eingehenden Ungewissheiten sind.

Die oben genannten vier verschiedenen Kategorien ermöglichen für jeden Arbeitsschritt der rvSU eine gezielte Einordnung der bestehenden Ungewissheiten.

10.4.4 Umgang mit Ungewissheiten unterschiedlicher Kategorien

Um die Ungewissheiten hinsichtlich der zukünftigen Entwicklung des Endlagersystems abzudecken, werden verschiedene Entwicklungen abgeleitet (Abbildung 226). Das Ausmaß der Ungewissheiten, die den verschiedenen Komponenten und Prozessen im Endlagersystem innewohnen, bestimmt, wie viele abweichende Entwicklungen neben der zu erwartenden Entwicklung abzuleiten sind. Die Ableitung von Entwicklungen wird detailliert in Kapitel 8.2.4 beschrieben.

Die abgeleiteten Entwicklungen können anhand von Rechenfällen, also mittels Computermodellen und entsprechenden Rechenläufen, rechnerisch abgebildet werden. Darüber hinaus kann es sein, dass Entwicklungen identifiziert werden, die nicht rechnerisch betrachtet werden können und deren Auswirkungen somit qualitativ erfasst werden müssen. Dies könnte insbesondere bei hypothetischen Entwicklungen der Fall sein (diese werden jedoch noch nicht in Schritt 2, Phase I des Standortauswahlverfahrens betrachtet), ist aber auch bei zu erwartenden oder abweichenden Entwicklungen nicht ausgeschlossen. Eine qualitative Betrachtung von Entwicklungen und deren Ungewissheiten kann beispielsweise anhand der Erstellung von „What-if“-Fällen verbalargumentativ durchgeführt werden. Für die Entwicklungen, die anhand von Rechenfällen betrachtet werden, werden die bestehenden Ungewissheiten identifiziert. In diesem Fall wird zwischen Modell- und Daten- und Parameterungewissheiten unterschieden.

Modellungewissheiten werden durch die Betrachtung verschiedener Alternativmodelle, die anhand aufgetretener Ungewissheiten definiert werden, berücksichtigt bzw. quantifiziert. Durch die Betrachtung verschiedener Modelle kann ein Referenzmodell identifiziert und festgelegt werden. Beispiele für verschiedene Alternativmodelle können z. B. die Erstellung des Modells anhand eines alternativen Modellcodes, die Verwendung eines alternativen Stoffmodells, oder eine Variation der Randbedingungen umfassen. Die notwendigen Verifikations- und Validierungsmaßnahmen für die zu entwickelnden rechnerischen Modelle sind durchzuführen.

Der Einfluss von Daten- und Parameterungewissheiten wird durch die Durchführung einer Anzahl von Rechenläufen für jedes Modell betrachtet. Jeder Rechenlauf enthält dementsprechend ein eigenes Set an Parametern.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

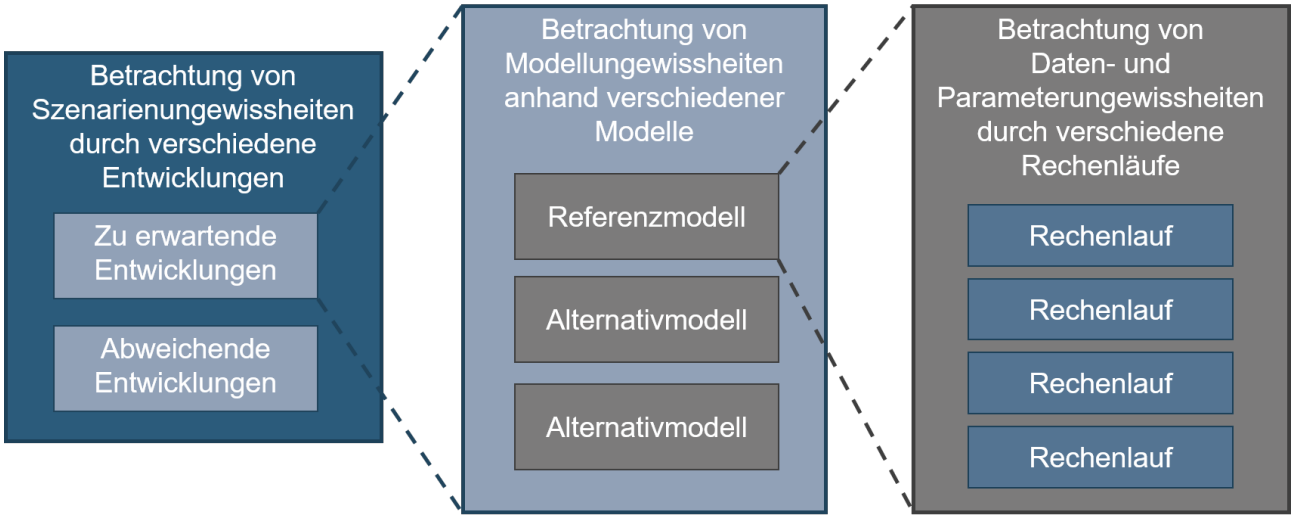


Abbildung 226: Schematische Darstellung des Umgangs mit Ungewissheiten unterschiedlicher Kategorien.
Das hier dargestellte Referenzmodell ergibt sich durch die Betrachtung einer Anzahl von Modellen und wird somit im Laufe der Bearbeitung festgelegt.

Beim Umgang mit Ungewissheiten stehen die Szenarien-, Modell- und die Daten-/Parameterungewissheiten im Vordergrund, da diese über Modelle und Berechnungen dargestellt und auch quantifiziert werden können. Methodische Ungewissheiten werden hier nicht näher erläutert, da diese aufgrund ihrer Natur nicht beschrieben oder quantifiziert werden können. Um mit methodischen Ungewissheiten und deren Auswirkungen umzugehen und diese zu reduzieren, werden vor allem fachliche Einschätzungen durch entsprechende Expertinnen und Experten eingeholt.

10.4.5 Ungewissheiten in Modellen

Ein wichtiges Werkzeug der Bewertung der Sicherheit eines Endlagers sind auf Computermodellen beruhende Abschätzungen hinsichtlich der Freisetzung von Radionukliden aus den eingelagerten Abfällen. Die mittels der systematischen Erfassung gesammelten Ungewissheiten (siehe Kapitel 10.4.2) berühren häufig die Eingangsdaten dieser Computermodelle und werden mittels verschiedener Rechenfälle und Rechenläufe betrachtet. Als Konsequenz setzen sich diese Ungewissheiten während der Modellierung fort und führen zu einer Prognoseungewissheit. Die Prognoseungewissheiten stellen den Streubereich der Modellprognose dar (Abbildung 227), werden aber nicht als eigenständige Ungewissheits-Kategorie im Sinne von Kapitel 10.4.3 betrachtet.

In Hinblick auf die Prognoseungewissheit können die einzelnen Beiträge der Kategorien 1 bis 4 (siehe Kapitel 10.4.3) allerdings nicht einfach aufsummiert werden, da sie in einem komplexen Wirkzusammenhang miteinander stehen. Dieser Zusammenhang und die Einflüsse verschiedener Ungewissheiten werden im Rahmen von sogenannten Sensitivitäts- und Ungewissheitsanalysen (englisch: „sensitivity and uncertainty analysis“) analysiert, um die Prognoseungewissheit zu quantifizieren. Dieser Vorgang der Quantifizierung ist nicht trivial und die Durchführung dieser Analysen stellt einen wesentlichen Teil der Modellierungsarbeit dar.

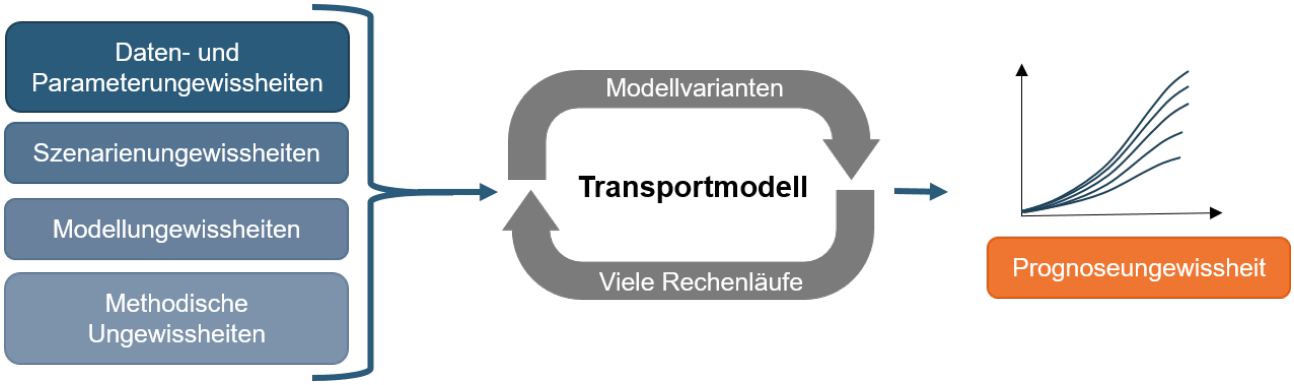


Abbildung 227: Wirkzusammenhang der verschiedenen Ungewissheits-Kategorien. Ungewissheiten in den Eingangsdaten und dem Modellkonzept führen zu einem Ensemble an Ergebnissen bzw. Prognosen. Diese Ungewissheit bezüglich der Ergebnisse kann als Prognoseungewissheit bezeichnet werden.

Hierzu stehen unterschiedliche Methoden zur Verfügung bzw. werden im Rahmen des von der BGE initiierten Forschungsclusters URS weiterentwickelt. Zur Durchführung der Rechenläufe werden z. B. deterministische und probabilistische Analysen in Betracht gezogen. Bei Verwendung des deterministischen Ansatzes werden die erwarteten sowie die extremen Modellparameterkombinationen verwendet, um die „best case“ sowie „worst case“ Situationen widerzuspiegeln. Dagegen wird bei der probabilistischen Methode eine größere Zahl von Modellparameterkombinationen verwendet, um eine für die angenommene Wahrscheinlichkeitsverteilung der Parameter repräsentative Stichprobe zu erhalten. Um die Charakterisierung des epistemischen Teils der Ungewissheiten (insbesondere in den Daten- und Parameterungewissheiten) getrennt vom aleatorischen Teil zu ermöglichen, stehen geeignete Methoden zur Verfügung. Diese Methoden erlauben auch die quantitative Betrachtung von „Expertenwissen“ zu Ungewissheiten.

10.4.6 Auswirkungen von Ungewissheiten auf die Ergebnisse der rvSU

Unterschiedliche Ungewissheiten können mannigfache Auswirkungen haben. Es ist z. B. möglich, dass eine Ungewissheit keinen signifikanten Einfluss auf das Endlagersystem hat, während eine andere Ungewissheit das Endlagersystem erheblich beeinflusst. Von diesen wiederum werden nicht alle Ungewissheiten sicherheitsrelevant sein (z. B. kann eine Ungewissheit auch einen Einfluss auf das Endlagersystem ausüben, der aber nicht hinsichtlich der Sicherheit des Systems relevant ist und sich somit nicht auf sicherheitsgerichtete Aussagen auswirkt, siehe Abbildung 228). Bei der Betrachtung von Auswirkungen ist es daher wichtig, deren Einfluss auf sicherheitsgerichtete Aspekte zu überprüfen, da sicherheitsrelevante Ungewissheiten in der rvSU prioritär zu betrachten sind.

Insbesondere bei der Modellierung des Endlagersystems werden die Auswirkungen von Ungewissheiten deutlich. Ungewissheiten verschiedener Kategorien pflanzen sich zum Ergebnis fort und wirken sich so auf die Prognoseungewissheiten bezüglich des Radionuklidtransports aus (siehe Kapitel 10.4.5).

Ungewissheiten können darüber hinaus auch von der zeitlichen Betrachtung des Endlagersystems abhängig sein und unterschiedliche Auswirkungen haben, je nachdem, welche Entwicklung betrachtet wird. Des Weiteren können sich Auswirkungen auch je nach Zeitpunkt innerhalb des Verfahrens ändern. So kann sich beispielsweise der Einfluss verringern oder vergrößern, nachdem durch Erkundungsmaßnahmen neue Erkenntnisse vorliegen und die Ungewissheit erneut beschrieben wird.

Eine Auswirkung auf eine sicherheitsgerichtete Aussage wird beispielsweise deutlich, wenn durch den Vergleich der Ergebnisse einer quantitativen Ungewissheitsanalyse mit regulatorischen Vorgaben erkannt wird, dass die regulatorische Vorgabe (teilweise) überschritten wird. Wie in Kapitel 10.4.5 beschrieben, entspricht das Ergebnis der Modellierung nicht nur einem Resultat, sondern einem Ensemble bzw. einer Schar von möglichen Resultaten. Bei dem Vergleich der Ergebnisverteilung mit der regulatorischen Vorgabe ist es möglich, dass ein Teil der Verteilung die Vorgabe einhält, während ein anderer Teil der Verteilung den Grenzwert überschreitet. Um mit dieser Auswirkung umzugehen, kann beispielsweise ein begründetes Perzentil gewählt, oder die Verteilung der Ergebnisse analysiert werden, um eine Wahrscheinlichkeit abzuleiten, mit der die Vorgabe eingehalten wird.

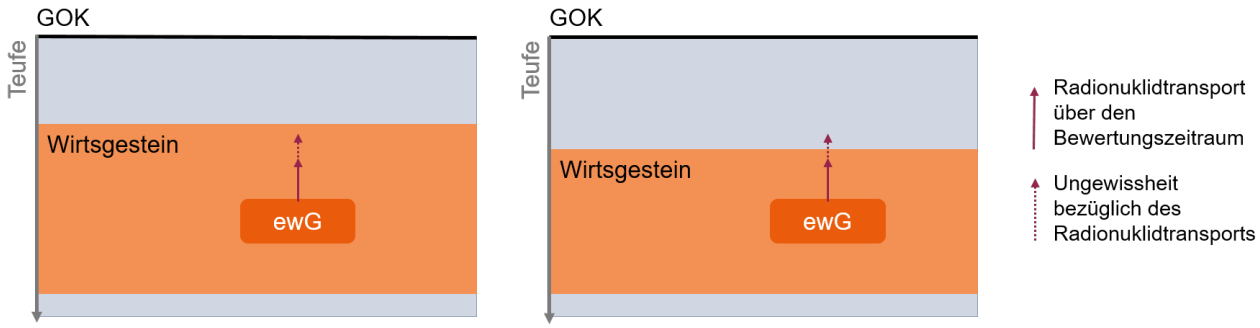


Abbildung 228: Fiktives Beispiel einer Ungewissheit, die je nach dem zu betrachtenden System eine unterschiedliche Auswirkung auf die Sicherheit des Systems hat. Links: Die Mächtigkeit des Wirtsgesteins ist so groß, dass die Ungewissheit keine Auswirkung auf die Sicherheit des Systems hat. Rechts: Bei Betrachtung der Ungewissheit würde der Radionuklidtransport über den Rand des Wirtsgesteins hinausreichen und somit die Sicherheit des Systems beeinflussen. Ein Unterschied in der Mächtigkeit kann sich beispielsweise durch eine ungewisse Beschreibung der Mächtigkeit an sich ergeben, oder durch die Betrachtung einer Entwicklung, die die Mächtigkeit des Wirtsgesteins ändert.

10.4.7 Reduktion von Ungewissheiten basierend auf den rvSU

Während der rvSU liegt der Fokus der Betrachtung von Ungewissheiten auf der systematischen Erfassung und Bewertung der Ungewissheiten der Kategorien 1 bis 4 (siehe Kapitel 10.4.3).

In den nachfolgenden Verfahrensschritten gewinnt die Evaluierung der Ungewissheiten hinsichtlich ihrer sicherheitsgerichteten Relevanz zunehmend an Bedeutung. Die im Zuge der rvSU durchgeführten Arbeiten stellen die wesentliche Vorarbeit dar, um die bestehenden Ungewissheiten systematisch so weit zu reduzieren, bis eine Aussage über die sicherheitstechnische Eignung eines Endlagerstandortes mit hoher Konfidenz getroffen werden kann.

Bei dieser Evaluierung stehen folgende zwei Fragen im Fokus:

1. Kann eine Ungewissheit überhaupt reduziert werden?
2. Welchen Nutzen hat eine Reduktion?

Das Ergebnis geht dann in die Priorisierung der Arbeiten ein, was der Reduktion der Ungewissheiten dient.

Während der rvSU, welche entsprechend den gesetzlichen Bestimmungen im Wesentlichen auf Basis bereits vorhandener Daten und Informationen durchgeführt werden, findet eine Reduktion von Ungewissheiten bzw. deren Auswirkungen schon während der Erfassung statt – beispielsweise durch die Entwicklung entsprechender Methoden zum Umgang mit einer heterogenen Datenlage, welche in Kapitel 5.1 beschrieben werden. Im weiteren Verlauf des Verfahrens wird die Reduktion von Ungewissheiten mit einem zunehmenden materiellen und zeitlichen Aufwand verbunden sein (insbesondere im Fall der über- und untertägigen Erkundungen ab Phase II des Standortauswahl-

verfahrens, siehe auch Kapitel 11). Um die hierfür zur Verfügung stehenden Mittel optimal einzusetzen und um die Arbeiten im gesetzlich vorgesehenen Zeitraum abzuschließen, müssen die Maßnahmen entsprechend ihrer Wirksamkeit sehr sorgfältig geplant werden.

Hierfür stehen bereits verschiedene wissenschaftliche Verfahren aus dem Bereich der Ungewissheitsanalyse zur Verfügung, die auch für die Computersimulation von Endlagern eingesetzt werden können.

Aufgrund der großen Bedeutung von Ungewissheiten für die Standortsuche finanziert die BGE derzeit wesentliche Projekte zur Fortentwicklung entsprechender Methoden durch externe Organisationen:

- Forschungscluster URS („Ungewissheiten und Robustheit mit Blick auf die Sicherheit eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle“) mit den Forschungsverbünden:
    - Risk-based Assessment of Salt Domes as Disposal Sites for Nuclear Waste
    - Ungewissheiten in thermisch-hydraulisch-mechanisch (THM) gekoppelten Integritätsberechnungen
    - Endlagersicherheit: Ungewissheiten und regulatorische Aspekte
    - Reduzierung von Szenarienungewissheiten durch Klimamodelle
    - Verbesserung der prädiktiven Güte endlagerrelevanter Simulationen durch optimale Datenakquise und Smart-Monitoring
    - Bausteine zur Quantifizierung von Ungewissheiten in Geologischen Modellen
- Entwicklung einer Softwareplattform zur Datenerfassung und Modellierung („OpenWorkFlow“) durch das Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ) Leipzig

Diese Projekte werden bereits durchgeführt oder in naher Zukunft begonnen. Sie sind darüber hinaus zeitlich mit der Standortsuche gekoppelt, verwendbare Ergebnisse der Arbeiten werden innerhalb der kommenden 3 Jahre (bis 2024) vorliegen. Bis zu diesem Zeitpunkt wird auch die systematische Erfassung von Ungewissheiten weit fortgeschritten sein und einen ausreichend guten Überblick bieten, sodass final über das beste Vorgehen bzw. die beste Methodik im Verfahren entschieden werden kann.

10.5 Zusammenfassung und Ausblick

Ungewissheiten sind in Hinblick auf das Standortauswahlverfahren und die Sicherheit eines Endlagers von zentraler Bedeutung und müssen daher stets mitberücksichtigt werden. Die im Rahmen dieses Konzepts beschriebene Vorgehensweise zum Umgang mit Ungewissheiten bezieht sich explizit auf die rvSU in Phase I, Schritt 2 des Standortauswahlverfahrens (§ 14 StandAG). Sie wird sich im Laufe des Standortauswahlverfahrens absehbar weiterentwickeln und mit der Zeit gewonnene Erkenntnisse als Teil des lernenden Verfahrens entsprechend miteinbeziehen. Der beschriebene systematische Ansatz gewährleistet auch, dass Weiterentwicklungen konsistent auf dieser Basis aufgebaut werden können.

Gemäß § 11 EndlSiUntV sind im Rahmen der rvSU bestehende Ungewissheiten systematisch zu erfassen und nach verschiedenen Teilaspekten zu betrachten und zu bewerten. Ungewissheiten bezeichnen im Kontext des Standortauswahlverfahrens eingeschränkte Gewissheit und/oder Informationen zur Beschreibung des Systems und somit zur Einschätzung möglicher negativer Konsequenzen.

Das hier vorgestellte Konzept skizziert den Umgang mit Ungewissheiten im Rahmen der rvSU und legt dar, wie genau die Vorgaben der EndlSiUntV bei der Durchführung der rvSU konkret umgesetzt werden sollen. Dabei wurden auch vergleichbare internationale Herangehensweisen betrachtet und in die Überlegungen miteinbezogen. Das Konzept zum Umgang mit Ungewissheiten ist im Kontext des übergeordneten Konzepts zur Durchführung der rvSU (BGE 2022a) zu verstehen.

Zusammengefasst wurde, basierend auf den Bestimmungen von § 11 EndlSiUntV, zunächst eine Erfassungstabelle mit verschiedenen Bearbeitungsabschnitten entwickelt, die es ermöglicht, die während der rvSU bestehenden Ungewissheiten systematisch zu erfassen, einzuordnen und zu charakterisieren. Zentrale Bestandteile der Erfassungstabelle sind einerseits die während der rvSU nach der EndlSiUntV durchzuführenden, wesentlichen Arbeitsschritte, und andererseits vier verschiedene für das Standortauswahlverfahren eingeführte Kategorien von Ungewissheiten: Methodische Ungewissheiten, Modellungewissheiten, Datenungewissheiten und Szenarienungewissheiten.

Die während der rvSU bestehenden Ungewissheiten werden mithilfe arbeitsschrittspezifischer und auf der Erfassungstabelle basierender Abfragen an die jeweiligen Bearbeiterinnen und Bearbeiter der einzelnen Arbeitsschritte systematisch erfasst. Über die beschriebene Vorgehensweise ist es möglich, alle Anforderungen der EndlSiUntV in Hinblick auf die Betrachtung von Ungewissheiten in den rvSU zu erfüllen.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

11 Ableitung des Erkundungs-, Forschungs- und Entwicklungsbedarfs (§ 12 EndlSiUntV)

11.1 Einleitung

Die Anforderungen an die vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen sind in § 4 EndlSiUntV beschrieben und umfassen gemäß § 12 EndlSiUntV auch die Ableitung des Erkundungs-, Forschungs- und Entwicklungsbedarfs (für die unterschiedlichen Untersuchungsräume). Diese Ableitung findet im Zuge der rvSU in einem letzten Schritt nach der Bewertung von Ungewissheiten (§ 11 EndlSiUntV) statt (vgl. Abbildung 229). Die Ableitung des Erkundungs-, Forschungs- und Entwicklungsbedarfs beruht dabei auf der umfassenden Bewertung des Endlagersystems und der Ungewissheiten nach den §§ 10 und 11 EndlSiUntV. Gemäß § 12 Abs. 1 Nr. 1 EndlSiUntV sind dabei „*aufbauend auf den identifizierten geowissenschaftlichen Kenntnisdefiziten im Untersuchungsraum standortbezogene Erkundungsbedarfe zu identifizieren, darzustellen und hinsichtlich ihrer Relevanz für die Sicherheit des Endlagersystems zu priorisieren*“. Des Weiteren sind nach § 12 Abs. 1 Nr. 2 EndlSiUntV „*sonstige Forschungs- und Entwicklungsbedarfe zu identifizieren, darzustellen und hinsichtlich ihrer Relevanz für die Sicherheit des Endlagersystems zu priorisieren*“. Für den abgeleiteten Erkundungs-, Forschungs- und Entwicklungsbedarf ist die voraussichtliche Zeitdauer ihrer Bearbeitung anzugeben.

Im Folgenden werden die Grundlagen zur Ableitung des Erkundungs-, Forschungs- und Entwicklungsbedarfs sowie die Methode des geplanten Vorgehens inklusive der Priorisierung der Bedarfe beschrieben.

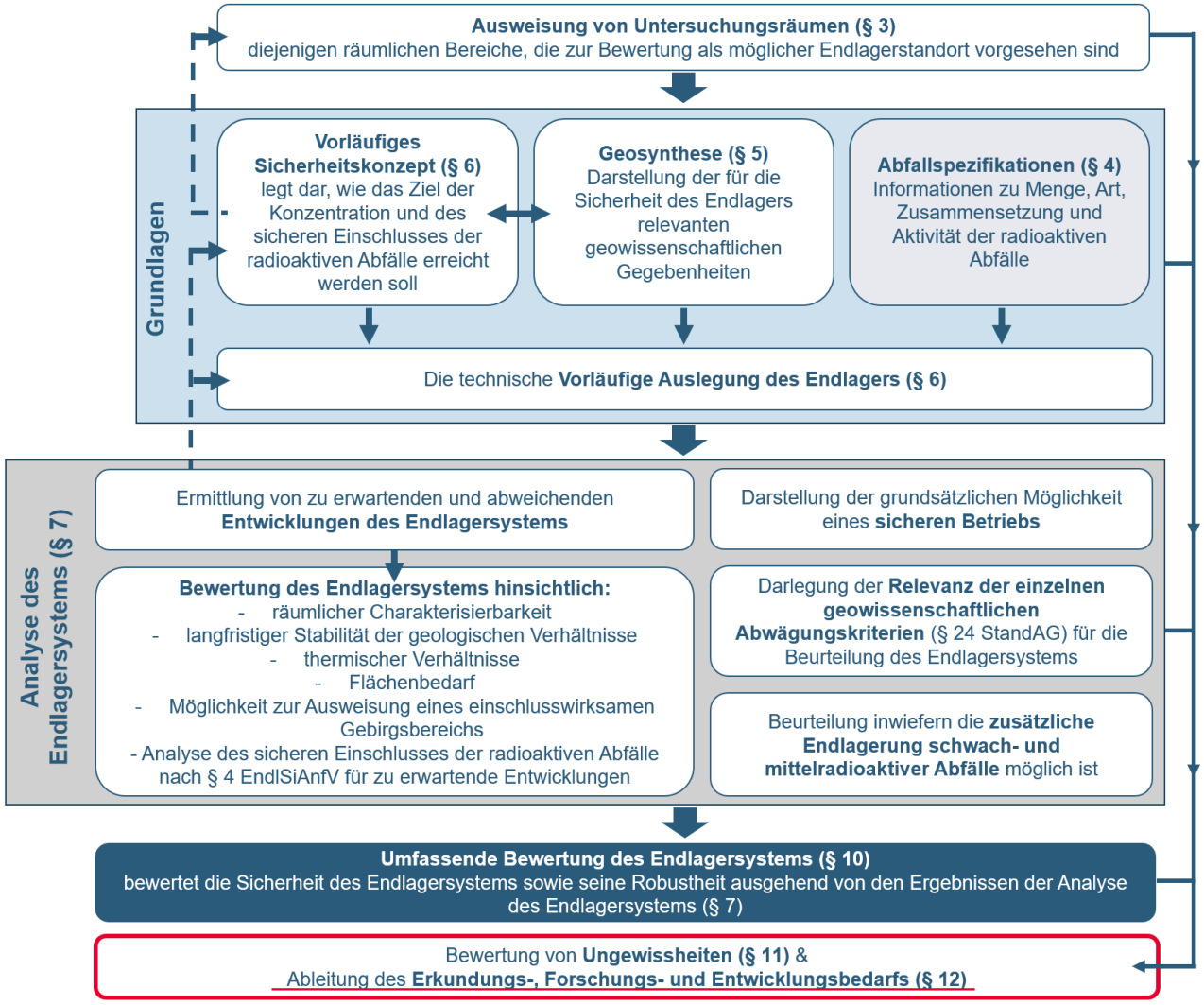


Abbildung 229: Schematische Darstellung der Arbeitsschritte der rvSU gemäß EndlSiUntV

11.2 Grundlagen

Die Grundlagen zur Ableitung des Erkundungs-, Forschungs- und Entwicklungsbedarfs sind in Abbildung 230 dargestellt. Im Rahmen der rvSU wird für jeden Untersuchungsraum eine umfassende Bewertung des Endlagersystems erarbeitet. Ungewissheiten, z. B. aufgrund geringer Datenverfügbarkeit oder hoher geologischer Komplexität des Untergrunds, werden im Verlauf der rvSU mitgeführt und im Rahmen der Bewertung von Ungewissheiten (§ 11 EndlSiUntV) zusammenfassend dargestellt (siehe Kapitel 10). Die anschließende Ableitung des Erkundungs-, Forschungs- und Entwicklungsbedarfs (§ 12 EndlSiUntV) samt Priorisierung hinsichtlich Relevanz für die Sicherheit des Endlagersystems ist für diejenigen Untersuchungsräume vorgesehen, die als Standortregionen in Frage kommen.

Der im Rahmen der rvSU abgeleitete Erkundungsbedarf ist neben den in den §§ 22 bis 24 StandAG formulierten Kriterien und Anforderungen sowie den für die Durchführung der wvSU benötigten Informationen die Grundlage für die Ausarbeitung standortbezogener Erkundungsprogramme.

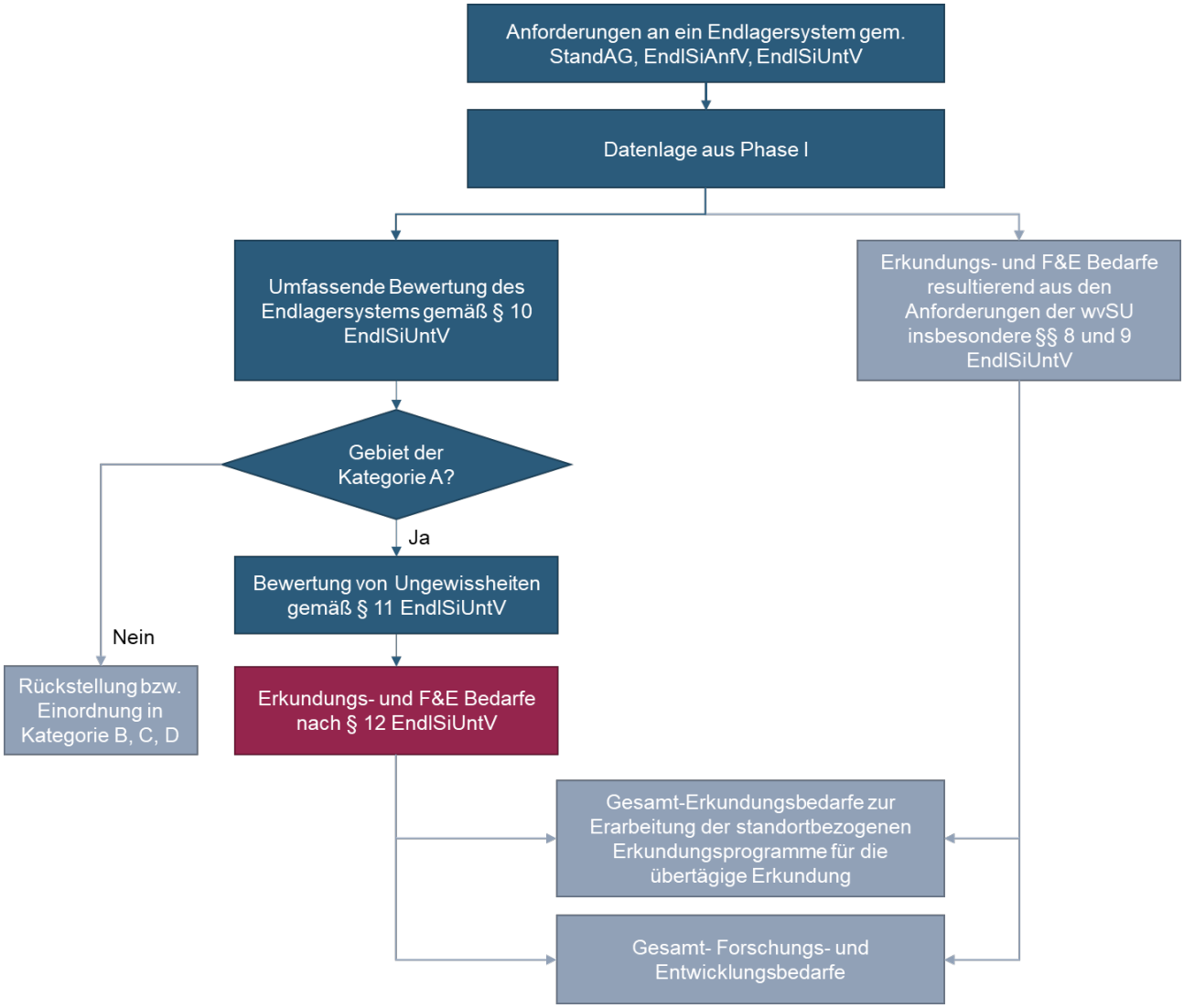


Abbildung 230: Schematische Darstellung der Ableitung des Erkundungs-, Forschungs- und Entwicklungsbedarfs

11.3 Ableitung des Erkundungs-, Forschungs- und Entwicklungsbedarfe

Die in der Geosynthese zusammengestellte und interpretierte Datenlage eines jedes Untersuchungsraumes bildet die Grundlage für die Bewertung des Endlagersystems im Rahmen der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß EndlSiUntV. Im aktuellen Schritt 2 der Phase I des Standortauswahlverfahrens werden die repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen durchgeführt. Auf die umfassende Bewertung des Endlagersystems nach § 10 EndlSiUntV folgt die Feststellung und Bewertung der Ungewissheiten nach § 11 EndlSiUntV. Die gegenwärtige Datenlage ist sehr heterogen und in den Untersuchungsräumen unterschiedlich (siehe Kapitel 5.1). Oft wird auf Analogieschlüsse und Referenzdaten zurückgegriffen, deren Gültigkeit für den konkreten Untersuchungsraum ggf. einer Überprüfung bedarf. Aus der Bewertung der räumlichen Lage und geologischen Beschaffenheit der jeweiligen Wirtsgesteinsformation in Abwesenheit einer hohen Dichte ortsspezifischer Daten, in der noch keine standortspezifischen Daten erhoben wurden, ergeben sich Ungewissheiten.

Diese basieren auf Kenntnisdefiziten, aus denen der Erkundungs-, Forschungs- und Entwicklungsbedarf nach § 12 EndlSiUntV für die Arbeiten der BGE im Rahmen von § 16 StandAG (Phase II) und § 18 StandAG (Phase III) des Standortauswahlverfahrens abgeleitet wird. Diese drei Begriffe werden wie folgt spezifiziert:

1. **Erkundungsbedarfe**

   Erkundungsbedarfe sind Bedarfe, die auf Kenntnisdefiziten beruhen, welche durch Erkundungsmaßnahmen verringert bzw. beseitigt werden können. Ursache von Erkundungsbedarfen ist hauptsächlich eine lokal geringe Datenverfügbarkeit.

   Wenn beispielsweise ein Parameter – z. B. der Durchlässigkeitsbeiwert in einem aus Tonstein bestehenden einschlusswirksamen Gebirgsbereich – durch lediglich eine Bohrung in einem Untersuchungsraum von 20 km × 20 km belegt ist, kann, je nach räumlicher Charakterisierbarkeit des Gebiets, nicht zwangsläufig darauf geschlossen werden, dass dies im gesamten Untersuchungsraum der Fall ist. Dies stellt eine Ungewissheit dar, die durch weitere Erkundungen deutlich verringert werden kann. Durch weitere Bohrungen einschließlich hydraulischer Tests und Laboruntersuchungen an Kernproben kann der Durchlässigkeitsbeiwert in weiteren Untergrundbereichen punktuell bewertet werden. Durch zusätzliche reflexionsseismische Erkundungen kann die interne Beschaffenheit einer Wirtsgesteinsformation flächenhaft ermittelt werden.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

2. Forschungsbedarfe

Forschungsbedarfe beruhen auf Kenntnisdefiziten, die durch Erkundungsmaßnahmen nicht unmittelbar verringert oder beseitigt werden können. Diese Kenntnisdefizite resultieren z. B. aus nicht messbaren zukünftigen geodynamischen Entwicklungen oder Wechselwirkungen zwischen Prozessen und Komponenten des Endlagersystems.

Als Beispiel eines solchen Kenntnisdefizits sei hier die zukünftige Entwicklung der Abtragungsraten (Erosion) in Deutschland für die nächsten eine Million Jahre aufgeführt. Diese Information ist für die Analyse des Endlagersystems im Rahmen der rvSU notwendig, kann jedoch mit Erkundungsmaßnahmen nicht ermittelt werden. Erosion führt zu einer Verringerung der Mächtigkeit des Deckgebirges und kann so die Bedingungen des Endlagersystems signifikant beeinflussen. Daher ist die ortsspezifische Prognose von Erosionsraten für die Bewertung von Regionen hinsichtlich des sicheren Einschlusses radioaktiver Abfälle im Betrachtungszeitraum von einer Million Jahre notwendig. Ein Beispiel für die Reduzierung dieser Ungewissheit ist das Forschungsprojekt „Quantifizierung und Prognose von Erosionsprozessen in Deutschland“, welches durch die BGE initiiert wurde (BGE 2021f). Auf Basis der flächendeckenden Ermittlung der Variabilität und Stärke der Abtragungsraten in Mittel- und Süddeutschland unter Berücksichtigung klimatischer, tektonischer und gesteinsspezifischer Faktoren wird ein Landschaftsentwicklungsmodell der letzten zehn Millionen Jahre erarbeitet. Dieses Modell wiederum dient als Grundlage, um unter Berücksichtigung verschiedener klimatischer Modelle Szenarien zur Ableitung der Erosionsraten ortsspezifisch für den Betrachtungszeitraum von einer Million Jahre zu erstellen.

3. Entwicklungsbedarfe

Entwicklungsbedarfe sind technischer Natur. Ein Entwicklungsbedarf ergibt sich, wenn z. B. technische Neuerungen absehbar zu besseren Ergebnissen in der Erkundung führen würden.

So können beispielsweise neue seismische Bildgebungsmethoden zu einer besseren Auflösung der Strukturen im Untergrund führen. Weitere technische Entwicklungen können Verfahren zur Ableitung physikalischer Gesteinseigenschaften durch kombinierte Inversion mehrerer geophysikalischer Messdatensätze sein. Auch messtechnische Neuerungen/Anpassungen mit dem Ziel der Erhöhung der Messauflösung zählen dazu.

11.4 Priorisierung der abgeleiteten Erkundungs-, Forschungs- und Entwicklungsbedarfe

Aus dem Ziel der Arbeiten im Rahmen von § 16 StandAG – der übertägigen Erkundung der festgelegten Standortregionen und der Erarbeitung eines Vorschlags für die untertägige Erkundung – ergeben sich zwei wesentliche Merkmale für eine Priorisierung der Erkundungs-, Forschungs- und Entwicklungsbedarfe:

- Bewertungskriterien hinsichtlich der Erfüllung der Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen (§§ 22 und 23 StandAG) und
- Bewertungskriterien, die im Rahmen eines Vergleichs von Standortregionen zu einer weiteren Differenzierung führen.

Gleichzeitig soll bei der Priorisierung der Erkenntnisgewinn der einzelnen Erkundungs-, Forschungs- und Entwicklungsmaßnahmen sowie deren Aufwand hinsichtlich des zeitlichen Rahmens und der Kosten berücksichtigt werden.

Die im Folgenden aufgeführte Priorisierung dient als Vorschlag und Diskussionsgrundlage für eine mögliche Richtlinie bei der Ausarbeitung von Erkundungsprogrammen. Sie ist unabhängig von der existierenden Datenlage in den einzelnen Untersuchungsräumen und somit als genereller methodischer Ansatz zu betrachten. Die Priorisierung erfolgt in drei Schritten.

1. **Priorisierung gemäß den Kriterien des StandAG**

   Sofern Erkundungs-, Forschungs- und Entwicklungsbedarfe hinsichtlich der Erfüllung der Ausschlusskriterien oder Mindestanforderungen (§§ 22 und 23 StandAG) vorliegen, erhalten diese die höchste Priorisierung. Dies ist dann der Fall, wenn es grundsätzliche Kenntnisdefizite bezüglich der Erfüllung bzw. Nichterfüllung eines oder mehrerer dieser Kriterien gibt. Die hohe Priorität liegt darin begründet, dass weitere Bedarfe entfallen, falls der Untersuchungsraum nach Durchführung dieser ersten Erkundungs- oder Forschungs- und Entwicklungsmaßnahmen aus dem Standortauswahlverfahren auf Grundlage der Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen ausscheiden würde. Voraussichtlich werden zum Zeitpunkt der Priorisierung der Bedarfe jedoch für den Großteil der Untersuchungsräume keine diesbezüglichen Bedarfe bestehen, da bzgl. der Erfüllung der Mindestanforderung sowie der Nichterfüllung der Ausschlusskriterien eine hohe Gewissheit besteht.

2. Priorisierung gemäß der Relevanz für die Sicherheit des Endlagersystems

In einem zweiten Schritt erfolgt die Priorisierung der Erkundungs-, Forschungs- und Entwicklungsbedarfe hinsichtlich ihrer Relevanz für die Sicherheit des Endlagersystems. Das sind Bedarfe, die sich insbesondere aus dem vorläufigen Sicherheitskonzept und der Analyse des Endlagersystems (§§ 6 und 7 EndlSiUntV) ergeben. Insbesondere ist den Bedarfen eine hohe Priorität zuzuordnen, die sich auf die Charakterisierung der wesentlichen Barriere beziehen. Dabei ist wichtig zu beurteilen, wie groß die Ungewissheiten sind und wie stark sich diese auf die Bewertung der Sicherheit des Endlagersystems insgesamt auswirken. Des Weiteren wird die Relevanz der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien (§ 24 StandAG) für die Beurteilung des Endlagersystems, die sich aus § 7 Abs. 4 EndlSiUntV ergibt, bei der Priorisierung berücksichtigt.

3. Priorisierung gemäß dem Aufwand der Erkundungs-, Forschungs- und Entwicklungsmaßnahmen

Wenn alle anderen fachlichen Prioritäten gesetzt sind, erfolgt eine Prüfung der Maßnahmen nach ihrem Kosten/Nutzen-Verhältnis mit dem Ziel, ein zeit- und kostenoptimiertes Erkundungsprogramm zu entwerfen bzw. Forschungs- und Entwicklungsmaßnahmen zu planen. Hierbei wird geprüft, welchen Erkenntnisgewinn die Maßnahmen bringen können und ob diese durch andere Maßnahmen mit geringerem Aufwand substituiert werden können.

Des Weiteren wird geprüft, inwieweit Erkundungsmaßnahmen Ergebnisse bezüglich mehrerer Kriterien liefern können und ob die serielle, zeitlich versetzte Anwendung von Maßnahmen vor dem Hintergrund der o. g. Priorisierungen zu Mehrkosten führt.

11.5 Erarbeitung standortbezogener Erkundungsprogramme

In Abgrenzung zu der Entwicklung standortbezogener Erkundungsprogramme bezieht sich die Ableitung der Erkundungs-, Forschungs- und Entwicklungsbedarfe gemäß § 12 EndlSiUntV ausschließlich auf die innerhalb der rvSU erarbeitete umfassende Gesamtbewertung des Endlagersystems sowie der Bewertung von Ungewissheiten.

Gemäß § 14 Abs. 2 StandAG sind für die Standortregionen „*standortbezogene Erkundungsprogramme für die übertägige Erkundung nach Maßgabe der Anforderungen und Kriterien nach den §§ 22 bis 24 und für die Durchführung der weiterentwickelten vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen nach § 16 Absatz 1*“ zu erarbeiten.

Im Vergleich zu den im Rahmen von § 12 EndlSiUntV abgeleiteten Erkundungsbedarfen ergeben sich allein aufgrund der höheren Anforderungen der wvSU verglichen zu den rvSU zusätzliche Bedarfe für die standortbezogenen Erkundungsprogramme.

So sieht die EndlSiUntV z. B. für die Analyse des Endlagersystems in § 7 Abs. 6 EndlSiUntV eine abweichende Vorgehensweise in den rvSU verglichen zu den wvSU vor. Daraus geht hervor, dass die Absätze 1 bis 3 und 5 des § 7 EndlSiUntV in den rvSU nicht zur Anwendung kommen. Für die Erarbeitung von standortbezogenen Erkundungsprogrammen ist das insofern relevant, als dass die betriebliche Sicherheitsanalyse und die Langzeitsicherheitsanalyse nach §§ 8 und 9 EndlSiUntV in

den rvSU nicht durchgeführt werden. Diese beiden Analysen bedürfen ebenso der Erhebung von Daten und Informationen, die bei der Erarbeitung von standortbezogenen Erkundungsprogrammen zu berücksichtigen sind.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

Anhang

Anhang 1 Untersuchung zum günstigen Teufenbereich für die Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen im Wirtsgestein Opalinuston

Die im StandAG formulierten Ausschlusskriterien (§ 22), Mindestanforderungen (§ 23) und geowissenschaftlichen Abwägungskriterien (§ 24) orientieren sich, wie von der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (im Folgenden Endlagerkommission (2017)) empfohlen, überwiegend an den vom Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte AkEnd (2002) vorgeschlagenen Auswahlkriterien und -anforderungen. Eine maßgebliche Ausnahme bildet dabei die vom AkEnd (2002) vorgeschlagene Mindestanforderung:

> *„Das Endlagerbergwerk darf nicht tiefer als 1 500 m liegen.“ (AkEnd 2002, S. 97)*

Der Gesetzgeber ist der Empfehlung der Endlagerkommission gefolgt, diese Mindestanforderung nicht zu übernehmen:

> *„Die Tiefe eines Endlagerbergwerks ergibt sich aus der örtlichen geologischen Situation, dem Einlagerungskonzept, der bergtechnischen Machbarkeit und gegebenenfalls zusätzlichen Anforderungen an die Arbeitssicherheit unter Tage (e.g. Umgebungstemperatur). Die Suche nach einem Endlagerstandort sollte für eine Einlagerungstiefe zwischen 500 und 1 000 m erfolgen. Je nach Einlagerungskonzept (zum Beispiel vertikale Bohrlochlagerung) können auch größere Tiefen erreicht oder notwendig werden. Die an einem bestimmten Standort erforderliche Einlagerungstiefe kann also von Standort zu Standort sehr unterschiedlich sein. Unter diesen Randbedingungen ist die Kommission, abweichend vom Vorschlag des AkEnd, der Auffassung, dass es nicht sinnvoll ist, für die maximale Tiefe des Einlagerungsbereichs eine Mindestanforderung zu definieren.“ (K-Drs. 268, S. 303)*

Nach (BGE 2020j) ist jedoch eine Begrenzung des Suchraums für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle in der Teufe, bis zu der notwendige geologische Daten ausgewertet werden, aus Gründen der verfahrenstechnischen Machbarkeit bereits in der ersten Phase des Standortauswahlverfahrens erforderlich. Unter Abwägung berg- und strahlenschutztechnischer Aspekte sowie von Aspekten der Langzeitsicherheit, hat die BGE (2020j) die maximale Suchteufe im Standortauswahlverfahren auf maximal 1 500 m begrenzt.

Dabei hat sich die BGE von der Überprüfung der vom AkEnd vorgeschlagenen Auswahlkriterien und -anforderungen durch die ESK (2015) (Entsorgungskommission) leiten lassen, die im Auftrag der Endlagerkommission durchgeführt wurde. Ziel der Überprüfung war, festzustellen, inwieweit die Auswahlkriterien und -anforderungen nach dem Stand von Wissenschaft und Technik weiterhin für die Auswahl des Endlagerstandortes mit bestmöglicher Sicherheit geeignet sind. Zur Maximalen Teufe heißt es in der ESK (2015):

> *„Die Begrenzung der maximalen Teufe für ein Endlagerbergwerk auf 1 500 m ermöglicht unter Berücksichtigung der steigenden Gebirgstemperaturen und des zunehmenden Gebirgsdrucks die sichere Errichtung und den sicheren Betrieb eines Endlagers auf der Basis fundierter technischer Kenntnisse und Erfahrungen.“ (ESK 2015, S. 22)*

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

Die Wahl dieser Teufe ist darüber hinaus mit § 21 Abs. 2 StandAG, der Sicherungsvorschriften für Gesteinsformationen bis zu einer Teufe von 1 500 m vorsieht, konsistent.

In Ergänzung dieser Festlegung ist es Ziel der hier beschriebenen Untersuchungen, den Teufenbereich der Einlagerung hochradioaktiver Abfälle einschließlich ausgedienter Brennelemente (im Folgenden als HAA für „High Active Waste bezeichnet) im Wirtsgestein Opalinuston zu ermitteln, innerhalb dessen aus bergbautechnischer Sicht von günstigen Bedingungen gesprochen werden kann.

Zur Erreichung dieses Ziels bietet sich zunächst an, zu überprüfen, inwieweit die gleichen oder ähnlichen Fragestellungen bereits in der Vergangenheit im Allgemeinen (s. Anhang 1.1) oder im Detail in Deutschland (s. Anhang 1.2) und im Ausland (s. Anhang 1.3) für Tongestein bereits betrachtet wurden. Darüber hinaus erfolgt eine Einschätzung der Teufenabhängigkeit der Anforderungen des StandAG nach Herstellbarkeit, Durchführbarkeit der Endlagerung, Rückholbarkeit und Bergbarkeit sowie einer Ausgewogenheit von Maßnahmen zur Betrieb- und Langzeitsicherheit nach EndlSiAnfV in Anhang 1.4.

Anhang 1.1 Vorüberlegungen zur Teufe des Einlagerungsbereichs im Tongestein

Als erster Schritt der Bearbeitung der Fragestellung bietet sich an, einen Blick in die Literatur sowie in internationale Endlagerprogramme zu werfen, die die Endlagerung im Tongestein verfolgen und bereits Festlegungen zur Teufe des Einlagerungsbereichs getroffen haben bzw. dazu Untersuchungen angestellt haben.

Die IAEA (IAEA 2003) hält die Erstellung eines Endlagers in konsolidiertem Festgestein in Teufen bis 1 000 m für technisch unproblematisch. Jedoch seien in weniger festen oder weniger konsolidierten Gesteinen (insbesondere werden Tongesteine genannt) Schwierigkeiten zu erwarten, die eine stärkere Begrenzung der Teufe nötig machen könnten.

HAA-Endlagerprogramme im europäischen Ausland, die eine Endlagerung im Tongestein anstreben, gehen von verschiedenen Teufen der Einlagerungsbereiche aus. In Frankreich wird die Endlagerung im Tongestein des Callovo-Oxfordien an der Grenze der Departements Meuse und Haute-Marne verfolgt. In 500 m Teufe wurde zur Untersuchung der Formation ein Untertagelabor eingerichtet (Andra 2005c). Die Planungen für das Endlager beruhen auf einer Teufe von 525 m (Andra 2016b). In Belgien hat sich der Vorhabenträger ONDRAF/NIRAS noch nicht auf eine konkrete Teufe für ein Endlager festgelegt. Jedoch wird mit drei Referenzteufen gearbeitet: 200 m, 400 m und 600 m. Das Untersuchungsgestein ist entweder hochplastischer „Boom Clay“ oder teilverfestigter „Ypresian Clay“ (Euridice 2018). Im Rahmen des Standortauswahlverfahrens in der Schweiz wurde durch die Nagra die Tiefenlage im Hinblick auf die bautechnische Machbarkeit untersucht. In Nagra (2016a) findet sich eine zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse auf Basis von Nachforderungen des Eidgenössischen Nuklearsicherheitsinspektorats ENSI. Nagra bestätigt darin die maximal zulässige Teufe für ein HAA Endlager von 650 m bis 918 m für die in Frage kommenden Standortregionen in der Schweiz. Als Optimierungsanforderung gilt, nach Möglichkeit eine Teufe kleiner als 700 m auszuwählen. Geringere Teufen werden deshalb angestrebt, da das Gebirgsverhalten mit zunehmender Teufe deutlich ungünstiger wird. Je nach Standortregion variiert die Min-

destteufe zwischen 420 m und 600 m. Das untersuchte Gestein ist Opalinuston, ein sprödes, überkonsolidiertes Tongestein, was bedeutet, „*dass die Dichte eines Materials höher und seine Porosität geringer ist, als sie aufgrund der momentanen Belastung sein sollte*“ (Nagra 2002d). Da die Ermittlung einer günstigen Teufenlage für den Einlagerungsbereich eines Endlagers im Opalinuston Ziel dieser Untersuchung ist, werden Vorgehen und Ergebnisse der Nagra in Kapitel Anhang 1.3 im Detail vorgestellt.

Weltweit wird kein Endlager für hochradioaktive Abfälle in Teufen größer als 1 000 m geplant oder betrieben. In nationalen Forschungs- und Entwicklungsvorhaben (F&E-Vorhaben) wurden bislang allenfalls Endlagerkonzepte in Teufen kleiner als 1 000 m betrachtet. Die entsprechenden Bergwerkskonzepte und die Wahl einer für Deutschland generischen, jedoch repräsentativen Geologie erfolgte in den F&E Vorhaben stets so, dass von insgesamt günstigen Bedingungen für Bau, Betrieb und Langzeitsicherheit des Endlagers auszugehen war. Auch in der nationalen Literatur zur Endlagerung im Tongestein finden sich dementsprechend Aussagen zur Teufe. Laut der „Tonstudie“ der BGR

> „[…] *besteht somit in der internationalen Fachwelt Einigkeit, dass bei Tongesteinsformationen unterhalb von 1 000 m Tiefe mit sehr schwierigen gebirgsmechanischen Verhältnissen zu rechnen ist.“ (Hoth et al. 2007)*

Im Synthesebericht des F&E-Vorhabens AnSichT (Sicherheits- und Nachweismethodik für ein Endlager im Tongestein in Deutschland) wird empfohlen, das Endlagerbergwerk in einer Teufe kleiner als 1 000 m zu errichten (Jobmann et al. 2017b). Tiefer müsse in Abhängigkeit vom Standort mit gebirgsmechanischen und geothermischen Verhältnissen gerechnet werden, die besondere technische Maßnahmen wie z. B. einen verstärkten Streckenausbau oder Wetterkühlung erfordern. In Bollingerfehr et al. (2011) wurden für eine Standortsuche verschiedene Teufen als untere Begrenzung des Suchraums empfohlen. Für Tongestein wurden 1 000 m genannt. Den AkEnd begleitende Studien haben sich ebenfalls mit der Fragestellung der Teufe im Tongestein befasst (Lux et al. 2002; Lux & Eberth 2002). Dort wird hergeleitet, dass im Tongestein Teufen kleiner als 900 m günstige gebirgsmechanische Eigenschaften erwarten lassen. Aufgrund ihres Tiefgangs werden diese Studien in Kapitel Anhang 1.2 genauer beschrieben und analysiert.

Die genannten Teufen lassen die klare Tendenz erkennen, dass in der nationalen und internationalen Fachwelt Einigung herrscht, dass die Teufe eines Einlagerungsbereichs im Tongestein kleiner als 1 000 m sein sollte. Aufbauend auf der eingangs zitierten Empfehlung der ESK ließe sich folgende Zusammenfassung bilden: Die Begrenzung der maximalen Teufe für ein Endlagerbergwerk auf 1 000 m sei unter Berücksichtigung der steigenden Gebirgstemperaturen und des zunehmenden Gebirgsdrucks für die sichere Errichtung und den sicheren Betrieb eines Endlagers im Tongestein auf der Basis fundierter technischer Kenntnisse und Erfahrungen eine notwendige Bedingung.

Die zitierten Aussagen und die formulierte Empfehlung stellen jedoch alleine kein belastbares Kriterium für die Beschreibung einer günstigen Teufe des Einlagerungsbereichs im Opalinuston innerhalb der Grenzen der Bundesrepublik Deutschland dar. Dies liegt insbesondere daran, dass die angeführten Teufen postuliert oder festgelegt wurden, ohne eine nachvollziehbare Analyse mitzuliefern.

Die beiden Ausnahmen sind die Studien der Nagra (2016a) in der Schweiz und diejenigen im Zusammenhang mit dem AkEnd in Deutschland (ESK 2015). Hier wurde der Zusammenhang von gebirgsmechanischen Eigenschaften von Tongestein und Endlagerteufe intensiv untersucht. In diesem Anhang wird untersucht, ob diese und weitere Untersuchungen für die Bestimmung einer günstigen Teufe eines HAA-Endlagers im Opalinuston in Deutschland nutzbar sind.

Anhang 1.2 Arbeiten zu Tongestein im Rahmen des AkEnd

Durch den AkEnd wurde ein Gutachten zur Entwicklung und Fundierung der Anforderung „Günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen“ in Auftrag gegeben. Die Bearbeitung dieser Aufgabe lag bei der Professur für Deponietechnik und Geomechanik der Technischen Universität Clausthal. Dort wurden zwei Berichte erstellt, die u. a. einen Zusammenhang zwischen gebirgsmechanischen Eigenschaften und Teufe im Tongestein untersuchen:

- Teil A: Grundlegende rechnerische Untersuchungen (Lux et al. 2002)
- Teil B: Weiterführende laborative und rechnerische Untersuchungen (Lux & Eberth 2002)

Die in diesen Berichten durchgeführten gebirgsmechanischen Betrachtungen münden in Lux et al. (2002) in zwei Schaubildern, die einen Zusammenhang herstellen zwischen der Teufe der Einlagerungssohle eines Endlagers und der Gebirgsdruckfestigkeit des Wirtsgesteins in Bezug auf die Frage, ob günstige, bedingt günstige oder weniger günstige gebirgsmechanische Verhältnisse zu erwarten sind. Diese Diagramme werden auch in BGE (2020g) referenziert und zur Einschätzung von Anlage 5 (zu § 24 Abs. 4) StandAG: „Kriterium zur Bewertung der günstigen gebirgsmechanischen Eigenschaften“ herangezogen. Für Tongestein sei das Diagramm für gering- bis nicht kriechfähige Gesteine zu verwenden (Abbildung A. 1).

Nach BGE (2020g) und Anlage 5 (zu § 24 Abs. 4) StandAG sind zwei Indikatoren für günstige gebirgsmechanische Eigenschaften heranzuziehen:

- Das Gebirge ist das alleinige Tragelement. Die Beanspruchung aus Auffahrung und Betrieb können durch das Gebirge ohne planmäßigen tragenden Ausbau bei verträglichen Deformationen aufgenommen werden.
- Außerhalb einer konturnahen Auflockerungszone sind keine mechanisch bedingten Sekundärpermeabilitäten zu erwarten.

Dementsprechend ist der als günstig ausgewiesene Bereich in Abbildung A. 1 zu interpretieren. Die Grafik aus Abbildung A. 1 erlaubt die Eintragung der Gebirgsdruckfestigkeiten von Tongesteinen und eine erste Einschätzung, welche gebirgsmechanische Situation in der entsprechenden Teufe zu erwarten ist. In Czaikowski et al. (2005) wurde die Darstellung aus Abbildung A. 1 zu diesem Zweck verwendet. Weitere Druckfestigkeiten von Tongesteinen, u.a. von Opalinuston, wurden in (Nagra 2002d) veröffentlicht (Abbildung A. 2). In Abbildung A. 3 werden diese Informationen miteinander kombiniert. Insbesondere wird der Opalinuston Benken (blau) in seiner vollen Bandbreite abgebildet und der Opalinuston aus Mont Terri (blau) wird ergänzt.

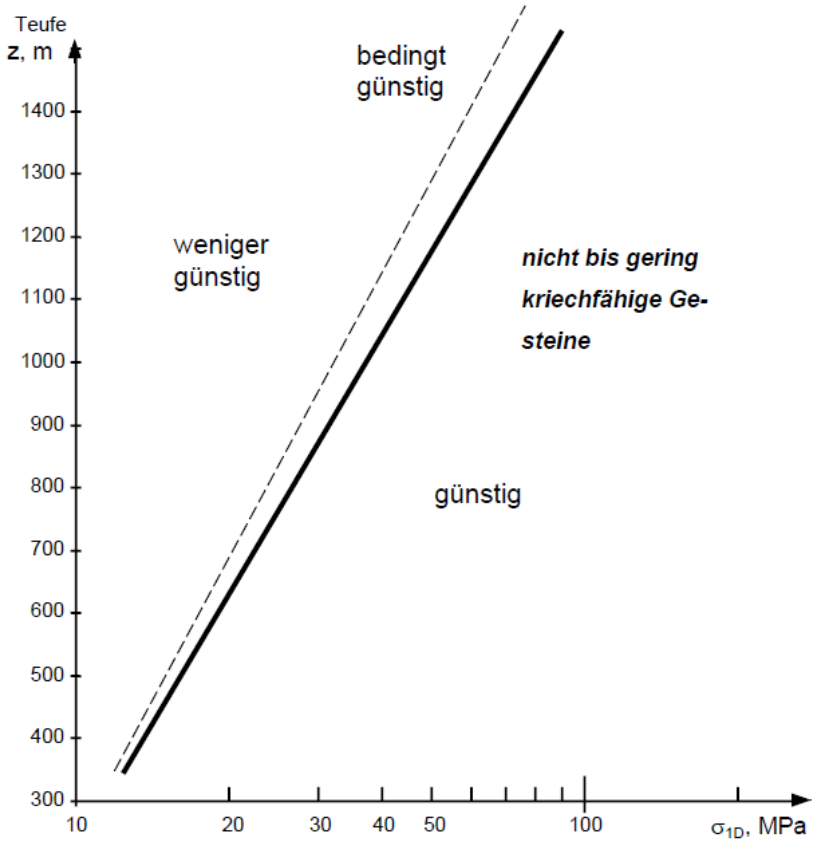


Abbildung A. 1: Zuweisung günstiger, bedingt günstiger und weniger günstiger gebirgsmechanischer Verhältnisse in Abhängigkeit von Teufe und Gebirgsdruckfestigkeit für nicht bis gering kriechfähige Gesteine; nach Lux & Eberth (2002)

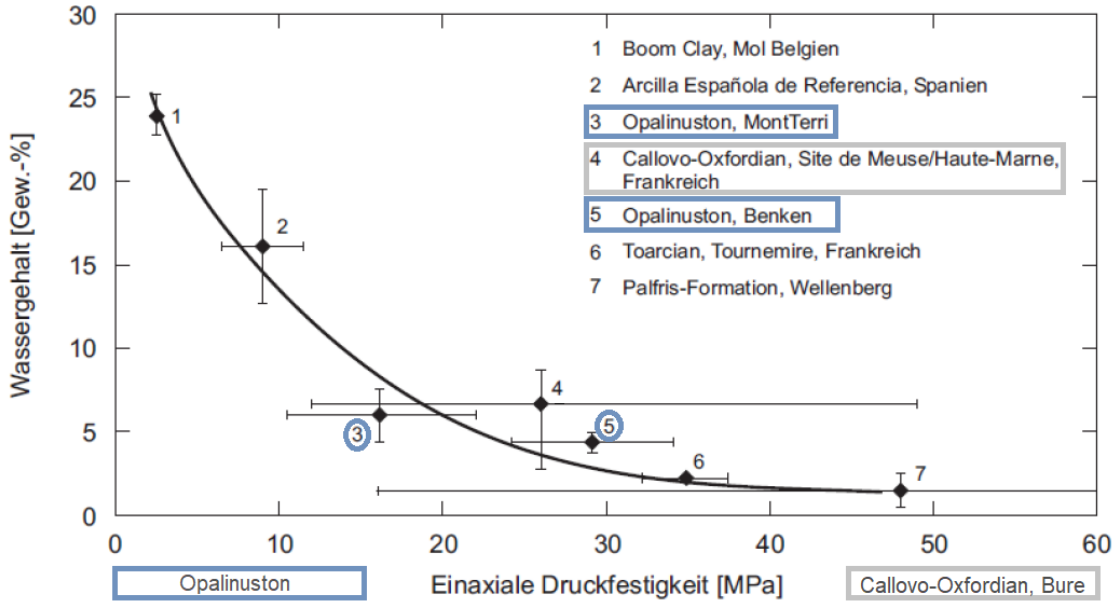


Abbildung A. 2: Druckfestigkeiten von Tongesteinen; verändert nach Nagra (2002d)

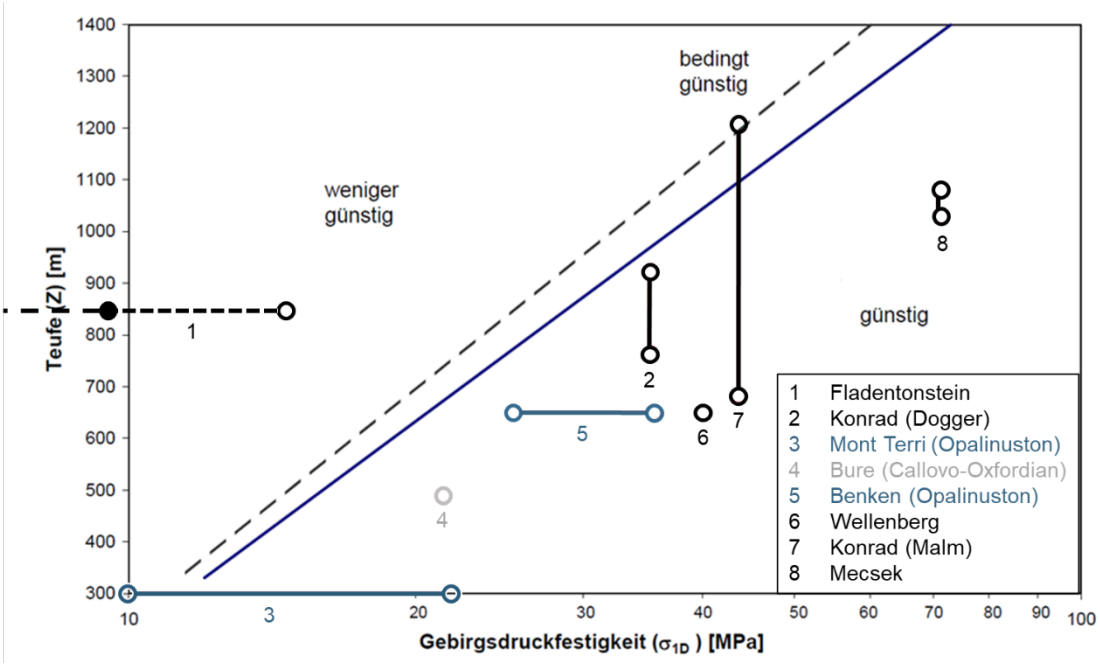


Abbildung A. 3: Einschätzung verschiedener Tongesteine; basierend auf Lux & Eberth (2002), Czaikowski et al. (2005) und Daten aus Nagra (2002d) sowie BGE-Daten (Fladentonstein, Schachtanlage Konrad)

In Lux et al. (2002) werden außerdem konkrete Teufen für Tongestein abgeleitet, bis zu denen mit günstigen gebirgsmechanischen Voraussetzungen zu rechnen ist. Für den Lastfall „Ausbruch bei intaktem Gestein“ werden günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen bis maximal zu einer Teufe von 1.200 m erwartet. In Kombination mit dem Lastfall „Temperatur“ (Temperatureinwirkung durch hochradioaktive Abfälle) sinkt dieser Wert auf 900 m. Diese Werte gelten bei Wahl einer akzeptierten Dilatanzzone von weniger als 3 m um den Hohlraum herum. Wählt man hier nur 2 m, liegen die Teufengrenzen bei 900 m beziehungsweise 600 m. Für leicht geschädigtes Tongestein wird eine Teufe von 500 m ermittelt, bis zu der günstige gebirgsmechanische Eigenschaften zu erwarten sind.

Die Vorhersagen dieser Grafiken in Bezug auf die gebirgsmechanische Qualität von Tongestein erweisen sich in wesentlichen Fällen als nichtzutreffend. Der Tonstein des Callovo-Oxfordien am Standort Bure (grau) weist z. B. entgegen der Einordnung in Abbildung A. 3 keine günstigen gebirgsmechanischen Eigenschaften auf. Hier werden durch die Nagra im Untertagelabor verschiedene tragende Ausbausysteme erprobt. Der Begriff Ausbausystem bezeichnet die (Kombination von) bautechnischen Maßnahmen zur Stabilisierung und Offenhaltung der erforderlichen Hohlräume im Gestein unter Tage. Für das Endlager der ANDRA Cigéo am Standort Bure (grau) werden massive tragende und mehrschalige Ausbausysteme aus Betonformsteinen und Ortbeton mit Nachgiebigkeitselementen vorgesehen (Armand et al. 2021). Es stellt sich die Frage, ob die ermittelten Trennlinien aus Lux & Eberth (2002) grundsätzlich problematisch sind und inwieweit korrekte Daten für die Gebirgsfestigkeit ermittelt werden konnten. Die Übertragung von Laborproben aus Prüfungen der ein- oder triaxialen Gesteinsdruckfestigkeit, womöglich mit teilentwässerten Proben, ist proble-

matisch, da eine Vielzahl von weiteren Gebirgseigenschaften *in situ* die gebirgsmechanischen Eigenschaften beeinflussen können. Die oben aufgeführten Grafiken von Lux & Eberth (2002) zur Vorhersage der gebirgsmechanischen Eigenschaften sind trotz der Leichtigkeit ihrer Anwendung deshalb nicht zuverlässig belastbar. Die Problematik korrekter Annahmen von Gebirgsfestigkeiten wird in Anhang 1.3 wieder aufgegriffen, da die Nagra mit ähnlichen Schwierigkeiten zu kämpfen hatte.

Anhang 1.3 Endlagerteufe im Opalinuston in der Schweiz

Anhang 1.3.1 Etappe 1 der Standortsuche

Im „Sachplan geologische Tiefenlager“ (BFE 2008) in der Schweiz wird das Verfahren für die Standortsuche für Endlager für schwach- und mittelradioaktive sowie für hochradioaktive Abfälle festgelegt. Bereits 2008 wurden in Nagra (2008b) Vorschläge für Standortgebiete unterbreitet. Ein Indikator bei der Standortbewertung war die „Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf die bautechnische Machbarkeit“. Das Eidgenössische Sicherheitsinspektorat ENSI hat daraufhin die ETH Zürich mit einem Fachgutachten zur Beurteilung und Anwendung der bautechnischen Auswahlkriterien beauftragt. Das Fachgutachten wurde in einem Bericht dokumentiert (Amann & Löw 2009).

Grundsätzlich fordert die Nagra seit der ersten Etappe der Standortsuche, dass die Einlagerungssohle eines HAA Endlagers in einer Teufe kleiner als 900 m liegen muss. Für die im Querschnitt runden Einlagerungsstrecken mit 2,5 m Durchmesser wurde zunächst eine Gebirgssicherung mit Ankern und Spritzbeton als ausreichend eingeschätzt. Für die deutlich größer geplanten Einlagerungsstrecken für schwach- und mittelradioaktive Abfälle (58 m² bis 215 m² Querschnittsfläche) werden maximal 800 m Teufe gefordert. Als sehr günstig wird die bautechnische Machbarkeit im Opalinuston jedoch nur in einer Teufe kleiner als 300 m bis 400 m bewertet. Weiterhin seien die Verhältnisse bis ca. 600 m bis 700 m Teufe günstig. „Sehr günstig“ bedeutet in diesem Fall, dass sich das Gebirge überwiegend elastisch verhält. „Günstig“ setzt ein standfestes bzw. nur leicht nachbrüchiges Gestein voraus. Die Bewertungsgruppen entsprechen nicht unmittelbar denen in Lux & Eberth (2002).

Nach Amann & Löw (2009) ist die gebirgsmechanische Bewertung des Opalinustons durch die Nagra bis zum Zeitpunkt des Fachgutachtens zu optimistisch. Die Gebirgsanisotropie und Heterogenität des Gebirges seien nicht ausreichend berücksichtigt worden. Gebirgsmechanische Kennwerte seien durch Laborproben abgeleitet worden, die intakte Gebirgseigenschaften repräsentierten. Des Weiteren fehlten zur Zeit des Fachgutachtens gebirgsmechanische Nachweise, die eine Klüftung des Gebirges berücksichtigen. Auch lägen für Tiefenlagen jenseits der Mindestanforderung (Lagerstollen für schwach- und mittelaktive Abfälle) bzw. tiefer als 650 m nur konzeptionelle Modellrechnungen vor. Im Zuge der Erstellung des Gutachtens und der einhergehenden Diskussion mit der Nagra hat diese einen weiteren Bericht zu alternativen Ausbausystemen erstellt (Nagra 2009), die für die Standortsuche der Schweiz erstmalig auch vollflächige, tragende Ausbausysteme mit

Linern aus Tübingen oder Stahl/Spritzbeton vorsehen. Das Fachgutachten von Amann & Löw (2009) kommt zu dem Schluss, dass

> *„[…] für HAA-Lagerstollen […] nur für die neu vorgelegten Ausbaukonzepte [nach NAGRA (2009)] die Anforderungen als zweckmäßig erachtet [werden].“*

Und weiter:

> *„Die getroffenen Schlussfolgerungen über die Wirkung der Anker bezüglich Stabilität, Verformung und Ausdehnung der Bruchzone werden als nichtzutreffend erachtet und von den Berichterstattern nicht als Nachweis der bautechnischen Machbarkeit mit eingeschränkten Sicherungsmitteln (Anker und Netze) gewertet.“* (Amann & Löw 2009)

Erfahrungen im Tunnelbau zeigten die grundsätzliche technische Machbarkeit der Auffahrung im Opalinuston bis in Teufen von 700 – 800 m. Jedoch sei in diesen Teufen mit einem vollflächigen, tragenden Ausbau zu rechnen. Der Grenchenbergtunnel wurde nach Amann & Löw (2009) z. B. mit einer Betonschale von 60 cm Stärke aufgefahren. Ein weiterer wichtiger Hinweis des Fachgutachtens ist in einer Fußnote enthalten:

> *„Es ist anzumerken, dass die In-Situ-Festigkeit bei spröden Materialen wie dem Opalinuston gegenüber der Laborfestigkeit schätzungsweise um 20-40 % geringer sein dürfte. Diesbezüglich liegen keine quantitativen Angaben vor.“* (Amann & Löw 2009)

Anhang 1.3.2 Etappe 2 bis 3 der Standortsuche

Anhang 1.3.2.1 Allgemeines Vorgehen

In der Etappe 2 der Standortsuche hat sich die Nagra weiter mit der Tiefenlage des Endlagers im Hinblick auf die bautechnische Machbarkeit beschäftigt. Im Vergleich zur Etappe 1 (s. Anhang 1.3.1) hat sich der Eindruck gefestigt, dass beim Endlagerbau im Opalinuston bautechnische Herausforderungen zu erwarten sind, die sich nicht durch reine kontursichernde Maßnahmen beherrschen lassen werden. In Nagra (2014d) wird die Notwendigkeit von Ausbaumaterial im Zusammenhang mit der Langzeitsicherheit diskutiert. Unter diesem Gesichtspunkt werden folgende Anforderungen formuliert:

- Der Einsatz von Spritzbeton und weiteren zementhaltigen Materialien soll in den Lagerstollen und Versiegelungsstrecken möglichst begrenzt werden. Dies soll die kurzfristige Bentonitumwandlung und die Ausbildung einer pH-Fahne begrenzen. Daraus wird eine maximale Spritzbetonstärke von 30 cm abgeleitet. Darüber hinaus soll die Menge an verwendetem Stahl klein gehalten werden.
- Im Bereich der Versiegelung sollen Stahlbögen eingesetzt werden können, um einen direkten Kontakt zwischen Versiegelungsmaterial (Bentonit) und Wirtsgestein zu ermöglichen.
- Außerdem ist die Störung des Gebirges aus hydraulischen Gründen zu begrenzen.

Auf der Basis ihrer gebirgsmechanischen Untersuchungen und der Einwendungen des ENSI und seiner Experten formulierte die Nagra zusätzlich zu den genannten Mindestanforderungen für die

maximale Tiefenlage Optimierungsziele an die Einlagerungsteufe, um die genannten Anforderungen im Opalinuston einhalten zu können. Es wird angestrebt, die Tiefenlage der Lagerebene auf max. 600 m u. GOK (SMA) bzw. auf 700 m u. GOK (HAA) zu beschränken. Diese Beschränkung decke sich nach Nagra (2014a) mit dem Vorgehen anderer Länder in vergleichbarem Wirtsgestein. Z. B. habe Frankreich die maximale Tiefe der Lagerebene auf 600 m u. GOK beschränkt. Das Kriterium der Standortsuche „Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen“ kann bei dieser Beschränkung der Tiefenlage für Standorte im Opalinuston grundsätzlich als günstig im Sinne der Nagra bewertet werden, sofern keine nachteilige tektonischen Überprägung am Standort stattgefunden hat.

In Nagra (2016a) wurden diese Anforderungen ein weiteres Mal überprüft und auf die in Frage kommenden Standorte der Standortsuche angewendet. Zunächst hält die Nagra fest, dass die maximalen Tiefenlagen, wie sie in Etappe 1 der Standortsuche festgelegt wurden, durch das ENSI nicht in Frage gestellt werden. Auch die Optimierungsziele bei der Teufenlage werden durch die Nagra weiterverfolgt. Dabei wird einerseits für das Standortgebiet Zürich Nordost eine Lockerung der Anforderung an die Tiefenlage diskutiert. Diese wird dadurch begründet, dass die Tiefe von Erosionsrinnen so groß ausfallen könnte, dass die minimale Tiefenlage vergrößert werden muss. Andererseits wird das Standortgebiet Nördlicher Lägern nachteilig bewertet, da es nicht möglich ist, gleichzeitig die Optimierungsanforderungen bezüglich des Platzangebots als auch bezüglich der Tiefenlage einzuhalten. Ein ausreichendes Platzangebot findet sich erst in einer Teufe, die keine oder kaum eine Optimierung im Vergleich zur maximal zulässigen Teufe darstellt. Diese Eigenschaft des Standortgebiets wird im Vergleich mit den anderen Standortgebieten als erheblicher Nachteil bewertet. Neben den Schwierigkeiten der bautechnischen Machbarkeit werden im Zusammenhang mit der größeren Teufe auch die höhere Gebirgstemperatur und fehlende Flexibilität bei der Wahl der genauen Teufe der Lagerebene auf Basis weiterer Erkenntnisgewinne durch Erkundung als wesentliche Argumente gegen das Standortgebiet angeführt.

Die Inkaufnahme einer größeren Teufe ist laut Nagra also nur zulässig, wenn sich dadurch ein nachweisbarer Vorteil in Bezug auf die Langzeitsicherheit ergibt, der in Abwägung mit den erheblichen Erschwernissen beim Bau, Betrieb und Verschluss sowie qualitativen Einbußen bei den Barrieren als überwiegend beurteilt wird. Der Schutz des Endlagers vor einer standortbedingten besonderen Ausprägung von glazialen Rinnen ist hier das einzige Argument, das die Nagra in diesem Zusammenhang anführt. Für den SMA-Lagerteil mit einem Nachweiszeitraum von lediglich 100.000 Jahren fällt dieses Argument weg.

Die Nagra empfiehlt eine maximale Tiefenlage im Opalinuston von 800 m u. GOK (SMA) und 900 m u. GOK (HAA) und zur Optimierung eine Tiefenlage von max. 600 m u. GOK (SMA) bzw. von 700 m u. GOK (HAA).

Anhang 1.3.2.2 Datenlage und Modelle

Die Einschätzungen aus Nagra (2016a), die im Wesentlichen diejenigen aus Nagra (2014d) stützen, basieren auf einer geologischen Datenbasis, die sowohl klein als auch mit Unsicherheiten behaftet ist. Um mit diesen Schwierigkeiten umzugehen, verwendet die Nagra Bandbreiten. Die Kritik des

ENSI und seinen Experten an der Datenbasis für die Untersuchungen der Etappe 1 formuliert die Nagra wie folgt:

„*Die Prüfexperten kommen zum Schluss, dass trotz des großen Untersuchungsumfangs die Datengrundlage an belastbaren Versuchen klein ist und die von der NAGRA abgeleiteten effektiven Gesteins-Festigkeiten sowie die undrainierten Scherfestigkeiten die tatsächlichen Festigkeiten großenteils überschätzen, da viele Laborversuche an teilgesättigten Proben durchgeführt worden sind.*“ Die Überschätzung ließe sich jedoch nicht quantifizieren.

Für die Untersuchungen, die in Nagra (2016a) zusammengefasst werden, hat die Nagra, diese Kritik berücksichtigend, ihre Datenbasis angepasst und weitere Labortests durchgeführt. Die Ergebnisse von entsprechenden Triaxialversuchen an Opalinuston sowie die Vorhersagen von Gebirgsmodellen anhand der verwendeten Parameterbandbreiten sind in Abbildung A. 4 dargestellt. In den Modellen wird ebenfalls eine tektonisch bedingte Gebirgsschwächung berücksichtigt, sowie die Wirkung von Porenwasserdrücken und deren Verteilung nach Auffahrung, in der Betriebsphase und nach Aufsättigung des verfüllten Grubengebäudes. Dabei wird ab der Betriebsphase von einem Porenwasserdruckgradienten ausgegangen, der vom unverritzten Gebirge aus in die Auflockerungszone der Strecken hineinwirkt (Sickerströmungsdruck). Dieser Gradient bleibt auch langfristig bestehen und nimmt mit der Tiefe zu. Aufgrund der starken Durchlässigkeitsunterschiede der Schichten im Hangenden und Liegenden des Opalinustons wird außerdem angenommen, dass sich der hydrostatische Wasserdruck an den Schichtgrenzen des Opalinustons nicht verändert. Erst nach Verschluss wird der Porenwasserüberdruck wieder abgebaut. Den entwickelten Gebirgsmodellen liegen verschiedene Annahmen zugrunde: GM_{max} repräsentiert das günstige Ende der Parameterbandbreiten im Hinblick auf die Gebirgsfestigkeit, GM_{min} dagegen das ungünstige Ende. GM_{ref} stellt das Referenzmodell dazwischen dar.

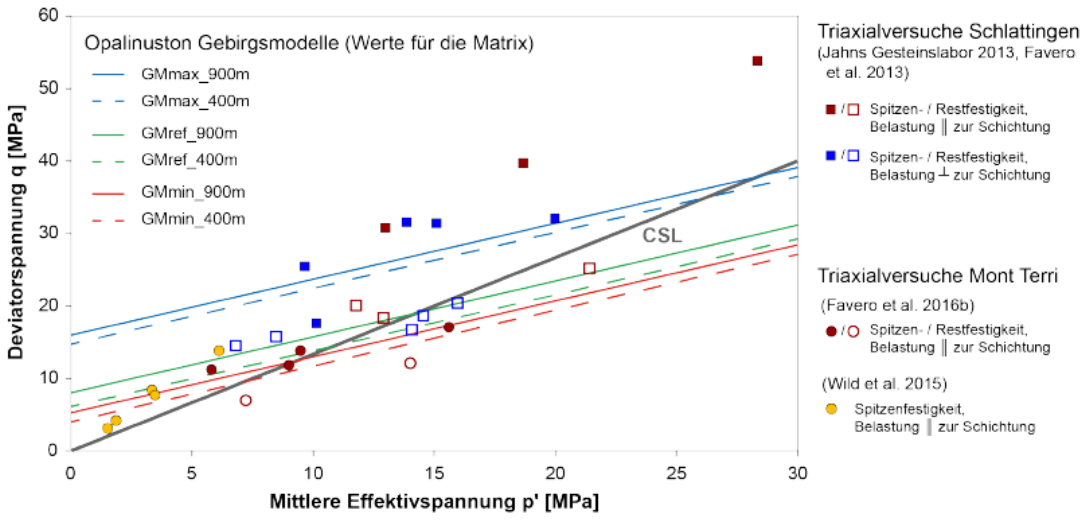


Abbildung A. 4: Ergebnisse von zuverlässig deutbaren Triaxialversuchen und Modellvorhersagen über die Verwendung von Parameterbandbreiten (min, ref, max) (Nagra 2016a)

Demnach erreicht der Opalinuston, in Abhängigkeit von seiner Einspannung, Spitzenfestigkeiten zwischen ca. 2 MPa und 55 MPa. Aus der mittleren Effektivspannung lässt sich eine äquivalente Teufe ableiten, da die Verhältnisse von Vertikalspannung und minimaler sowie maximaler horizontaler Spannung im Opalinuston über die Teufe recht konstant sind (Nagra 2014a). Für den Teufenbereich zwischen 400 m und 1 000 m ergibt sich eine äquivalente mittlere Effektivspannung von ca. 10 MPa bis 26 MPa. Hierzu lassen sich Festigkeiten des Opalinustons von ca. 10 MPa bis ca. 25 MPa für das Modell GM_{ref} in Abbildung A. 4 ablesen. Die Festigkeit steigt mit zunehmender Teufe bzw. der damit einhergehenden Einspannung. Bei Eintrag dieser Werte in die Diagramme nach Lux & Eberth (2002) lässt sich erkennen (Abbildung A. 5), dass überwiegend weniger günstige gebirgsmechanische Eigenschaften vorhergesagt werden, mithin ein tragender Ausbau voraussichtlich grundsätzlich notwendig ist.

Erfahrungen aus dem Felslabor Mont Terri zeigen, dass es im Opalinuston in ca. 300 m Teufe bei Gesteinsfestigkeiten von ca. 10 MPa möglich ist, Grubenbaue mit einem vergleichsweise geringen Ausbauaufwand langfristig standsicher zu erstellen (Herold et al. 2020c). Auch dies deckt sich gut mit der Eintragung der Daten aus Mont Terri in Abbildung A. 5.

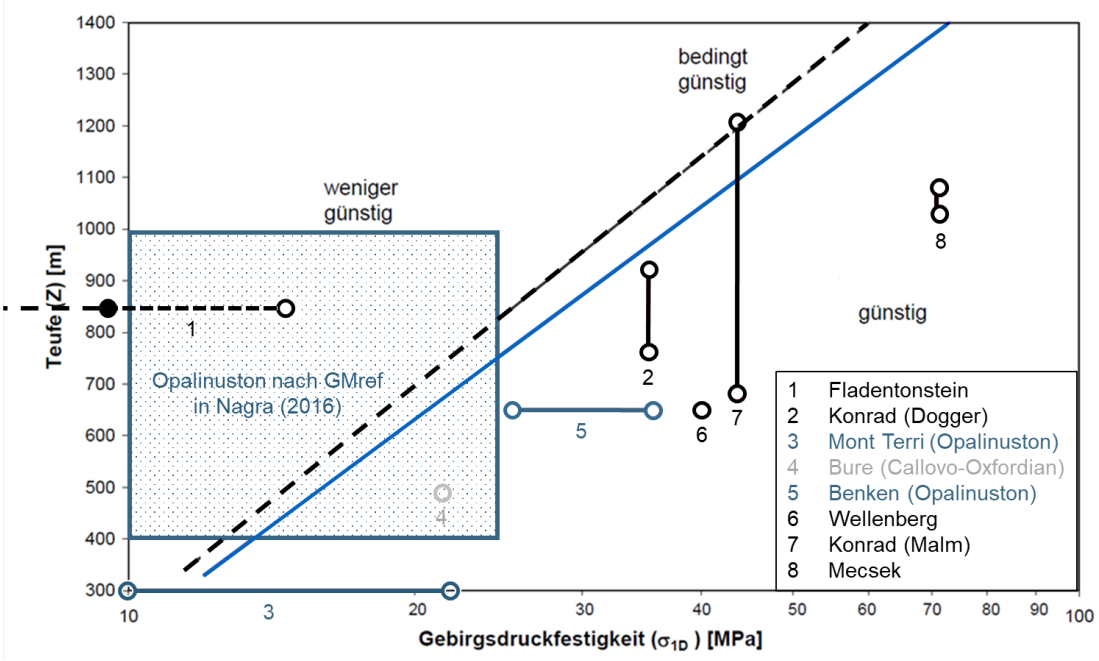


Abbildung A. 5: Einschätzung verschiedener Tongesteine, basierend auf Lux & Eberth (2002), Czaikowski et al. (2005), Daten aus Nagra (2002d), BGE Daten (Fladentonstein, Schachtanlage Konrad) und der Modellvorhersage GM_{ref} aus Nagra (2016a) im blauen Kasten

Jedoch scheint eine grundsätzliche Beurteilung des Opalinustons im Hinblick auf seine gebirgsmechanischen Eigenschaften ist auf Basis der vorhandenen Labordaten kaum möglich zu sein.

„Aufgrund der geomechanischen Eigenschaften spielen die Gebirgsfestigkeiten und Verformungseigenschaften des Opalinustons in Kombination mit Störungen (Strukturen), dem Porenwasser und den Gebirgsspannungsverhältnissen eine maßgebende Rolle.“ (Nagra 2016a).

Diese Eigenschaften können sich selbst bei ähnlicher mineralogischer Zusammensetzung des Opalinustons von Standort zu Standort unterscheiden und liegen so in Form von Bandbreiten vor, die Vorhersagen zu Festigkeiten (wie in Abbildung A. 5 versucht) nur mit hohen Ungewissheiten erlauben.

Diese Einschätzung wird auch von Amann & Löw (2016) geteilt, die wiederum die Darstellungen aus Nagra (2016a) für das ENSI in einem Expertengutachten beurteilen. Amann & Löw (2016) stellen die großen Unsicherheiten in der Datenlage zu den geologischen Verhältnissen heraus. Dementsprechend kann dem Vorgehen der Nagra, große Bandbreiten abdecken zu wollen, zwar grundsätzlich zugestimmt werden. Allerdings wird die Methode der Modellierung der NAGRA stark kritisiert: Die gebirgsmechanischen Annahmen seien zweifelhaft. Das Modell GM_{max} sei in Bezug auf die Standortgebiete in der Schweiz obsolet. Der Ansatz, eine große Bandbreite an geomechanischen Parametern zu verwenden, werde durch gleichartige konservative Annahmen in den Modellen konterkariert, sodass sich kaum Unterschiede zwischen den Modellergebnissen von GM_{min} und GM_{ref} ergeben. Zusammenfassend werde der Einfluss der möglichen Bandbreite geomechanischer Parameter von der Nagra unterschätzt, während der Einfluss der Tiefenlage überschätzt werde. Demnach sei das Ergebnis der Nagra zur Beschränkung der Tiefenlage nach Amann & Löw (2016) „nicht ausreichend robust“. Zu einer ähnlichen Beurteilung kommen Ramoni et al. (2016). Insbesondere sei auch die Zurückstellung des Standortgebiets Nördlich Lägern auf Basis der erfolgten Arbeiten nicht belastbar. Das Fehlen einer gebirgsmechanischen Datenbasis und die getroffenen ungünstigen und konservativen Modellierungsannahmen seien kritisch für die Beurteilung.

In Publikationen nach 2016 taucht die bautechnische Machbarkeit nicht mehr als entscheidendes Thema der Nagra zur Festlegung von Teufenlagen oder zum Standortvergleich auf. Stattdessen verbleibt das Standortgebiet Nördlich Lägern für die dritte Etappe im Schweizer Auswahlverfahren, da das Bundesamt für Energie der Schweiz der Einschätzung des ENSI und dessen Gutachern folgt und die Begründung der Nagra für die Zurückstellung des Standortgebiets auf Basis der bautechnischen Machbarkeit als nicht belastbar zurückweist (BFE 2018).

Anhang 1.4 F&E Vorhaben AGEnT der BGE TECHNOLOGY GmbH

Die BGE TECHNOLOGY GmbH hat in einem F&E Projekt namens AGEnT die Wirkung von Ausbausystemen in Tongestein näher untersucht (Herold et al. 2020c).

„Bei der Planung eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle in Tongesteinsformationen ist ein Ausbau der Grubenräume entsprechend der jeweiligen Teufenlage generell vorzusehen. Gründe dafür sind die Tongesteinseigenschaften wie zum Beispiel die geringe bis mäßige Festigkeit, das Kriechverhalten oder die Eigenschaftsänderungen in Abhängigkeit vom Wassergehalt. Bergbehördliche Vorgaben zur Wahrung der betrieblichen Sicherheit, radiologische Aspekte des Strahlenschutzes und weitere regulatorische Vorgaben führen zu hohen

Anforderungen an die Ausbausysteme. Weiterhin kann mit Blick auf eine mögliche Rückholung der Endlagerbehälter ein langlebiger Streckenausbau von Vorteil sein, was wiederum zusätzliche Anforderungen an den Funktionszeitraum stellt. Auch für die Langzeitsicherheit des Endlagers hat der Ausbau Konsequenzen. Zum einen wird die Neigung zur Bildung von Wegsamkeiten beeinflusst, welche präjudizierend für potenziell eindringende Fluide wirken können. Zum anderen sind chemische Wechselwirkungen der Ausbaumaterialien mit dem Tongestein möglich" (Herold et al. 2020c).

Zur Bearbeitung dieses Spannungsfeldes von Ausbausystemen, verwendeten Baustoffen, Bau- und Betriebssicherheit sowie der Langzeitsicherheit wurden im F&E Vorhaben AGEnT verschiedene Untersuchungen angestellt. Betrachtungen zum Streckenausbau wurden unterteilt in kurzlebige Strecken, insbesondere Einlagerungsstrecken, und langlebige Strecken, deren Lebensdauer mit bis zu 50 Jahren angesetzt wird. Der Einfluss verschiedener Parameter auf die Gestaltung der jeweiligen Ausbausysteme wurde untersucht, darunter:

- Anzahl benachbarter Einlagerungsstrecken
- Querschnittsform der Strecken
- Lateraler Trennflächenabstand („Bankung") im Wirtsgestein
- Teufe
- Festigkeit des Gebirges

Für die in diesem Anhang beschriebenen Überlegungen sind die Variation von Teufe und Gebirgsfestigkeit von besonderer Bedeutung. Auch wenn in AGEnT nicht explizit Opalinuston in den Vordergrund gerückt wurde, liegen die zentralen Modellparameter in Größenordnungen, wie sie auch für Opalinuston in Deutschland auftreten können. Die zweidimensionalen, numerischen Berechnungen ergaben folgendes:

Das Ausbausystem für Einlagerungsstrecken wurde, ähnlich wie durch Nagra (2014d) gefordert, auf einen Ausbau aus Spritzbeton mit der Dicke von 30 cm festgelegt. Nach Herold et al. (2020c) zeigt sich, dass Standfestigkeit für die Pfeiler (Festen) und geringe Streckenverformungen bei neun benachbarten Einlagerungsstrecken mit folgenden Parametern erreicht werden kann:

- Verhältnis Pfeilerbreite zu Streckenbreite: 4
- Gesteinsfestigkeit: 20 MPa
- Bankung: 90 cm
- Teufe: 1 000 m

Damit gibt es ein gutes Indiz dafür, dass die technische Machbarkeit für den Bau und Betrieb von Einlagerungsstrecken im Tongestein bis in eine Teufe von 1 000 m bei geringfügigem Ausbau gegeben ist. Voraussetzung ist, dass die gebirgsmechanischen Eigenschaften (Bankung, weitere Trennflächen, Festigkeit usw.) nicht allzu nachteilig ausfallen. Ein Ausbau aus Spritzbeton mit 30 cm Dicke wird jedoch als planmäßig tragend bewertet. Da in AGEnT grundsätzlich 30 cm Spritzbeton

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

für den Ausbau von Einlagerungsstrecken vorausgesetzt wurden, lässt sich die Möglichkeit, den Ausbau in geringeren Teufen zu reduzieren und damit zu einer anderen Bewertung zu kommen, nicht prüfen.

Im Fall der langlebigen Grubenbaue mit Offenstandszeiten von bis zu 50 Jahren wurden in AGEnT drei verschiedene Ausbausysteme einer einzelnen Strecke untersucht: einschalig, zweischalig und zweischalig mit nachgiebigen Elementen. Für alle drei Varianten konnten Teufenbereiche identifiziert werden, in denen das jeweilige Ausbausystem an seine Grenzen kommt. Im Vergleich zur Untersuchung der Einlagerungsstrecken sind die zusätzlichen Einwirkungen aus insbesondere Quellen und einer (geringen) Kriechrate entscheidend. Die ansonsten festgelegten Randbedingungen waren die folgenden:

- Gesteinsfestigkeit: 20 MPa
- Bankung: 90 cm
- Spannungsverhältnis vertikal/horizontal: 1
- Einbau des Ausbaus 50 cm hinter der Ortsbrust

Die Ergebnisse zeigen nach Herold et al. (2020c), dass ein einschaliges, starres Ausbausystem mit einer Betondicke des Ausbaus von 55 cm ab ca. 750 m Teufe bei einer Lebensdauer von 50 Jahren an seine Grenzen kommt, da eine Betondruckfestigkeit verlangt wird, die das bautechnisch machbare überschreiten (deutlich größer als 100 MPa). Gleiches gilt für ein zweischaliges, starres Ausbausystem mit einer Gesamtbetondicke von 55 cm im Teufenbereich zwischen 750 m und 1 000 m. Erst das zweischalige Ausbausystem mit einer Gesamtdicke von 75 cm und Nachgiebigkeitselementen lässt eine ausreichende Standfestigkeit der Strecke über 50 Jahre bis in eine Teufe von 1 000 m erwarten. Die Annahme nachteiliger Gebirgseigenschaften (z. B. Anisotropie, geringere Trennflächenabstände, geringere Gesteinsfestigkeit) kann jedoch auch solche Ausbausysteme in noch höherer Stärke notwendig machen oder an ihre Grenzen bringen. Andererseits führt der frühe Einbau des Ausbausystems schon 50 cm hinter der Ortsbrust zu einer hohen Belastung des Ausbaus, da nur eine verhältnismäßig geringfügige Vorentlastung stattfinden kann. Hintergrund dieser Strategie ist ein möglicherweise günstiger Einfluss des frühzeitigen Ausbaus auf die Ausbildung einer Auflockerungszone um den Hohlraum herum. Eine Verkleinerung der Auflockerungszone bei Auffahrung könnte sich positiv auf die Langzeitsicherheit auswirken. Inwieweit dieses Vorgehen einen messbaren Einfluss auf die Ausbildung der Auflockerungszone und schließlich auf die Ergebnisse der Langzeitsicherheitsuntersuchen hat, ist allerdings offen. Insbesondere bildet sich eine Auflockerungszone auch schon vor der Ortsbrust und hat nach Blümling et al. (2007) nur einen begrenzten Effekt auf den Radionuklidtransport. Aufgrund des sehr frühen Einbaus der Betonschale lassen sich die ermittelten Einschränkungen der Machbarkeit des Ausbaus langlebiger Grubenbaue nicht zur Begrenzung möglicher Endlagerteufen im Opalinuston nutzen.

In Herold et al. (2020c) wurde des Weiteren eine vollständig gekoppelten hydromechanischen Finite-Element-Analyse durchgeführt. Basis war ein vollflächiges Ausbaukonzept einer langlebigen Hauptstrecke mit Betonfertigteilen/Tübbingen (Dicke: 40 cm, Betondruckfestigkeit: 50 MPa) und einer Nachgiebigkeitsschicht in 800 m Teufe, die dem Ausbau erlaubt, dem Gebirgsdruck in geringem

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

Maße nachzugeben. Dieser Ausbau erwies sich als grundsätzlich geeignet, den gebirgsmechanischen Einwirkungen zu widerstehen. Die Berücksichtigung der hydraulischen Prozesse im Gebirge scheint in dem verwendeten Modellansatz keine entscheidende Größe für die Ausbaudimensionierung zu sein. Jedoch ist die Vergleichbarkeit mit den mechanischen Berechnungen eingeschränkt, da ein anderes Ausbausystem (einschalig mit Nachgiebigkeitselementen), eine andere Teufe sowie weiterhin unterschiedliche Modellparameter gewählt wurden.

Die Untersuchungen zeigen jedoch insgesamt, dass die Standfestigkeit der langlebigen Grubenbaue im Tongestein die größere Herausforderung darstellt im Vergleich zur Standfestigkeit der Einlagerungsstrecken. Ein tragender Ausbau ist bei diesen Strecken grundsätzlich anzunehmen. In Teufen tiefer als 750 m wurde der Ausbau langlebiger Strecken in AGEnT nicht untersucht.

Anhang 1.5 Analyse des Stands von Wissenschaft und Technik in Hinblick auf die Anforderungen

Zur Genehmigungsfähigkeit eines HAA-Endlagers gehört, dass die Herstellbarkeit des Endlagerbergwerks, die Durchführung des Endlagerbetriebs und eine mögliche Rückholung sicher durchgeführt werden können (§ 26 StandAG). Eine weitere Anforderung ist die Bergbarkeit, die wie die Rückholbarkeit schon in § 1 StandAG verankert ist. Maßnahmen zur Sicherstellung der Betriebssicherheit sind unter Beachtung einer Ausgewogenheit mit Maßnahmen der Langzeitsicherheit auszuwählen (§ 12 EndlSiAnfV). Diese verschiedenen Anforderungen werden in diesem Kapitel unter Berücksichtigung des Stands von Wissenschaft und Technik im Hinblick darauf analysiert, ob sich aus ihnen eine Einschätzung der günstigen Teufe eines Endlagerbergwerks herleiten lässt.

Anhang 1.5.1 Herstellbarkeit des Endlagerbergwerks

Die Herstellbarkeit eines HAA-Endlagers in Opalinuston ist grundsätzlich gegeben. Der notwendige bautechnische Aufwand hängt im Wesentlichen von den gebirgsmechanischen Eigenschaften des Opalinustons ab, die in großer Bandbreite auftreten können. Es scheint zwar plausibel, davon auszugehen, dass größere Teufen schwierigere bautechnische Bedingungen aufweisen. Jedoch lässt sich daraus keine allgemeingültige Festlegung einer günstigen Teufenlage ableiten, die grundsätzlich für Opalinuston Gültigkeit besitzt. Eine solche günstige Teufenlage kann aufgrund der großen möglichen Parameterbandbreite lediglich auf Basis der gebirgsmechanischen Eigenschaften des Opalinustons an einem konkreten (Teil-)Untersuchungsraum hergeleitet werden. Diese Schlussfolgerung wird auch dadurch widergespiegelt, dass die bautechnische Machbarkeit im Auswahlverfahren in der Schweiz zum Schluss keine Rolle mehr beim Standortvergleich in der Etappe 2 des Verfahrens spielte. Nichtsdestotrotz ist festzustellen, dass keinerlei Baumaßnahmen im Opalinuston mit einer Überlagerung von mehr als 750 m (Grenchenbergtunnel) bekannt sind.

Anhang 1.5.2 Durchführbarkeit der Endlagerung

Eine Einschränkung der Durchführbarkeit der Endlagerung mit zunehmender Teufe kann über die thermischen Randbedingungen bei der Einlagerung hochradioaktiver Abfälle über eine gegebene Grenztemperatur nicht hergeleitet werden. Die Beladung der Endlagergebinde kann ausreichend klein gewählt werden, sodass aus thermischer Sicht sehr hohe Teufen erreicht werden können. Nach

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

BGE (2020j) ist hierbei jedoch zu berücksichtigen, dass durch die geringe Beladung mehr Endlagergebinde benötigt werden und es so bei einer Verwendung von metallischen Werkstoffen als Behältermaterial durch Korrosion und Gasbildung zu einer nachteiligen Beeinflussung der Langzeitsicherheit kommen kann. Außerdem wird durch die höhere Anzahl von Endlagergebinden eine größere Endlagerfläche in größeren Teufen erforderlich. Ansonsten steht der Durchführbarkeit der Endlagerung bei standfestem Grubengebäude kein Hindernis im Weg. Die Herstellbarkeit von Verschlussbauwerken ist gesondert zu prüfen, da Verschlusskonzepte in der Regel angepasste Ausbaumaßnahmen oder ein teilweises Rauben des Ausbaus voraussetzen. Die Umsetzbarkeit dieser Maßnahmen setzt die Beherrschung der gebirgsmechanischen Verhältnisse während ihrer Durchführung voraus.

Anhang 1.6 Rückholbarkeit

Bei der Planung eines Endlagers einschließlich einer Rückholung ist die Anforderung nach § 13 Abs. 2 EndlSiAnfV zu berücksichtigen,

> *„[…] dass der […] voraussichtlich erforderliche technische und zeitliche Aufwand [der Rückholung] den für die Einlagerung erforderlichen Aufwand nicht unverhältnismäßig übersteigt."*

Eine besondere zusätzliche technische Herausforderung bei der gesetzlich geforderten Rückholbarkeit Wärme erzeugender radioaktiver Abfälle gegenüber ihrer Einlagerung ist die zwischenzeitliche Aufheizung des umgebenden Gebirges durch die freigesetzte radioaktive Zerfallswärme. In den Einlagerungsstrecken selbst ist mit Temperaturen in der Nähe der Grenztemperatur der Endlagerauslegung zu rechnen. Diesbezüglich wird die vorgenannte Anforderung so interpretiert, dass zum Zeitpunkt einer Rückholung, d. h. nach Aufheizung des Gebirges durch die HAA-Abfälle u. U. über mehrere Jahrzehnte hinweg, auch im ungünstigsten Fall nur Gebirgstemperaturen angetroffen werden sollten, die durch den Stand der Bergbautechnik erwiesenermaßen beherrschbar sind. Darin wird eine wesentliche Voraussetzung zur gesetzeskonforme Erfüllung der Anforderung zur Gewährleistung der Rückholbarkeit für die Dauer der Betriebsphase des Endlagers (gem. § 1 Abs. 4 StandAG) gesehen. Im Bergbau beherrschte maximale Gebirgstemperaturen *in situ* liegen bei ca. 70 °C. Werden Temperaturen unterhalb oder gleich dieser Temperatur als Gebirgstemperatur bei Rückholung angetroffen, ist entsprechend vorstehender Begründung zu erwarten, dass der voraussichtlich erforderliche technische und zeitliche Aufwand der Rückholung (Störfall) den der Einlagerung (Normalbetrieb) nur in einem angemessenen Verhältnis übersteigt. Da die maximale Gebirgstemperatur durch die Endlagerauslegung eingestellt werden kann, ist der thermische Gesichtspunkt der Rückholbarkeit allerdings nicht entscheidend für die Herleitung einer günstigen Teufe. Dieser Aspekt muss jedoch, unter Berücksichtigung der steigenden *in situ* Temperatur bei zunehmender Teufe, gegen die Endlagerfläche und die Anzahl der Endlagergebinde abgewogen werden, da beide Größen tendenziell umso mehr steigen, je geringer die Erwärmung des Gebirges ausfallen soll und je höher die *in situ* Temperatur ausfällt.

Ein weiterer Gesichtspunkt ist die Gebirgsmechanik bei Rückholung. Durch den Rückholungsbetrieb ist anzunehmen, dass die Betriebszeit der Grubenräume unter Tage länger ausfällt, als ursprünglich für den Einlagerungsbetrieb geplant. Da die Lebensdauer von Ausbausystemen im Tongestein ein

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

wesentlicher Parameter bei deren Auslegung ist, sind bei Berücksichtigung der Dauer eines Rückholbetriebs aufwendigere Maßnahmen zur Gebirgssicherung nötig, als wenn der Einlagerungsbetrieb allein betrachtet wird. Dementsprechend sind die Herstellbarkeit bzw. die Machbarkeit der längeren Offenhaltung der für die Rückholung notwendigen Bergwerksbereiche entscheidend. Diesbezüglich wurden bislang keine quantitativen Untersuchungen angestellt. Jedoch ist zu erwarten, dass die Berücksichtigung der Rückholbarkeit nach § 13 EndlSiAnfV zu Anforderungen an Ausbausysteme führen kann, die deren Herstellbarkeit in Abhängigkeit von den gebirgsmechanischen Eigenschaften einschränken können.

Anhang 1.7 Bergbarkeit

§ 14 Abs. 2 EndlSiAnfV konkretisiert die Anforderung der Bergbarkeit in Bezug auf die Endlagerbehälter und die Dokumentation der Endlagerung. Aus dieser Anforderung lässt sich keine Teufenbegrenzung ableiten.

Anhang 1.7.1 Ausgewogenheit der Maßnahmen von Betriebs- und Langzeitsicherheit

Die Besonderheit eines HAA-Endlagers im Vergleich zu kerntechnischen Anlagen oder anderen Kernanlagen ist dessen Standort im tiefen Untergrund. Anders als bei übertägigen Gebäuden sind hier die erstellten Strukturen allseitig von natürlichem Gestein umgeben und somit sehr stark von dessen Eigenschaften und Verhalten abhängig. Da die damit verbundenen Herausforderungen denen des Berg- und Tunnelbaus weitestgehend entsprechen, erfolgt die Einschätzung günstiger Bedingungen anhand von Analogien zu diesen Industriezweigen. Nach Nagra (2016a) sind günstige Bedingungen für die bautechnische Machbarkeit eines Endlagers wie folgt definiert:

> *„Günstig sind bautechnisch einfach beherrschbare Verhältnisse, bei denen sich durch die Tiefenlage keine extremen Anforderungen bei der Erstellung, beim Betrieb, bei der Überwachung (inkl. einer eventuellen Rückholung) oder beim Verschluss des Lagers ergeben. Günstig ist, wenn der Verschluss der Lagerteile ohne technische Probleme mit der erforderlichen Abdichtung realisiert werden kann.“ (Nagra 2016a)*

Das Vermeiden von extremen Anforderungen bei Erstellung, Betrieb, Rückholung und Verschluss deckt sich mit der nach § 12 Abs. 1 EndlSiAnfV geforderten Ausgewogenheit von Maßnahmen zum Erreichen der Betriebs- und Langzeitsicherheit.

Anhang 1.8 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Die hier vorgelegten Untersuchungen haben sich primär mit der Frage beschäftigt, ob angegeben werden kann, bis zu welcher Teufe die bautechnischen Bedingungen für die Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen im Opalinuston als günstig bezeichnet werden können. Wesentlich ist die Einschätzung der gebirgsmechanischen Bedingungen und der notwendigen Ausbausysteme.

In geringen Teufen lassen sich im Opalinuston Grubenbaue mit Hilfe von Spritzbeton und Ankern erstellen. Die zeigt sich insbesondere im Untertagelabor Mont Terri. In größeren Teufen ist mit der Notwendigkeit eines tragenden Ausbausystems zu rechnen. Darüber hinaus ergibt insbesondere das Studium der Diskussion zwischen Nagra und ENSI in der Etappe 2 des Auswahlverfahrens in

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

der Schweiz, dass die Bandbreite möglicher gebirgsmechanischer Parameter des Opalinustons sehr groß ist und dass ihre Standortabhängigkeit eine etwaige generelle Teufenabhängigkeit deutlich überlagert.

Im Ergebnis kann festgehalten werden, dass es aus bautechnischer Sicht günstiger ist, wenn die Einlagerungssohle in einer Teufe kleiner als 750 m liegt. Bis zu dieser Teufe liegen noch entsprechende bautechnische Erfahrungen, insbesondere im Tunnelbau, vor. Bautechnisches Neuland sollte beim Bau eines Endlagerbergwerks nicht betreten werden, um einen reibungslosen und sicheren Bau-, Einlagerungs- und Stilllegungsbetriebs zu gewährleisten. Tiefere Lagen sind zwar machbar, sollten jedoch nur dann in Frage kommen, wenn sie anderweitig deutliche Vorteile bieten (vgl. Argumentation aus Nagra (2016a)). Hier muss eine Abwägung erfolgen bei der die potenziellen Herausforderungen beim Bau, Betrieb und Verschluss in Relation zu dem Gewinn an Langzeitsicherheit gesetzt werden. Unterhalb von 1 000 m überwiegen die Nachteile der bergbaulichen Machbarkeit gegenüber dem Gewinn an Langzeitsicherheit, daher werden im Opalinuston nur Tiefen unter GOK bis 1 000 m berücksichtigt.

Sollte es im Rahmen der Phase II des Standortauswahlverfahrens zu Erkundungen im Opalinuston kommen, ergeben sich aus dieser Untersuchung klare Anforderungen an diese Erkundung mit Blick auf die Ermittlung günstiger Teufen für ein HAA Endlagersystem. Zentral sind optimale Kenntnis der *in situ* Spannungs- und Festigkeitseigenschaften des Gebirges im jeweiligen (Teil-)Untersuchungsraum.

Anhang 2 Herausforderungen bei der Entwicklung von Endlagerkonzepten in kristallinem Wirtsgestein

Anhang 2.1 Einleitung

In § 7 Abs. 6 Nr. 2 EndlSiUntV wird ausgeführt, dass im Rahmen der rvSU davon ausgegangen werden kann, *„dass technische und geotechnische Barrieren ihre Funktion grundsätzlich in dem jeweils vorgesehenen Zeitraum erfüllen, sofern dies nach dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik nicht ausgeschlossen erscheint“*. Dies hat Auswirkungen auf die Auslegung eines Endlagersystems im kristallinen Wirtsgestein, insbesondere, wenn entsprechend § 23 Abs. 4 StandAG ein wesentlich auf technischen oder geotechnischen Barrieren beruhendes Endlagersystem zu Grunde gelegt wird. Nach Stand von Wissenschaft und Technik ist für ein Endlagersystem, welches nicht auf einem Konzept mit einschlusswirksamem Gebirgsbereich basiert, ein Nachweis des sicheren Einschlusses der Radionuklide für eine Million Jahre nicht abschließend darstellbar. Dieses Konzept ist jedoch in der Wechselwirkung zwischen einer günstigen Geologie und den darauf abgestimmten technischen und geotechnischen Maßnahmen grundsätzlich möglich. Das StandAG, die EndlSiAnfV und EndlSiUntV geben einen klaren Weg vor, auf dem eine entsprechende Bearbeitung erfolgen soll. Wie allgemein für die rvSU gültig, erlaubt die EndlSiUntV eine generische Betrachtung der Herangehensweise und Bearbeitung der vorläufigen Auslegung des Endlagers, was in den nachfolgenden Kapiteln für das kristalline Wirtsgestein dargestellt werden soll.

Das Endlagersystem hat die Aufgabe, die hochradioaktiven Abfälle zu konzentrieren und sicher einzuschließen und damit von der Biosphäre fernzuhalten (§ 26 Abs. 2 StandAG). Das Sicherheitskonzept eines Endlagersystems gibt die wesentliche Strategie wieder, wie dieses Ziel des Einschlusses und der Konzentration erreicht werden soll. In dem Sicherheitskonzept werden die Barrieren des Endlagersystems, ihre Sicherheitsfunktionen und das gegenseitige Zusammenwirken der Barrieren beschrieben. Der sichere Einschluss muss innerhalb der wesentlichen Barrieren so erfolgen, dass die Radionuklide aus den radioaktiven Abfällen weitestgehend am Ort ihrer ursprünglichen Einlagerung verbleiben (§ 4 Abs. 4 EndlSiAnfV). Die folgenden beiden Sicherheitskonzepte sind denkbar und in der EndlSiAnfV vorgesehen:

A) Ein Sicherheitskonzept, bei dem der sichere Einschluss der radioaktiven Abfälle durch ein oder mehrere einschlusswirksamen Gebirgsbereiche, die die wesentliche Barriere bilden, gewährleistet wird (Endlagersystem Typ 1).

B) Ein Sicherheitskonzept für das Wirtsgestein Kristallingestein, sofern in diesem kein einschlusswirksamer Gebirgsbereich ausgewiesen werden kann, bei dem der sicherere Einschluss der radioaktiven Abfälle durch für die jeweilige geologische Umgebung geeignete technische und geotechnische Barrieren (wesentliche Barriere) gewährleistet wird (Endlagersystem Typ 2).

Eine detailliertere Beschreibung der beiden Sicherheitskonzepte befindet sich in Kapitel 4.1.3.2. Beide Sicherheitskonzepte sind für das kristalline Wirtsgestein grundsätzlich denkbar, was Auswirkungen auf die vorläufige Auslegung des Endlagers gemäß § 6 Abs. 4 EndlSiUntV hat. Dort sind die *„wesentlichen Barrieren […], deren grundlegende Eigenschaften und deren räumliche Erstreckung*

sowie die […] weiteren Barrieren des Endlagersystems“ zu beschreiben (§ 6 Abs. 4 Nr. 1 EndlSiUntV). Dies führt zu Herausforderungen bei der vorläufigen Auslegung des Endlagers, die nachfolgend kurz gezeigt und in den darauffolgenden Kapiteln weiter erläutert werden. Weiterhin werden erste Annahmen für die vorläufige Auslegung des Endlagers formuliert.

Für das Endlagersystem Typ 1 besteht die Herausforderung in der Ausweisung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs als wesentlich Barriere. An diesen sind hohe Anforderungen im Hinblick auf den Einschluss der Radionuklide gestellt, insbesondere der Grenzwert der Gebirgsdurchlässigkeit (§ 23 Abs. 5 Nr. 1 StandAG), der mit Blick auf kristallines Wirtsgestein stark von dem Kluftsystem und dessen Eigenschaften am Standort abhängig sein wird. Inwiefern dieses Konzept in Deutschland umgesetzt werden kann, ist auf Basis der derzeitig vorliegenden und zukünftigen Datenlage, insbesondere Erkundungsergebnisse, zu überprüfen. Weiterhin gibt es, im Vergleich zu den Wirtsgesteinen Steinsalz und Tongestein, wenige Forschungsarbeiten und -ergebnisse auf nationaler und internationaler Ebene im kristallinen Wirtsgestein bzgl. des Endlagersystems Typ 1 auf denen die Arbeiten der BGE aufbauen können.

Für das Endlagersystem Typ 2, bei dem der sichere Einschluss durch die technischen und geotechnischen Barrieren gewährleistet werden muss, werden entsprechend hohe Anforderungen an diese Barrieren gestellt, die geologischen Barrieren haben dagegen eine untergeordnete Rolle. In Schweden, Finnland und Kanada wird dieses Konzept (Typ 2) verfolgt und befindet sich dort teilweise bereits in der Umsetzung. Daher ist davon auszugehen, dass dieses Konzept grundsätzlich nach dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik umsetzbar ist. Es ist aber zu beachten, dass in diesen Ländern das endzulagernde Inventar und die regulatorischen Anforderungen von Deutschland abweichen.

Anhang 2.2 Kristalline Gesteinsformationen als Wirtsgestein für die Endlagerung

Anhang 2.2.1 Datenlage zu kristallinen Wirtsgesteinsformationen

Kristalline Wirtsgesteine umfassen Plutonite (Le Maitre et al. 2002), also z. B. Granite und Granodiorite, und hochgradig regionalmetamorphe Gesteine der Fazies Amphibolit, Eklogit und Granulit (Eskola 1915), wie z. B. Gneise und Granulite (BGE 2020j). Kompakte, ungestörte kristalline Gesteinseinheiten besitzen günstige Eigenschaften als Wirtsgestein für geologische Tiefenlagerung und erfüllen die Anforderung an die Barrierewirksamkeit eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (Mindestanforderungen nach § 23 Abs. 5 StandAG). Kristalline Wirtsgesteine können jedoch im Felsverband Klüfte enthalten, die sich z. B. durch geologische Prozesse (z. B. Störungszonen, Entlastung und tektonische Hebung oder Abkühlungsprozesse) gebildet haben. Das Trennflächengefüge in kristallinen Wirtsgesteinen kann die Gebirgsdurchlässigkeit erhöhen und die Barrierewirkung herabsetzen.

Oberflächennahe Vorkommen von kristallinen Gesteinen sind in Deutschland weitgehend kartiert und ausgewiesen. In geologische Karten sind neben Aufschlussdaten von Gesteinen auch interpretierte Erkundungsdaten aus Bohrungen, Geophysik und Fernerkundung eingeflossen. Die Datendichte von Erkundungsergebnissen, v. a. Tiefbohrungsdaten und geophysikalische Daten, zu kristallinen Wirtsgesteinsformationen in größeren Tiefen ist stark vom Erkundungszweck abhängig und geologische Daten sind regional in Deutschland sehr uneinheitlich verteilt.

Erkundungsbohrungen aus der Erdöl-Erdgas-Erkundung und Projekten zur Tiefengeothermie in sedimentären Becken, Störungszonen und Grabensystemen tangieren kristalline Gesteinsformationen oft nur zufällig, da diese meist nicht die Zielhorizonte der Erkundung waren. Schichtenverzeichnisse und geophysikalische Bohrdaten aus solchen Tiefenbohrungen besitzen deshalb nur informativen Wert für die Bestätigung des Vorkommens von kristallinen Wirtsgesteinen. Ein Beispiel dafür sind die beschrieben Kernproben aus Erdöl-Erdgas-Erkundungsbohrungen in Süddeutschland, die oft nur wenige Meter an kristallinen Wirtsgesteinen in der Endteufe erbohrt haben (Drong 2003). Zudem sind Gebiete wie z. B. der Oberrheingraben, die hervorragend exploriert und für die Tiefengeothermie besonders interessant sind, aufgrund der großen geothermischen Anomalie und der starken tektonischen Überprägung für eine geologische Tiefenlagerung von radioaktiven Abfällen grundsätzlich nicht geeignet (siehe Anhang 6 in BGE 2020k).

Eine hervorragende Datenquelle für kristalline Wirtsgesteine stellen wiederum Explorationsergebnisse aus der Buntmetall- und Uranerkundung dar. Vor allem Tiefbohrungen aus der Uranerkundungsphase in den 1950er bis 1980er Jahren produzierten lange Kernstrecken und geophysikalische Logs von Uran-spezialisierten Graniten und ihren Nebengesteinen und führten zu umfangreichen Erkundungsberichten. Die Kuppelbereiche von hochfraktionierten Li-Sn-Graniten waren das Erkundungsziel der Zinnerkundung im Erzgebirge und Erkundungsdaten zu hydrothermalen Ganglagerstätten (v. a. Ag-Zn-Pb- und Fluorit-Baryt-Mineralisationen), die immer in Diskontinuitäten in kristallinen Gesteinen, sprich Störungen, entstanden sind, finden sich beinahe für jede Zone des variszischen Grundgebirges in Deutschland.

2020-10-26_PM_QMV02_ Textblatt A4 Hochformat_REV02

Die große Mehrheit der Plutonite in Deutschland sind jedoch wenig fraktionierte und spezialisierte Granit- und Granodioritkörper, die bis auf die oberflächennahe Nutzung als Naturwerksteinbrüche keine wirtschaftliche Verwendung finden. Erkundungsdaten über die Beschaffenheit dieser kristallinen Wirtsgesteinsformationen in Teufen zwischen 300 m und 1500 m fehlen fast vollständig.

Anhang 2.2.2 Gebirgsdurchlässigkeit in kristallinen Wirtsgesteinsformationen

Bei kristallinem Wirtsgestein sind die Gesteinsparameter Permeabilität und Gebirgsdurchlässigkeit von besonderer Bedeutung für die Integrität eines möglichen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs. Ein geringes Grundwasserangebot ist die entscheidende Voraussetzung für die Ausweisung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (§ 23 Abs. 5 StandAG, Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit kleiner 10^{-10} m/s) und begrenzt somit auch die Korrosion der Endlagerbehälter und verhindert die Mobilisation und den Transport von Radionukliden.

Die Gebirgsdurchlässigkeit setzt sich aus der Durchlässigkeit (hydraulische Permeabilität) des kristallinen Gesteinskörpers selbst (bestimmt durch den durchflusswirksamen Porenraum bzw. effektive Porosität des kristallinen Gesteinstyps) sowie des Trennflächengefüges im Gebirgsbereich (z. B. Klüfte, Störungen) zusammen. Die Variationsbreite der hydraulischen Permeabilität von kristallinen Wirtsgesteinen ist aus Laborversuchen dieser Gesteinstypen bekannt. Die Gebirgsdurchlässigkeit, wie auch die Parameter Transmissivität, Dispersivität oder auch Klüftigkeitsziffern von kristallinen Wirtsgesteinsformationen, können nur zuverlässig im Rahmen der übertägigen Erkundung von Standortregionen erhoben werden. Das umfasst Erkundungsmethoden, wie z. B. Bohrkernaufnahmen, und vor allem geophysikalische, optische und hydraulische Messverfahren, z. B. Pumpversuche mit Packern oder dem „Posiva flow log device“ (Komulainen et al. 2018) in offenen und nicht verrohrten Bohrlöchern.

Die Gebirgsdurchlässigkeit ist in großen Störungszonen und Scherzonen um Größenordnungen höher als in intakten ungeklüfteten oder wenig geklüfteten kristallinen Gesteinskörpern (z. B. Achtziger-Zupančič et al. 2016; Scibek 2020; Snowdon et al. 2021). Kluftnetzwerke (fracture networks) in Störungszonen bestimmen den Großteil der Transmissivität und damit die Gebirgsdurchlässigkeit in kristallinen Gesteinsformationen in der obersten kontinentalen Kruste (Faulkner et al. 2010; Mitchell & Faulkner 2012). Störungszonen und ihre hydraulisch wirksamen Kluftnetzwerke sollten deshalb bei der übertägigen Erkundung von Standortregionen identifiziert werden.

Die Gebirgsdurchlässigkeit in kristallinen Gesteinsformationen zeigt darüber hinaus eine starke Tiefenabhängigkeit. In Abbildung A. 6 sind Permeabilitätsdaten (aufgetragen gegen die Tiefe) aus dem deutschen Erzgebirge im Vergleich zu weltweiten Datenkompilationen in kristallinen Gesteinen dargestellt (Achtziger-Zupančič et al. 2017). Wenngleich generell große Schwankungen in der hydraulischen Permeabilität und Gebirgsdurchlässigkeit für die verschiedenen Tiefenstufen zu beobachten sind, ist ein insgesamt stark abnehmender Permeabilitäts-Tiefen-Trend in allen Datenkompilationen deutlich zu erkennen (Abbildung A. 6). Auch wenn die Permeabilitätswerte mit zunehmender Tiefe spärlicher werden, unterstreichen die für Deutschland veröffentlichten Daten, dass die Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit (kleiner 10^{-10} m/s; entspricht ca. 10^{-17} m^2 Permeabilität in Abbildung A. 6) in kristallinen Gesteinsformationen gemäß § 23 StandAG erst in Tiefen von mindestens

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

500 m u. GOK im Median erreicht werden kann (Abbildung A. 6). Diese Beobachtungen decken sich auch mit Erkundungsergebnissen zu kristallinen Gesteinsformationen in der Schweiz (Nagra 1994). Man sollte zudem beachten, dass der gezeigte Datensatz für das deutsche Erzgebirge die hydrogeologischen Verhältnisse in stark gestörten und geklüfteten Bereichen des kristallinen Grundgebirges widerspiegelt.

Auf Grund der beschriebenen hydrogeologischen Randbedingungen sollte eine erweiterte Anwendung der Mindestanforderung Mindestteufe im Schritt 2 der Phase I in Betracht gezogen werden. Dies könnte z. B. eine pauschale Erweiterung der Mindestanforderungen auf eine Mindestteufe von 500 m direkt bezogen auf die obere Begrenzung von kristallinen Wirtsgesteinsformationen und nicht auf die Geländeoberkante umfassen (vgl. Abbildung A. 7).

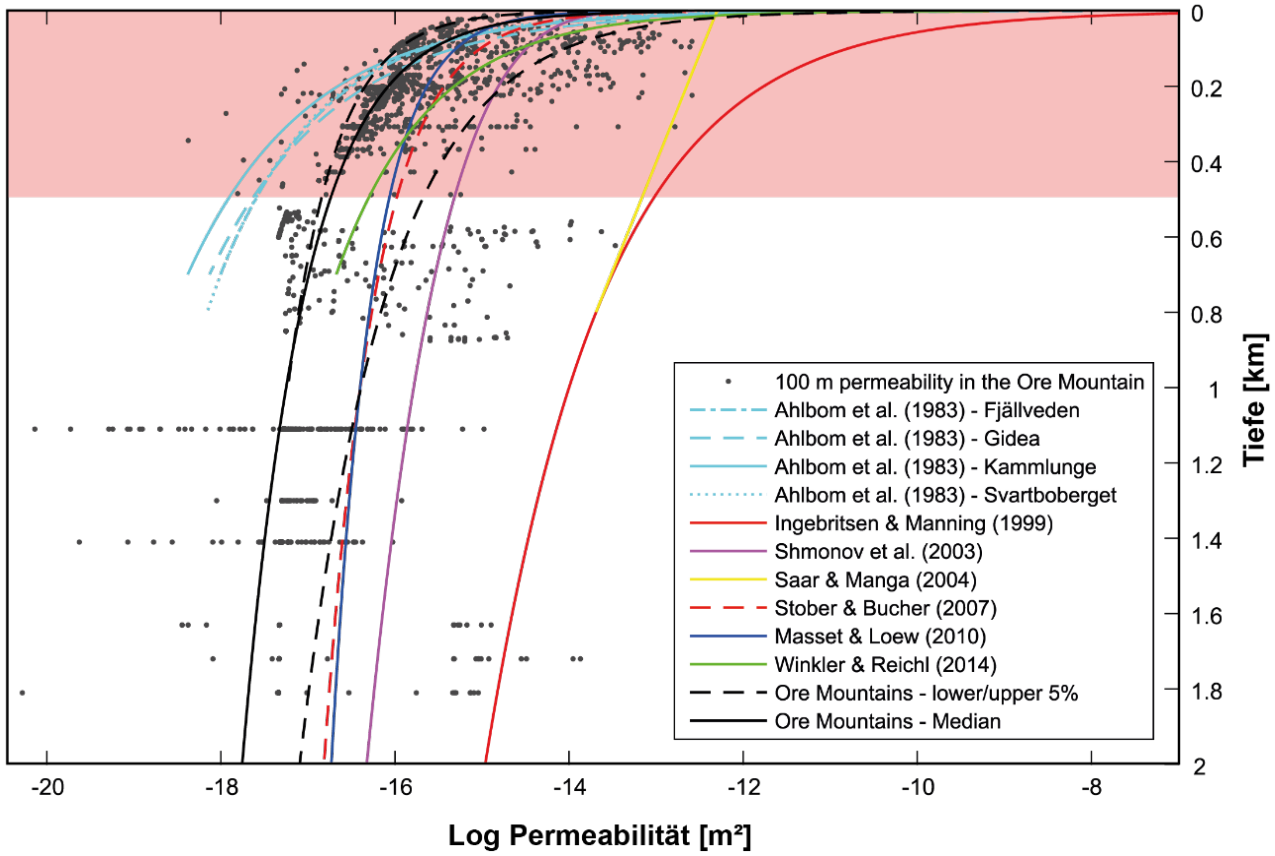


Abbildung A. 6: Gebirgsdurchlässigkeit im deutschen Erzgebirge (Ore mountains) (Achtziger-Zupančič et al. 2017).
im Vergleich mit weiteren Regressionskurven zur Gebirgsdurchlässigkeit aus der Literatur (Ahlbom et al. 1983a; Ahlbom et al. 1983b; Ahlbom et al. 1983c; Ahlbom et al. 1983d; Ingebritsen & Manning 1999; Masset & Loew 2010; Saar & Manga 2004; Shmonov et al. 2003; Stober & Bucher 2007; Winkler & Reichl 2014); Permeabilitätsdaten des Erzgebirges (Achtziger-Zupančič et al. 2017) hier dargestellt als Regressionskurve des Log Median der Permeabilität [m^2] mit zunehmender Teufe; Abbildung verändert nach Achtziger-Zupančič et al. (2017).

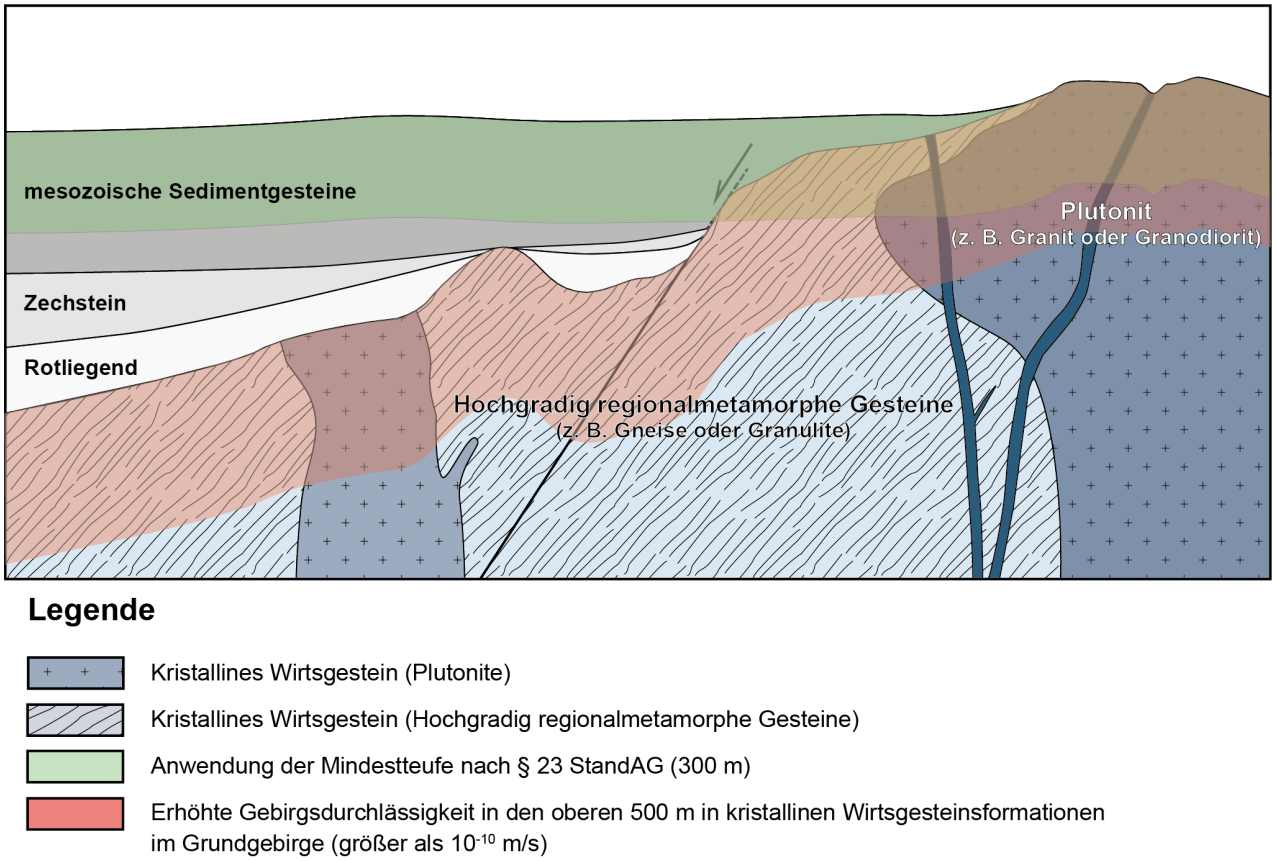


Abbildung A. 7: Geologische Modellvorstellung zur Gebirgsdurchlässigkeit in kristallinen Wirtsgesteinen in Deutschland.
Roter Bereich zeigt die erhöhte Gebirgsdurchlässigkeit in den oberen 500 m in kristallinen Wirtsgesteinsformationen (größer als 10^{-10} m/s).

Anhang 2.2.3 Hydrochemie von tiefen Grundwässern in kristallinen Wirtsgesteinsformationen

Es gibt vergleichsweise wenige hydrochemische Analysen von tiefen Grundwässern (d. h. von Wässern in Teufen größer 500 m) in kristallinen Gesteinsformationen in Deutschland (Stober et al. 2014). Bekannte Grundwasserdaten aus sehr tiefen Bohrungen, d. h. über 2500 m Bohrteufe, stammen aus den Bohrungen Bühl, Soultez-sous-Forêts (Frankreich nahe deutscher Grenze), Urach 3 und den Kontinentalen Tiefbohrungen (KTB-VB und KTB). Diese sehr tiefen Grundwässer im kristallinen Grundgebirge sind oftmals hoch mineralisierte Thermalwässer (Stober et al. 2014), d. h. mit einem Gesamtlösungsinhalt (total dissolved solides, [TDS]) von mehreren 10 g/kg bis 100er g/kg, die an thermische Anomalien (Urach) und/oder große Graben (Bühl)- oder Störungszonen (KTB) gebunden sind (Tabelle A. 1).

Tabelle A. 1: Auswahl an Analysen des Gesamtlösungsinhalts (TDS) von tiefen Grundwässern in kristallinen Gesteinsformationen (Stober et al. 2014; Achtziger-Zupančič et al. 2017; Röckel & Stober 2017)

Bohrung / Bergwerk	Teufe	Geologische Strukturen	Kristallines Wirtsgestein	Chemische Signatur	Gesamtlösungsinhalt (TDS)
Bühl	2699 m	Grabenstruktur, Oberrheingraben	Gneis	Na-Ca-Cl-SO_4-HCO_3	**200 g/kg**
Soultez-sous-Forêts (GPK 1 und GPK 2)	3600 m und 5080 m	Grabenstruktur, Oberrheingraben	Granit	Na-Ca-Cl-SO_4-HCO_3	**100 g/kg**
Urach 3	4444 m	Geothermische Anomalie im kristallinen Grundgebirge	Gneis, Diatexit, Migmatit	Na-Ca-Cl-SO_4-HCO_3	**80 g/kg**
Vorbohrung zur Kontinentalen Tiefbohrung KTB-VB	4000 m	Störungszone, Zone Erbendorf-Vohenstrauß	Paragneis und Amphibolit	Ca-(Na)-Cl-HCO_3	**62 g/kg**
Weißenstadt	1835 m	Hydraulisch wirksame Störungszonen in Granitpluton, Fichtelgebirge	Granit	Na-(Ca)-Cl-(SO_4)	**0,3 bis 0,4 g/kg**
Schlema-Alberoda	1800 m	Gera-Jáchymov-Störungszone	Granit (Glimmerschiefer, Schiefer und Phyllite sind keine kristallinen Wirtsgesteine)	Na-Ca-Mg-Cl-SO_4	**0,3 bis 0,35 g/kg**
Freiberg	600 m	Hydrothermale Erzgänge in Freiberger Graugneisdom	Orthogneis	Na-Ca-SO_4-HCO_3-Cl	**0,01 bis 0,15 g/kg**

Diese hoch mineralisierten Thermalwässer sind fast ausnahmslos aufsteigende Na-Cl-Tiefenwässer mit hohen CO_2-Konzentrationen (Stober et al. 2014). Lediglich die tiefen Grundwässer der KTB-VB zeigen hohe Calcium-Konzentrationen, die auf die besondere Mineralogie der kristallinen Gesteine am Standort der Kontinentalen Tiefbohrungen zurückzuführen sind und durch Gesteins-Wasser-Wechselwirkung in den tiefreichenden Störungszonen mobilisiert wurden (Stober & Bucher 2005). Am Standort der KTB wurden kristalline Gesteinsabfolgen von zerscherten, verfalteten und wechselgelagerten Paragneisen mit mafischen kristallinen Gesteinen wie Metagabbros und Amphiboliten erbohrt, die hohe Modalbestände an Ca-reichem Plagioklas, Hornblende und Klinopyroxen aufweisen.

Die oben genannten Beispiele sind vermutlich nicht repräsentativ für tiefe Grundwässer in kristallinen Wirtsgesteinsformationen in endlagerrelevanten Teufen zwischen 300 m und 1500 m in Deutschland. Die bekannten tiefen Grundwässer der Tiefbohrungen Bühl, Soultez-sous-Forêts,

Urach 3 und KTB-VB sind allesamt in ähnlichen geologischen Settings zu verorten, an denen hochmineralisierte Tiefenwässer sedimentären Ursprungs (Stober & Bucher 1999) in tiefreichenden Störungszonen im kristallinen Grundgebirge und an Diskordanzen zwischen sedimentären Einheiten mit z. T. salinaren Abfolgen und liegendem verwittertem Grundgebirge zirkulieren (Boiron et al. 2010; Stober & Bucher 2015).

Es gibt noch eine weitere Gruppe von Grundwasseranalysen in kristallinen Wirtsgesteinen, die aus tiefen Bergwerken und Bohrungen abseits von sedimentären Einheiten stammen, und die insgesamt günstigere geochemische Eigenschaften für die Endlagerung aufweisen (Tabelle A. 1). Exemplarisch für diese tiefen Grundwässer in kristallinen Wirtsgesteinsformationen werden hier hydrochemische Analysedaten der Tiefbohrung Weißenstadt (Röckel & Stober 2017) im Fichtelgebirge gezeigt. Das niedrige Cl/Br-Verhältnis von ca. 80 und die erhöhten Fluorid-Konzentrationen sind Indikatoren dafür, dass die Hydrochemie dieser tiefen Grundwässer im Wesentlichen durch die Gesteins-Wasser-Wechselwirkung mit kristallinem Wirtsgestein (Fichtelgebirgsgranit) bestimmt wird (Röckel & Stober 2017; Stober & Bucher 1999). Die Abnahme des Cl/Br-Verhältnisses mit der Teufe deutet auf einen abnehmenden Einfluss von oberflächennahem Grundwasser mit zunehmender Teufe hin (Röckel & Stober 2017).

Generell kann man erwarten, dass tiefe Grundwässer in kristallinen Wirtsgesteinsformationen im endlagerrelevanten Teufenbereich zwischen 300 m und 1500 m aufgrund von Gesteins-Wasser-Wechselwirkung gewöhnlich einen pH-Wert im neutralen bis gering alkalischen Bereich zwischen 7 und 9 besitzen; vgl. Tabelle A. 2 und Stober et al. (2014). Mit zunehmender Teufe sollten grundsätzlich anoxisch-reduzierende hydrochemische Verhältnisse vorherrschen und der Gesamtlösungsinhalt von tiefen Grundwässern in kristallinen Gesteinsformationen gering (TDS = einige 100er mg/kg bis 1000er mg/kg) sein, v. a. im Vergleich zu Meerwasser (TDS rund 35 g/kg) oder sedimentären Formationswässern [sedimentary or basinal brines] (TDS größer 35 g/kg).

Der Gesamtlösungsinhalt nimmt generell mit zunehmender Teufe geringfügig zu (Stober et al. 2014). Kolloide und Komplexbildner sollten in tiefen Grundwässern in kristallinen Gesteinsformationen gewöhnlich eher in kleineren, insignifikanten Mengen auftreten, und die Konzentrationen von Karbonat-Spezies sind vermutlich in felsischen kristallinen Wirtsgesteinsformationen zu vernachlässigen (vgl. Tabelle A. 2).

Tabelle A. 2: Hydrochemische Analysedaten aus der Tiefbohrung Weißenstadt (verändert nach Röckel & Stober 2017); n.b. bedeutet nicht bestimmt

	Einheit	PPV1	PPV3	1790 m
Teufenabschnitt	m	380 – 1835	570 – 1835	1790
Temperatur	°C	21,7	22,3	n.b.
pH-Wert	–	8,18	8,35	n.b.
el. Leitf. 25 °C	µS/cm	464	501	n.b.
Sauerstoff gelöst	mg/kg	2,99	6,64	n.b.
Kationen				
Natrium	mg/kg	65,50	90,00	106,00
Kalium	mg/kg	0,81	0,87	1,95
Calcium	mg/kg	20,00	24,00	32,10
Magnesium	mg/kg	0,25	0,25	0,25
Lithium	mg/kg	0,11	0,19	0,21
Ammonium	mg/kg	n.b.	n.b.	n.b.
Strontium	mg/kg	0,10	0,19	0,36
Eisen	mg/kg	0,20	0,15	0,94
Mangan	mg/kg	0,05	0,01	0,04
Anionen				
Chlorid	mg/kg	52,50	100,00	127,00
Hydrogenkarbonat	mg/kg	92,70	55,40	61,00
Sulfat	mg/kg	22,70	50,40	60,00
Bromid	mg/kg	0,53	1,21	n.b.
Jodid	mg/kg	0,008	0,011	n.b.
Fluorid	mg/kg	6,54	7,79	n.b.
Hydrogenphosphat	mg/kg	0,03	0,10	n.b.
Spurenelement				
Arsen	mg/kg	0,01	0,01	0,01
Blei	mg/kg	n.b.	n.b.	–
Barium	mg/kg	0,003	0,003	0,015
Aluminium	mg/kg	0,04	0,04	0,59
SiO_2	mg/kg	35,55	30,16	n.b.
TDS	**mg/kg**	**297,59**	**360,77**	**390,47**
Cl/Br	**mg/mg**	**99,06**	**82,64**	**n.b.**

Insgesamt kann man deshalb von günstigen hydrochemischen Randbedingungen in kristallinen Wirtsgesteinen ausgehen. Im Referenzdatensatz für kristalline Wirtsgesteine (BGE 2020b) wurden deshalb zum Zwischenbericht Teilgebiete vier der fünf aufgeführten Indikatoren von Anlage 10 (zu § 24 Abs. 5) StandAG (pH-Bedingungen, Redoxmilieu, Kolloide/Komplexbildner, Karbonatkonzentration) als „günstig“ bewertet.

Anhang 2.3 Kristallines Wirtsgestein mit einschlusswirksamem Gebirgsbereich (Endlagersystem Typ 1)

Anhang 2.3.1 Einschlusswirksamer Gebirgsbereich als wesentliche Barriere

In einem Endlagersystem Typ 1 beruht der sichere Einschluss der radioaktiven Abfälle im Bewertungszeitraum auf einem oder mehreren einschlusswirksamen Gebirgsbereichen in Zusammenwirken mit den geotechnischen und technischen Barrieren des Endlagersystems (§ 4 Abs. 3 EndlSi-AnfV). Ein einschlusswirksamer Gebirgsbereich wird gemäß § 2 Nr. 9 StandAG definiert als „*der Teil eines Gebirges, der bei Endlagersystemen, die wesentlich auf geologischen Barrieren beruhen, im Zusammenwirken mit den technischen und geotechnischen Verschlüssen den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle in einem Endlager gewährleistet*“. Die Anforderungen an die Beschaffenheit eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs sind in den Kriterien (Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen und geowissenschaftliche Abwägungskriterien) des StandAG definiert (vgl. §§ 22 bis 24 StandAG). Die bestimmende Mindestanforderung an das kristalline Wirtsgestein, die maßgeblich zur Entscheidung beiträgt, ob ein einschlusswirksamer Gebirgsbereich ausweisbar ist, ist die Gebirgsdurchlässigkeit (§ 23 Abs. 5 StandAG).

Etwa 60 % der Datenwerte zur Gebirgsdurchlässigkeit (Abbildung A. 8) aus Achtziger-Zupančič et al. (2017) zeigen eine Gebirgsdurchlässigkeit kleiner 10^{-10} m/s. Diese Datenkompilation wurde aus hydrogeologischen Messdaten und Beschreibungen zu ehemaligen erzgebirgischen Bergwerken gewonnen. Die Gebirgsdurchlässigkeits-Werte repräsentieren komplette Bergwerks-Sohlen, Stollenabschnitte oder 100 m mächtige Gebirgsabschnitte in den kristallinen Gesteinen. Die Mehrheit der hydraulischen Datenwerte aus Teufen größer 600 m stammt jedoch aus zwei Bergwerken, Pöhla-Tellerhäuser (U-Sn-Zn-In) und Schlema-Alberoda (U). Die Nebengesteine dieser Bergwerke sind zudem nicht nur kristalline Wirtsgesteine wie Granite, sondern v. a. auch Glimmerschiefer, Skarne und Hornfelse. Die hydrogeologischen Daten zeigen somit ein deutliches statistisches Bias und charakterisieren die hydrogeologischen Randbedingungen in einer bedeutenden Störungszone des Erzgebirges, der Gera-Jáchymov-Zone. Dennoch zeigt die Datenkompilation von Achtziger-Zupančič et al. (2017), dass in einer Mehrheit der repräsentierten kristallinen Gebirgskörper die Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit (§ 23 Abs. 5 StandAG) erfüllt werden könnte.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

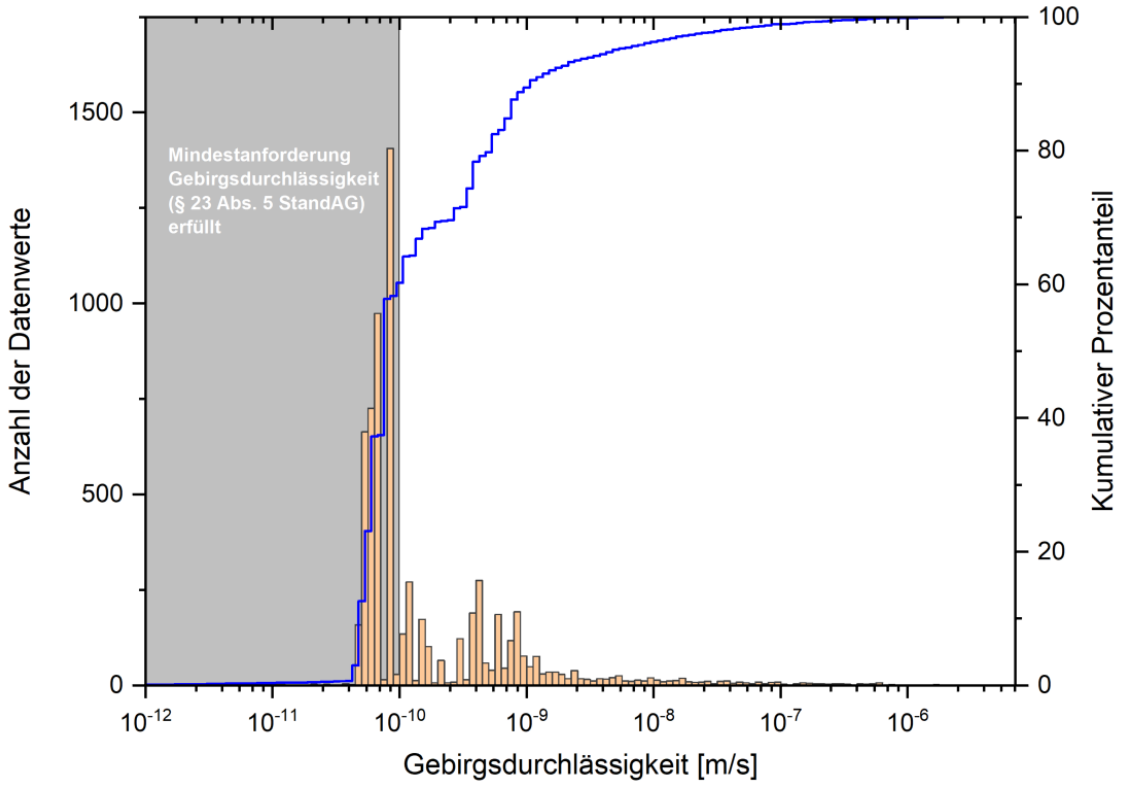


Abbildung A. 8: Histogramm der Gebirgsdurchlässigkeit in kristallinen Gesteinsformationen des Erzgebirges [log Skalierung der x-Achse].
Kumulativer Prozentanteil der Gebirgsdurchlässigkeit dargestellt als blaue Kurve; Daten stammen aus Achtziger-Zupančič et al. (2017).

Anhang 2.4 Kristallines Wirtsgestein ohne einschlusswirksamen Gebirgsbereich (Endlagersystem Typ 2)

Der Einschluss und die Rückhaltung der radioaktiven Abfälle im Einlagerungsort wird in diesem Konzept insbesondere durch die technischen und geotechnischen Barrieren übernommen. Dabei werden entsprechend hohe Anforderungen an die Integrität dieser Barrieren gestellt. Ausschlaggebend hierfür sind insbesondere die in den nachfolgenden Kapiteln aufgeführten Prozesse und Anforderungen.

Anhang 2.4.1 Langzeitintegrität des Endlagerbehälters

Anhang 2.4.1.1 Einwirkungen durch Korrosion

Die Langzeitintegrität des Endlagerbehälters und damit der sichere Einschluss der radioaktiven Abfälle wird hauptsächlich durch die ablaufenden Korrosionsprozesse nach der Einlagerung über den Bewertungszeitraum bestimmt. Diese Prozesse wiederum sind insbesondere von der Wahl des Werkstoffs in Verbindung mit der Zusammensetzung der Wässer im Endlagerbereich und der Schutzwirkung der geotechnischen Barrieren abhängig. Da derzeit in Deutschland noch kein Endlagerbehälterkonzept für kristallines Wirtsgestein vorliegt, die BGE aber die Arbeiten auf diesem Gebiet erst vor kurzem aufgenommen hat und somit eine Werkstoffwahl noch nicht getroffen wurde,

kann auf diese Thematik nur allgemein eingegangen werden. Eine Detailbetrachtung der spezifischen Prozesse kann und wird erst zu einem späteren Zeitpunkt erfolgen, wenn erste Festlegungen (z. B. Wahl des Behälterwerkstoffes) getroffen wurden. Nach derzeitigem Kenntnisstand sind vor allem metallische Werkstoffe als Endlagerbehältermaterial geeignet (King 2017; Padovani et al. 2017). Teilweise wird auch über die Verwendung von Keramiken nachgedacht – ausgereifte Konzepte hierzu gibt es aber derzeit noch nicht (King 2017). Diese beiden Werkstoffarten stehen wegen ihrer guten Korrosionsbeständigkeit im Fokus, da dies für den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle auf Basis der technischen und geotechnischen Barrieren essentiell ist.

Die Arbeiten der BGE im Bezug zum Thema Endlagerbehälter werden sich an dem jeweiligen Wissensstand orientieren, und dieser wird in die Ausarbeitungen mit einbezogen. Je nachdem, ob nun ein Metall oder eine Keramik als Behältermaterial verwendet wird, unterscheiden sich die Veränderungsprozesse des Behälterwerkstoffs. Keramiken werden bei den zu erwartenden chemischen Zusammensetzungen der Wässer im Endlagerbereich mit einer geringen Rate in Lösung gehen. Im Gegensatz dazu werden Metalle korrodieren, wobei die Korrosionsart und -rate, d. h. welche Korrosionsprozesse und wie viel Materialabtrag stattfinden wird, sehr stark von der Wahl des Werkstoffes und der chemischen Zusammensetzung der Wässer abhängen.

Weiterhin ist auch die Entwicklung der chemischen Randbedingungen beziehungsweise Zusammensetzung der Wässer im Endlager über den Bewertungszeitraum von besonderer Bedeutung. Durch das Auffahren der Hohlräume, die Bewetterung während des Endlagerbetriebs und durch die Einlagerung der radioaktiven Abfälle wird sich die chemische Zusammensetzung der Wässer ändern, da diese wieder in Kontakt mit Luft und damit Sauerstoff stehen. Bis zum Verschluss des Einlagerungsbereichs und während der Übergangsphase wird die Korrosion durch Sauerstoff der relevante Korrosionsprozess sein. Darauf folgend und damit über den Bewertungszeitraum hinaus wird sich der anaerobe Zustand von vor der Einlagerung einstellen. Zudem können ablaufende Prozesse (z. B. Vergletscherung und anschließendes Abschmelzen des Gletschers) die Zusammensetzung verändern. SKB und Posiva, die für die Endlagerung der hochradioaktiven Stoffe verantwortlichen Institutionen in Schweden und Finnland, haben hier bereits entsprechende Abschätzungen für die ersten 10.000 Jahre nach dem Verschluss des jeweils eigenen Endlagers getroffen (King et al. 2012). Die Entwicklung der chemischen Zusammensetzung der Grundwässer in dem Zeitraum nach diesen 10.000 Jahren ist dabei maßgeblich durch die Prognose der Klimaentwicklung bestimmt. In Deutschland sind entsprechende Betrachtungen durchzuführen und eigene Szenarien zu erarbeiten, da es regionale Unterschiede im Vergleich zu diesen Ländern gibt, insbesondere je nach Standort in Deutschland (z. B.: Nord- oder Süddeutschland).

Anhang 2.4.1.2 Schutzwirkung durch geotechnische und geologische Barrieren

Die Langzeitintegrität des Behälters ergibt sich weiterhin über das Zusammenspiel mit den geotechnischen Barrieren, insbesondere durch das den Behälter umgebende Buffermaterial. Diesen geotechnischen Barrieren werden eigene Aufgaben bzw. Anforderungen zugesprochen (vgl. auch Kapitel 4.1.3.3), um den Behälter bestmöglich vor Einwirkungen und Prozessen (z. B. höhere Belas-

tungen durch eine Gletscherauflast oder mikrobielle Korrosion) zu schützen und somit seine Langzeitintegrität bestmöglich gewährleisten zu können. Die vorhandene Wassermenge um den Behälter herum soll reduziert werden, um ablaufende Korrosionsprozesse zu verzögern bzw. zu minimieren. Dies soll erreicht werden, indem der Buffer eine geringe Durchlässigkeit aufweist, sodass der Lösungstransport nur durch Diffusion stattfinden kann. Gleichzeitig soll das Anströmen des Wassers, also der advektive Stofftransport, an den Behälter durch den Buffer verhindert werden, sodass anhaftende Korrosionsprodukte, die eine Schutzwirkung der Behälteroberfläche aufweisen können, nicht fortgespült werden. Weiterhin dient der Buffer der Einstellung eines gewollten und konstanten geochemischen Milieus um den Behälter herum, das zur Langzeitintegrität der Behälter beitragen soll. Dadurch wird es möglich sein das Verhalten des Endlagerbehälters bei den gegebenen Randbedingungen über lange Zeiträume prognostizieren zu können. Inwiefern diese Anforderungen eingehalten werden können, ist stark abhängig von den späteren geologischen Gegebenheiten vor Ort, insbesondere dem Kluftsystem und potenziellen Wasserangebot am Standort selbst.

Durch die begrenzte Datenlage zum derzeitigen Zeitpunkt im Standortauswahlverfahren lassen sich noch keine genauen Aussagen treffen und es kann nur davon ausgegangen werden, dass man mit den entsprechenden technischen Planungen des Endlagers diese Zielvorstellungen erreichen wird. Die entsprechenden Verschluss- und Abdichtbauwerke müssen so platziert werden, dass (potenzielle) Zutrittswege von Lösungen abgedichtet werden, sodass der Zutritt von Wasser in das Endlager minimiert wird. Die Anzahl dieser Barrieren kann zum jetzigen Zeitpunkt allerdings nicht abgeschätzt werden. Unter Umständen werden viele dieser Barrieren notwendig sein, für die dann entsprechende Nachweise ihrer Funktionsfähigkeit zu führen sind.

Neben der Korrosion der Behälter im kristallinen Wirtsgestein ist insbesondere die mechanische Belastung auf den Endlagerbehälter ein entscheidender Faktor für die Langzeitintegrität. Bei der konstruktiven Auslegung müssen statische – und, sofern auftretend, dynamische – Zug- und Druckbelastungen und Scherbeanspruchungen auf den Endlagerbehälter im Einlagerungsbereich berücksichtigt werden. Die Größenordnung der Zug- bzw. Druckspannungen hängt insbesondere von der Teufe und dem Wirtsgestein ab. Scherbeanspruchungen werden maßgeblich durch ein ungleichmäßiges Quellverhalten des Buffermaterials (in Tongestein oder kristallinem Wirtsgestein) oder Bewegungen entlang von Klüften bzw. Scherzonen entstehen. Klüfte bzw. Scherzonen treten insbesondere im kristallinen Wirtsgestein auf (s. Anhang 2.2.2) und sind dementsprechend in der Endlagerauslegung zu berücksichtigen. Möglicherweise sollten Bereiche mit vielen oder großen Klüften bzw. Scherzonen aus Gründen der besseren Prognostizierbarkeit der Langzeitsicherheit gemieden werden. Kriterien hierfür sind allerdings noch zu erarbeiten und weiter zu untersuchen.

Seitens SKB und Posiva wurden Sicherheitsfunktionen für ein Endlagersystem im Kristallin formuliert (Posiva Oy & SKB 2017), die auch die oben benannten Aspekte zu großen Teilen beinhalten. Die Übertragbarkeit dieser, bzw. grundlegender, Gedanken auf ein deutsches Konzept ist bei den kommenden Arbeiten zu überprüfen.

Anhang 2.4.1.3 Fertigungs- und Prüfverfahren

Die Endlagerbehälter sind in der späteren Produktion und bei dem Verschluss durch geeignete Prüfprozesse und -abläufe so zu überwachen, dass die Eigenschaften zur Erfüllung der Anforderungen zum sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle gewährleistet und eingehalten werden. Insbesondere der Verschluss des Behälters, d. h. nach der Befüllung mit radioaktiven Abfällen, wird der entscheidende Prozess sein, da auf diesem eine hohe Anforderung hinsichtlich der Behälterintegrität liegt. Dieser Prozess muss daher bestmöglich überwacht und das Ergebnis überprüft werden. Die besondere Herausforderung ergibt sich hierbei dadurch, dass die Prüfung nur von außen durchgeführt werden kann. Vor der Befüllung mit radioaktiven Abfällen ist eine Prüfung von sowohl innen als auch außen möglich, was die Detektion von Mängeln im Vergleich besser ermöglicht.

Durch das in Deutschland vorhandene Abfallinventar (vgl. Kapitel 2) wird es eine hohe Stückzahl an Endlagerbehältern (mehrere Tausend) geben, die alle dem gleichen Standard entsprechen müssen. Statistisch gesehen wird es dazu kommen, dass einige Verschlüsse nicht den gesetzten Anforderungen entsprechen werden. Hierbei sind dann insbesondere an die Prüfeinrichtungen hohe Anforderungen hinsichtlich der Detektion von Fehlern im Prozess zu stellen, sodass die nicht den Anforderungen entsprechenden Behälter identifiziert werden. Ob diese Behälter dann durch Maßnahmen zur Endlagerung qualifiziert werden können oder ob diese wieder geöffnet und die Abfälle in neue Behälter verpackt werden müssen, hängt von den später zu definierenden Kriterien an die Qualität des Verschlusses ab.Es ist dabei zu betonen, dass im Falle des einschlusswirksamen Gebirgsbereichskonzeptes ebenfalls hohe Anforderungen an den Verschluss des Behälters gelegt werden. Dieser muss ebenfalls dicht sein und über einen bestimmten Zeitraum seine Integrität beibehalten (BGE 2021b). In diesem Fall kann der Zeitraum allerdings deutlich kürzer ausfallen als bei dem technischen und geotechnischen Konzept. Das Schadensausmaß eines defekten Behälters ist vernachlässigbar, da der einschlusswirksame Gebirgsbereich langfristig die Hauptfunktion des sicheren Einschlusses übernimmt.

Anhang 2.4.2 Nachweis der Behälterintegrität über den Bewertungszeitraum

Derzeit ist noch unklar, wie der Nachweis der Behälterintegrität konkret über den Bewertungszeitraum durchgeführt werden kann. In der Technik bewährt hat sich die Durchführung von Versuchen über den – sofern möglich – gesamten vorgesehenen Produktlebenszyklus oder die Durchführung von Versuchen, die durch entsprechende Prüfparameter mehrere Jahre oder Jahrzehnte in kürzerer Versuchszeit abdecken. Da der Bewertungszeitraum laut § 1 Abs. 2 StandAG allerdings eine Million Jahre beträgt, werden diese Optionen nicht für den Nachweis über den gesamten Zeitraum in Frage kommen. Sehr wahrscheinlich ist die Betrachtung von geologischen oder ähnlichen Analogieprozessen und der Extrapolation des Verhaltens eines vergleichbar kurzen Zeitraums. Genannt sei hier insbesondere die Korrosionsrate, die über einen kurzen Zeitraum (Wochen, Monate bzw. wenige Jahre) ermittelt werden kann. Anschließend wird diese Korrosionsrate über den Bewertungszeitraum extrapoliert und damit der Materialabtrag an dem Endlagerbehälter abgeschätzt. Durch den Ver-

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

gleich zwischen Materialabtrag, inklusive Betrachtung und Bewertung weiterer ablaufender Korrosionsprozessen, und Wandstärke des Behälters kann überprüft werden, ob dieser bis zum Ende des Bewertungszeitraums seine Integrität beibehalten wird.

In Schweden und Finnland wird der Nachweis wie in dem vorherigen Absatz beschrieben für einen regulatorisch vorgeschriebenen Zeitraum von 100 000 Jahren durchgeführt. Die Untersuchungen legen aber nahe, dass der Behälter über einen deutlich längeren Zeitraum seine Integrität beibehalten wird, zu konkreten möglichen Zeiträumen werden aber keine Aussagen getroffen (Raiko 2005; King et al. 2012).

Anhang 2.4.3 Annahmen für das Endlagersystem Typ 2

Wie in Anhang 2.1 aufgeführt gibt es seitens der Verordnung für die rvSU die Annahme, bei der davon ausgegangen werden kann, dass die technischen und geotechnischen Barrieren ihre Funktion grundsätzlich erfüllen, sofern dies nicht durch den aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik ausgeschlossen erscheint (§ 7 Abs. 6 Nr. 2 EndlSiUntV). Es soll in Schritt 2 der Phase I des Standortauswahlverfahrens eine fachliche Begründung erfolgen, warum die jeweilige Annahme aus Sicht der BGE nach dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik nicht ausgeschlossen erscheint. Dies wird erst bei zukünftigen Arbeiten erfolgen.

Anhang 3 Numerisches Radionuklid-Transportmodell TransPyREnd: Theoretischer Hintergrund und numerische Implementierung

Anhang 3.1 Einleitung

Dieses Dokument umreißt den theoretischen Hintergrund und die numerische Implementierung eines neuen Modellcodes für den Transport von Radionukliden oder anderen Spezies im Untergrund. Der Modellcode trägt den Namen TransPyREnd, eine Abkürzung für „Transportmodell in Python für Radionuklide aus einem Endlager“. Der Modellcode wird zur Abschätzung des Radionuklidtransports im Untergrund im Rahmen der rvSU verwendet, die derzeit als Teil von Phase I, Schritt 2 des Standortauswahlverfahrens in Deutschland durchgeführt werden (vgl. § 14 StandAG). Sobald die Dokumentation und die Tests vollständig abgeschlossen sind, wird der Code in einem öffentlich zugänglichen Software-Repository veröffentlicht.

Die Motivation für die Entwicklung von TransPyREnd war der Wunsch zur Nutzung eines Open-Source-Codes, was in Hinblick auf einen transparenten Arbeitsablauf bei Sicherheitsuntersuchungen von Vorteil ist. Darüber hinaus besteht in der aktuellen, verhältnismäßig frühen Phase (Phase I, Schritt 2) des Standortauswahlverfahrens in Deutschland Bedarf an einem relativ einfachen und schnellen Code. Der hier vorgestellte Code simuliert den Transport nur eindimensional, ist rein kommandozeilen-orientiert und kommt ohne grafische Oberfläche aus, was die Komplexität reduziert. Das bedeutet auch, dass der Code insbesondere für die Durchführung einer großen Anzahl an Modellläufen verwendet werden kann. Dies ist einerseits hilfreich für die Bewertung einer großen Anzahl möglicher Endlagerstandorte und andererseits für die Bewertung der Auswirkungen von Modellparameter-Ungewissheiten sowie der Ungewissheiten in den geologischen Entwicklungen während der Lebensdauer eines Endlagers.

Der Code wurde in der Programmiersprache Python geschrieben, was eine modulare, objektorientierte Struktur ermöglicht und es zulässt, von der großen Anzahl an Codebibliotheken zu profitieren, die für Python für die Ein- und Ausgabe, numerische Verfahren, Visualisierung, Parallelisierung und Statistiken verfügbar sind.

In diesem Dokument werden zunächst die Gleichungen beschrieben, die die wichtigsten Transportmechanismen von Radionukliden im Untergrund darstellen: Diffusion, Advektion, Sorption und radioaktiver Zerfall (s. Anhang 3.2). Die Strategie, die zur Lösung des Differentialgleichungssystems für den Transport von Radionukliden verwendet wird, ist in Anhang 3.3 zusammengefasst. Ein Beispiel eines Modelllaufs wird in Anhang 3.4 gezeigt. Der Modellcode wurde auch mit vergleichbaren Modellierungsergebnissen eines generischen Endlagers (Navarro et al. 2019) verglichen (s. Anhang 3.5).

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

Anhang 3.2 Mathematische Darstellung von Transportprozessen

Der Transport von Radionukliden im Untergrund kann durch die folgende Gleichung beschrieben werden:

$$\phi R_i \frac{\partial c_i}{\partial t} = -\frac{\partial j_i}{\partial x} - q\frac{\partial c_i}{\partial x} + W \tag{8}$$

Dabei ist W der Quell-/Senkterm:

$$W = \sum_j R_i\, c_j \lambda_j^z + \sum_z R_i\, c_i \lambda_i^z \tag{9}$$

Weiterhin ist ϕ die Porosität (dimensionslos), R_i der Retardationsfaktor des Nuklids i (dimensionslos), c_i die Konzentration des Nuklids i im Porenfluid ($mol\ m^{-3}$), t die Zeit (s), j_i die diffusive Transportrate des Radionuklids i und q die advektive Transportrate ($m\ s^{-1}$). Der Quell-/Senkterm entspricht der Entstehung von Nuklid i aus den Zerfällen anderer Spezies j und dem Verlust von Nuklid i durch Zerfall via Zerfallsweg z. λ_i^z ist die Zerfallskonstante (s^{-1}) für den Zerfall von Spezies i via Zerfallsweg z. j_i, der diffusive Fluss von Radionuklid i ($mol\ m^{-2}\ s^{-1}$), ist wie folgt definiert:

$$j_i = -D_{e,i}\frac{\partial c_i}{\partial x} \tag{10}$$

wobei $D_{e,i}$ der effektive Diffusionskoeffizient des Nuklids i ($m^2\ s^{-1}$) ist. Die Kombination der beiden Gleichungen ergibt:

$$\phi R_i \frac{\partial c_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(D_{e,i}\frac{\partial c_i}{\partial x}\right) - q\frac{\partial c_i}{\partial x} + W \tag{11}$$

Diese Gleichung stellt die physikalischen Prozesse Diffusion und Advektion sowie den Zerfall von Radionukliden dar. Die linke Seite der Gleichung sowie die Terme für Diffusion und Advektion folgen der Standardformulierung für den Transport gelöster Stoffe (Diersch & Kolditz 2002; Ingebritsen et al. 2006). Die Gleichung in Gänze, einschließlich der Zerfallsterme, ähnelt den mathematischen Formulierungen in anderen Modellcodes, die häufig zur Simulation des Transports radioaktiver Stoffe verwendet werden, wie beispielsweise TOUGH2 (Oldenburg & Pruess 1995) und PFLOTRAN (Hammond et al. 2012).

Die Sorption von Nukliden an die Gesteinsmatrix wird durch den Retardationsfaktor R_i beschrieben, der definiert ist als (Ingebritsen et al. 2006; Clauser 2003; Kinzelbach 1987):

$$R_i = 1 + \frac{K_{d,i}\rho}{\phi} \tag{12}$$

wobei $K_{d,i}$ der Sorptionskoeffizient ($m^3\ kg^{-1}$) und ρ die Gesteinsdichte ($kg\ m^{-3}$) ist. Wenn Gleichung *(11)* durch R_i dividiert wird, kann gut nachvollzogen werden, dass der effektive Transport tatsächlich um den Faktor $1/R_i$ verlangsamt wird.

Anhang 3.3 Numerische Implementierung

Der Modellcode enthält zwei verschiedene numerische Implementierungen der Transportgleichung (Gleichung (*11)*), wobei eine implizite und eine explizite Methode verwendet wird. Um die Modellergebnisse vergleichen zu können, Fehler in der numerischen Implementierung zu vermeiden und die Genauigkeit des Modellcodes zu beurteilen, wurden die beiden Implementierungen nebeneinander entwickelt. Beide Löser setzen auf die Python-Bibliothek scipy (Virtanen et al. 2020) auf. Es wird angestrebt, die Details der Diskretisierung und der numerischen Implementierung in einer getrennten Veröffentlichung in einer wissenschaftlichen Fachzeitschrift zu beschreiben. Dazu werden umfangreiche Tests und Benchmarks durchgeführt. Hier wird im Folgenden nur ein Beispiel für die Anwendung des Modells gegeben.

Anhang 3.4 Beispielhafter Modelllauf

Der neue Modellcode wurde verwendet, um den Nuklidtransport im Bereich eines hypothetischen Endlagers über einen Zeitraum von einer Million Jahren zu simulieren. Das Modell stellt ein Gebiet in Süddeutschland mit einem hypothetischen Endlager in einer jurassischen Tonformation in 587 m Tiefe unter der Geländeoberkante dar.

Das Radionuklidinventar entspricht einer vereinfachten Version des Inventars hochradioaktiver Abfälle in Deutschland, das die 47 wichtigsten Nuklide enthält (Larue et al. 2013). Insgesamt umfasst das Inventar etwa 10 000 000 kg nuklearen Abfalls. Im Modell wird angenommen, dass das Inventar bei t=0 instantan und vollständig im Porenraum des Endlagers freigesetzt wird, wobei das Endlager als einzelne Zelle im Modell dargestellt wird. Daran anschließend werden die Radionuklide im Untergrund durch Advektion und Diffusion transportiert, wobei der Transport einerseits von der Sorption von Nukliden an der Gesteinsmatrix um das Endlager, und andererseits vom Zerfall von Radionukliden beeinflusst wird.

Das Modellgebiet basiert auf einem geologischen Profil in Süddeutschland und besteht aus einer 1016 m mächtigen Abfolge mesozoischer Sedimente, die ältere, paläozoische Gesteine überlagern. Die mesozoische Abfolge wiederum wird von einer dünnen, känozoischen und quartären Deckschicht mit einer Mächtigkeit von 18 m überdeckt. Die Modellparameter, wie z. B. der effektive Diffusionskoeffizient (D_e) und der Sorptionskoeffizient (K_d), basieren auf Werten vergleichbar derer in der Schweiz, die dort von der für die Endlagerung radioaktiver Abfälle zuständigen Organisation Nagra veröffentlicht wurden (Van Loon 2014; Baeyens et al. 2014).

Die modellierte Verteilung der Radionuklide nach einer Million Jahren ist in Abbildung A. 9 dargestellt. Für die meisten Nuklide führt der angenommene Sorptionskoeffizient zu hohen Retardationsfaktoren im das Endlager umgebenden Tongestein, was dazu führt, dass diese Nuklide in der Nähe des Endlagers verbleiben. Vor allem die drei Nuklide ^{36}Chlor, ^{79}Selen und ^{129}Iod weisen jedoch einen geringen Sorptionskoeffizienten auf und werden aus der Tonschicht in benachbarte geologische Einheiten transportiert.

Aufgrund des eindimensionalen Verfahrens ist die Anzahl der zu lösenden Unbekannten relativ gering. Die räumliche Diskretisierungslänge für das hier vorgestellte Modell beträgt 2 m, damit ergibt

sich eine Zahl von knapp 25 000 Unbekannten bzw. Gleichungen. Die zeitliche Diskretisierung hängt in diesem Fall von der Zerfallsrate des am schnellsten zerfallenden Nuklids in jeder Nuklidkette ab und variiert von 14 bis 50 000 Jahren. Das Modell wurde mit dem Python-Modul Pathos (https://pypi.org/project/pathos/) parallelisiert, wobei die Modellläufe für die verschiedenen Nuklidketten auf insgesamt 8 Prozessoren aufgeteilt wurden. Dadurch dauert ein gesamter Modelllauf, wie hier mit der impliziten Methode gezeigt, auf einem potenten Desktop-Rechner wenige Minuten. Es ist zu erwarten, dass eine weitere Optimierung des Modellcodes und insbesondere die Nutzung von Hochleistungsrechenstrukturen die Durchführung einer großen Anzahl an Modellläufen ermöglichen werden, um die Parameterungewissheit und die geologische Variabilität des Radionuklidtransports zu untersuchen.

Es ist anzumerken, dass das hier gezeigte Beispiel nur zur Veranschaulichung der Modellergebnisse dient. Insbesondere im Vergleich mit einschlägigen Rechnungen der Nagra ist zu berücksichtigen, dass die Annahme instantaner Freisetzung zu einer massiven Überschätzung des Radionuklidaustrags führt. Eine realistischere Parametrisierung der Freisetzung ist daher anzustreben, um den Radionuklidaustrag besser zu quantifizieren.

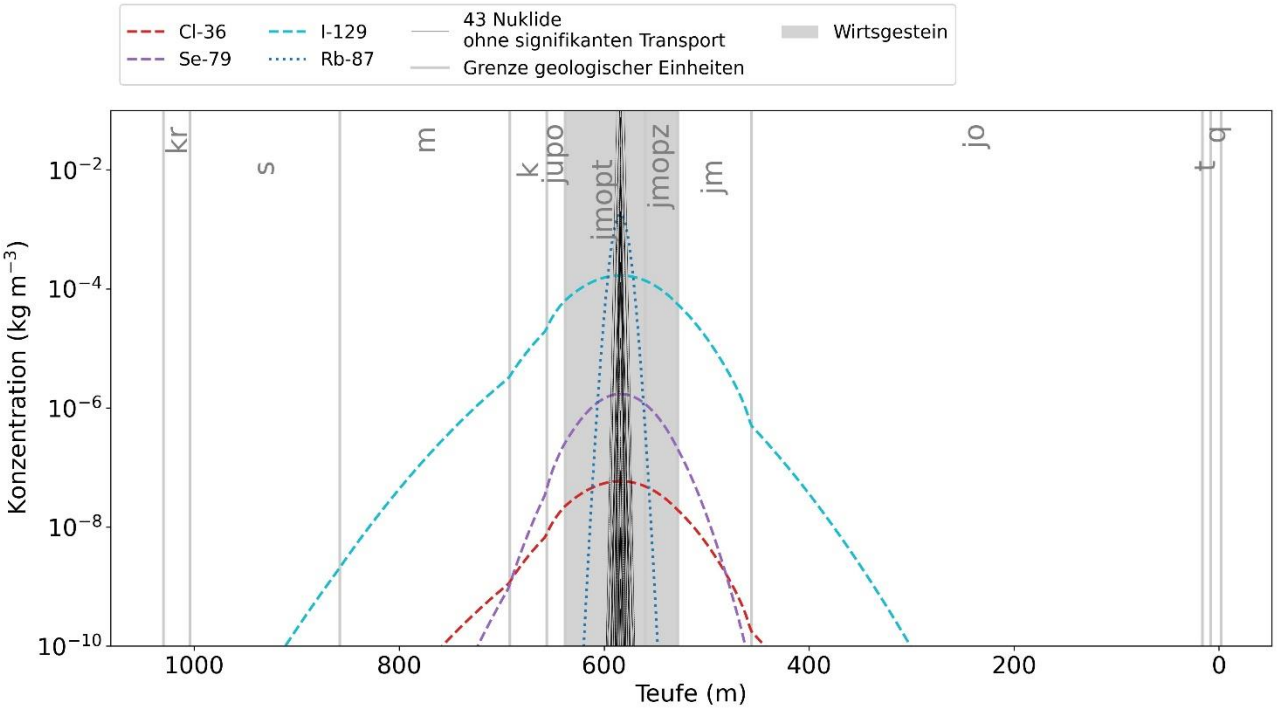


Abbildung A. 9: Beispielhafte Modellergebnisse, die die Verteilung von Nukliden um ein Endlager nach einer Million Jahren zeigen.
Die meisten Nuklide bleiben aufgrund von Sorption in der Tongesteinsformation in der Nähe der Freisetzungsstelle. Die drei Nuklide mit relativ niedrigen Sorptionskoeffizienten, 36Cl, 79Se und 129I, werden jedoch deutlich stärker aus dem Endlager und der zugehörigen Tongesteinsformation transportiert.

Anhang 3.5 Vergleich mit veröffentlichten Modellergebnissen

Im Zuge der gegenwärtig laufenden Arbeiten zur Validierung des neuen Modellcodes TransPyRend wurden bereits erste Prüfungen und Vergleiche mit analytischen Lösungen durchgeführt. Der hier vorgestellte Code wurde auch mit drei veröffentlichten Modellläufen von Navarro et al. (2019) verglichen. Diese simulieren den Radionuklidtransport in einem generischen System, das aus einem von einer homogenen Tonformation umgebenem Endlager besteht und die Prozesse Diffusion, Advektion, Sorption sowie den Zerfall von Radionukliden umfasst. Die drei Fälle verwenden Transportparameter, die zu unterschiedlichen Transportraten des Radionuklidtransports führen. Die Parameterwerte basieren auf Werten für günstige, bedingt günstige und weniger günstige Eigenschaften entsprechend des StandAG. Die Ergebnisse von Navarro et al. (2019) sind in die EndlSiUntV und EndlSiAnfV eingeflossen, die wesentlich die Durchführung von vSU im Standortauswahlverfahren regelt. Weitere Informationen sind Navarro et al. (2019) zu entnehmen.

Die Modellläufe wurden mit den exakt gleichen Parametersätzen und den gleichen Annahmen, wie z. B. einer sofortigen Freisetzung aller Radionuklide an einem einzigen Punkt im Raum, reproduziert. Der modellierte Massenfluss im System wird von drei Nukliden dominiert, die nicht vom Tongestein absorbiert werden (^{36}Cl, ^{79}Se und ^{129}I). Der modellierte Massenfluss der Nuklide über die Zeit zeigt ein hohes Maß an Übereinstimmung zwischen den Modellergebnissen von Navarro et al. (2019) und den Modellergebnissen von TransPyREnd (Abbildung A. 10). Es gibt geringe Abweichungen bei Laufzeiten von weniger als 200.000 Jahren, die wahrscheinlich auf die Unterschiede in der numerischen Implementierung oder Diskretisierung zurückzuführen sind. Längere Laufzeiten lassen jedoch keine Abweichungen erkennen, und beide Modelle zeigen nach einer Million Jahren den gleichen Nuklidfluss. Ein Vergleich von drei verschiedenen Modellläufen bestätigt die Übereinstimmung zwischen den Modellansätzen bei langen Laufzeiten (Abbildung A. 11). Der relative Materialfluss, d. h. der Nuklidfluss geteilt durch das initiale Radionuklidinventar, konvergiert bei beiden Modellläufen für einen weiten Bereich von Parametern. Es sei darauf hingewiesen, dass aus Gründen der Vergleichbarkeit alle verfügbaren Parameter aus Navarro et al. (2019) übernommen wurden, einschließlich des Nuklidinventars, obwohl einige dieser Parameter ggf. nicht dem aktuellen Stand des Standortauswahlverfahrens entsprechen. Weitere Verifizierungen des Codes anhand von analytischen und semi-analytischen Rechnungen sowie ein Benchmarking mit anderen numerischen Lösungen befindet sich aktuell in Arbeit.

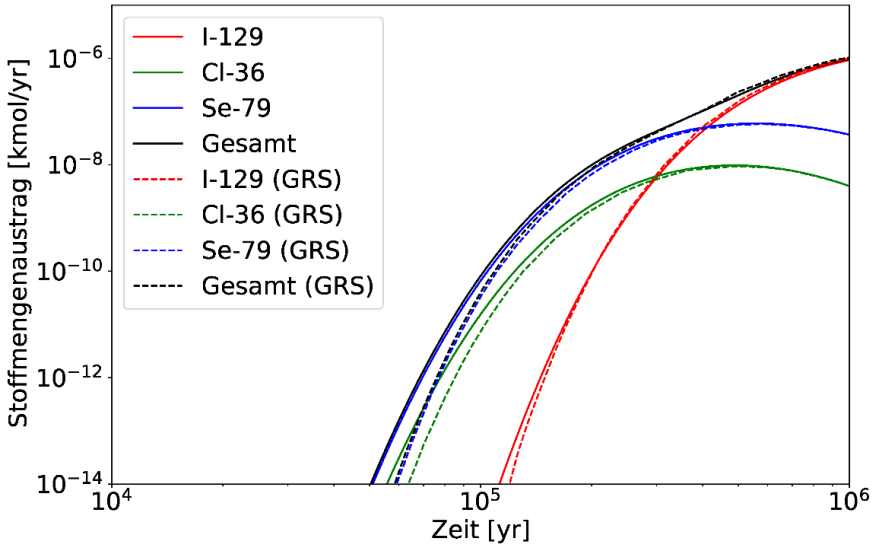


Abbildung A. 10: Vergleich der Transportraten von Radionukliden.
Dargestellt ist die Gesamttransportrate sowie die Transportrate von drei Einzelnukliden in einem generischen Tongestein als Funktion der Zeit unter Verwendung des in diesem Dokument vorgestellten neuen Modellcodes. Diesen gegenübergestellt werden die von Navarro et al. (2019) veröffentlichten Modellergebnisse. Die Ergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung zwischen den beiden Modellansätzen bei Laufzeiten von mehr als 200 000 Jahren.

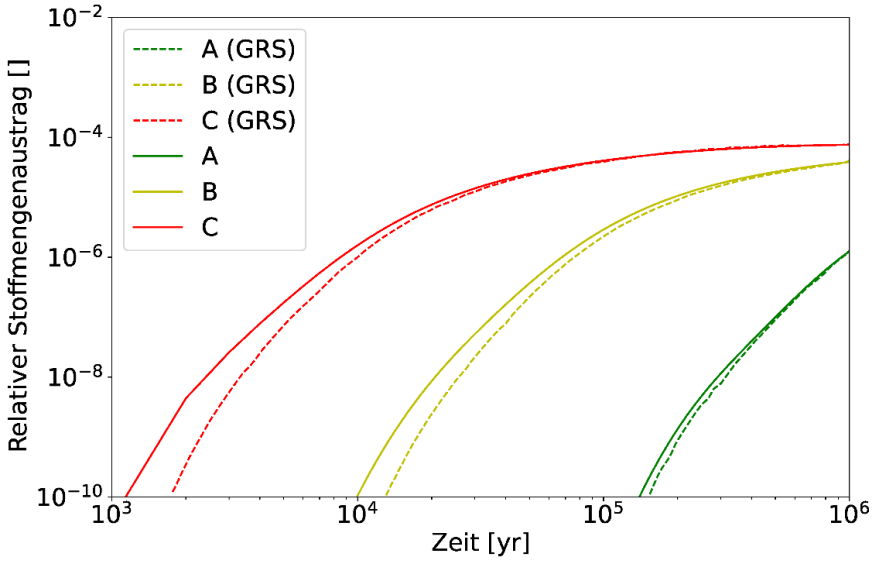


Abbildung A. 11: Vergleich des kumulativen Radionuklidverlusts.
Dargestellt ist die aus der vorgesehenen Wirtsgesteinsschicht transportierte Gesamtmenge an Radionukliden als Funktion der Zeit für drei Modellläufe unter Verwendung des in diesem Dokument vorgestellten neuen Modellcodes. Gegenübergestellt werden die von Navarro et al. (2019) veröffentlichten Modellergebnisse. Die Ergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung zwischen den beiden Modellansätzen bei Laufzeiten von mehr als 200 000 Jahren für eine Reihe von Parametern, die Bedingungen und Parameterwerte darstellen, welche für die Aufnahme eines Endlagers von günstig (Modell A, grün) bis weniger günstig (Modell C, rot) reichen.

Anhang 4 Quantifizierung von Parameterwerten und Bandbreiten für Modelle des Radionuklidtransports im Untergrund

Anhang 4.1 Einführung

Modelle des Radionuklidtransports sind ein wichtiger Bestandteil der Bewertung der Sicherheit eines Endlagers für radioaktive Abfälle. In der aktuellen Phase des Standortauswahlverfahrens (Phase I, Schritt 2) wird der Radionuklidtransport mithilfe eines eindimensionalen Transportmodells, TransPyREnd („Transportmodell in Python für Radionuklide aus einem Endlager“), modelliert. Dieses simuliert die wichtigsten Transportprozesse von Radionukliden im Untergrund: Diffusion, welche die Brownsche Bewegung von Radionukliden im Porenraum darstellt, und Advektion, die den Transport von Radionukliden durch die Grundwasserströmung abbildet. Darüber hinaus bezieht das Modell Sorption und den Zerfall von Radionukliden mit ein. Weitere Details dazu finden sich in Anhang 3.

Die modellierten Transportprozesse werden von einer relativ kleinen Anzahl an Modellparametern bestimmt. Zur Quantifizierung der meisten dieser Parameter gibt es allerdings nur sehr wenige gebietsspezifische Daten. Beispielsweise beruhen Angaben zu den effektiven Diffusions- und Sorptionskoeffizienten in der Literatur überwiegend auf Experimenten, die nur für eine kleine Zahl von Standorten weltweit durchgeführt wurden. Des Weiteren wurden im Rahmen dieser Experimente entsprechende Parameter nur für eine begrenzte Anzahl an Elementen gemessen, welche nur einen kleinen Teil des Gesamtinventars an Radionukliden eines Endlagers ausmachen. Für andere Parameter, wie z. B. der Durchlässigkeit oder der Permeabilität, liegen Daten überwiegend entweder nur aus oberflächennahen Erkundungen von Trinkwasservorkommen (Erkundungstiefe weniger als 200 m) oder aus geothermischen Untersuchungen und der Erkundung von Kohlenwasserstoffvorkommen in größeren Tiefen (mehr als 2 500 m) vor. Entsprechende Tiefen liegen allerdings außerhalb des endlagerrelevanten Tiefenbereichs (300 m bis 1 500 m u. GOK) in Deutschland.

Wenn keine gebietsspezifischen Daten zur Verfügung stehen, ist es alternativ möglich, die Bandbreite von Modellparameterwerten mithilfe theoretischer Gleichungen abzuschätzen. Diese setzen die benötigten Parameterwerte mit anderen Parametern in Beziehung, die entweder verfügbar sind, oder anderweitig hergeleitet werden können. Frühere Arbeiten haben beispielsweise gezeigt, dass der Diffusionskoeffizient stark mit der Temperatur, der Lithologie und der Porosität zusammenhängt (Van Loon 2014). Ferner können der Sorptionskoeffizient und sein Ungewissheitsbereich anhand der Porenwasserzusammensetzung und der Lithologie des Wirtsgesteins abgeschätzt werden (Baeyens et al. 2014).

Ziel dieses Kapitels ist es, einen Arbeitsablauf für die Quantifizierung von Parameterwerten und deren Ungewissheitsbandbreite für zwei der wichtigsten Parameter des Radionuklidtransports im Untergrund zu beschreiben: den Sorptionskoeffizienten und den effektiven Diffusionskoeffizienten. Dazu werden zunächst veröffentlichte, theoretische und empirische Gleichungen vorgestellt, die diese Modellparameter mit Parametern wie z. B. der Lithologie, der Mineralogie, der Temperatur und der Porenwasserzusammensetzung in Beziehung setzen. Um die Gleichungen zu verifizieren, er-

folgt anschließend eine Kombination mit veröffentlichten Daten. Der daraus resultierende Arbeitsablauf kann genutzt werden, um Parameterwerte und zugehörige Bandbreiten zu ermitteln, für den Fall, dass keine gebietsspezifischen Daten vorliegen. Der hier vorgestellte Arbeitsablauf konzentriert sich, wie oben bereits erwähnt, auf die beiden Parameter Sorptionskoeffizient und effektiver Diffusionskoeffizient, die zwischen verschiedenen Nukliden (und Lithologien) variieren, und für die in den meisten Fällen absehbar keine gebietsspezifischen Daten verfügbar sein werden. Anzumerken ist, dass sich der hier vorgestellte Arbeitsablauf vor allem auf tonhaltige Gesteine konzentriert, auch wenn Erweiterungen (etwa für Salz) naheliegend und z. T. schon implementiert sind. Konkret getestet wurde der Arbeitsablauf zur Bereitstellung von Parametern für das Teilgebiet (und GzME) 001_00TG_032_01IG_T_f_jmOPT (Opalinuston).

Der Arbeitsablauf wird ausführlich in Anhang 4.2 beschrieben. Eine Zusammenfassung befindet sich in Anhang 4.3.

Im Rahmen dieses Dokuments wird nicht auf Methoden zur Schätzung der Modellparameter Porosität und Permeabilität eingegangen, da für diese Parameter möglicherweise lokationsspezifischere Daten verfügbar sind. In Fällen, in denen keine ausreichenden Daten für diese Parameter zur Verfügung stehen, können die Parameter und ihre Variabilität jedoch mit ähnlichen Arbeitsabläufen abgeschätzt werden. Beispielsweise kann die Porosität von Sedimentgestein anhand von Gleichungen abgeschätzt werden, die die Porosität mit der Lithologie, der maximalen Versenkungstiefe und der effektiven Spannung in Beziehung setzen, wie z. B. in Revil et al. (2002) erörtert, und die Durchlässigkeit von Tonen, Schiefer und siliklastischen Sedimenten kann als Funktion der Lithologie und der Porosität geschätzt werden (siehe z. B. Neuzil (2019) und Luijendijk & Gleeson (2015)). Darüber hinaus sind in den letzten Jahren große Datensätze verfügbar geworden, die zur Charakterisierung der Variabilität dieser Parameter beitragen können.

Anhang 4.2 Detaillierte Beschreibung des Arbeitsablaufs

Anhang 4.2.1 Allgemeines

Dieses Kapitel beschreibt ausführlich den Arbeitsablauf zur Abschätzung der Bandbreiten von Sorptions- sowie effektiven Diffusionskoeffizienten. Die Quantifizierung der Parameterbandbreiten basiert auf einer Kombination aus veröffentlichten Gleichungen und globalen Datenkompilationen.

In Bezug auf die Sorption wird einem Bericht der Nagra (Baeyens et al. 2014) gefolgt, der die Sorption mit der Ladung jedes Elements, der Zusammensetzung des Porenwassers und der Mineralogie des Wirtsgesteins in Beziehung setzt. Für den effektiven Diffusionskoeffizienten wird einer Übersicht der Nagra (Van Loon 2014) gefolgt, die Gleichungen enthält, welche die effektive Diffusivität in einem porösen Material mit der Diffusivität in reinem Wasser, der Temperatur, der Mineralogie und der Porosität des Wirtsgesteins in Beziehung setzen.

Im Rahmen der Vorstellung des Arbeitsablaufs werden veröffentlichte theoretische und empirische Gleichungen erläutert und überprüft, ob diese Gleichungen mit veröffentlichten Datensätzen übereinstimmen. Einzelheiten zu den Methoden zur Quantifizierung der Bandbreiten für jeden Parameter folgen in den nächsten Kapiteln dieses Anhangs.

Anhang 4.2.2 Sorption

Die Sorption von Radionukliden an der Oberfläche von Mineralen ist ein wichtiger Prozess, der den Transport von Radionukliden im Untergrund verzögern kann. Der Sorptionsprozess wird in der aktuellen Phase anhand eines vereinfachten linearen Sorptionsmodells modelliert. In diesem Modell wird die Sorption durch den Sorptionskoeffizienten bestimmt. Der Sorptionskoeffizient ist elementspezifisch, d. h. bei gleichen geologischen Bedingungen kann sich der Sorptionskoeffizient zwischen verschiedenen Elementen um Größenordnungen unterscheiden. Es liegen insgesamt nur wenige Daten über den Sorptionskoeffizienten vor, die sich auf einige wenige Elemente beschränken. Infolgedessen stützen sich auch Sicherheitsbewertungen von gut charakterisierten Wirtsgesteinen, wie dem Opalinuston in der Schweiz, für die meisten Nuklide auf Modelle oder Schätzungen, die in Transportmodellen enthalten sind (Baeyens et al. 2014). Im Standortauswahlverfahren in Deutschland sind gegenwärtig keine standortspezifischen Daten zum Sorptionskoeffizienten vorhanden, weshalb ein Arbeitsablauf erforderlich ist, um diesen Parameter inkl. seiner Ungewissheitsbandbreite abzuschätzen.

Frühere Forschungsarbeiten haben gezeigt, dass die Sorption von einer Vielzahl von Faktoren abhängt, vor allem von der Mineralogie des Wirtsgesteins, dem Redoxzustand, der Speziation der Nuklide sowie der Zusammensetzung des Porenwassers (Baeyens et al. 2014). Die Sorption erfolgt durch zwei Hauptprozesse: Kationenaustausch und Oberflächenkomplexierung. Bradbury et al. (2010) haben die vorhandene Literatur über die Kationenaustauschkapazität und die Oberflächenbereiche zusammengestellt und kommen zu dem Schluss, dass in den meisten natürlichen Gesteinen das Sorptionsverhalten aufgrund ihrer großen Oberfläche und Kationenaustauschkapazität von Schichtsilikaten, d. h. Tonen, dominiert wird. Eine Ausnahme bilden Karbonate, die frei von Tonmineralien sein können, aber dennoch ein Sorptionsverhalten aufweisen.

Bradbury et al. (2010) und Baeyens et al. (2014) haben den linearen Sorptionskoeffizienten (K_d) für reinen Illit und reinen Calcit für eine Reihe verschiedener Porenwasserzusammensetzungen mithilfe von Modellen berechnet, die die Auswirkungen von Speziation und Kationenaustausch berücksichtigen. Daraus ergaben sich Tabellen mit berechneten Sorptionskoeffizienten für reinen Illit und reinen Calcit, die in Tabelle A. 3 und Tabelle A. 4 wiedergegeben werden.

Die Sorption in Tongesteinsformationen kann anhand der berechneten Sorption in reinem Illit oder Calcit bestimmt werden. Wir folgen Bradbury et al. (2010) und Baeyens et al. (2014) in der konservativen Annahme, dass das Sorptionsverhalten von Tonen von 2 : 1-Tonen dominiert wird, zu denen die Illit- und Smektit-Gruppe und Illit-Smektit-Mischschichten gehören. Die Tonarten Kaolinit und Chlorit weisen geringere Oberflächen und Kationenaustauschkapazitäten auf und daher kann davon ausgegangen werden, dass diese nicht wesentlich zur Gesamtsorptionskapazität beitragen. Von Bradbury et al. (2010) zusammengefasste experimentelle Daten zeigen, dass Illit und Smektit ein sehr ähnliches Sorptionsverhalten aufweisen. Daher folgen wir ihrem Ansatz und verwenden die Sorptionsdaten für Illit, um die Sorption von Smektit und von gemischten Illit-Smektit-Tonen darzustellen. Nach Baeyens et al. (2014) korreliert der Sorptionskoeffizient linear mit dem Mineralgehalt von 2 : 1-Tonen und Calcit in einem bestimmten Gestein oder einer geologischen Formation. Der Sorptionskoeffizient eines bestimmten Nuklids kann daher wie folgt berechnet werden:

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

$$K_{d,i} = \frac{w}{w_{ref}} K_{d,ref} \tag{13}$$

wobei $K_{d,i}$ der Sorptionskoeffizient des Nuklids i ($m^3\ kg^{-1}$), w der Massenanteil des Referenzminerals in der Zielformation (dimensionslos), w_{ref} der Massenanteil des Referenzminerals in der Referenzformation und $K_{d,ref}$ der Sorptionskoeffizient des Referenzminerals ($m^3\ kg^{-1}$) ist. Das Referenzmineral ist entweder Illit oder Calcit und die $K_{d,ref}$-Werte für diese Minerale sind in den Tabelle A. 3 und Tabelle A. 4 zu entnehmen.

Die $K_{d,ref}$-Werte für Illit wurden anhand verschiedener Porenwasserzusammensetzungen berechnet. In Anlehnung an Baeyens et al. (2014) wurde hier für die Berechnung der Referenzwerte von $K_{d,ref}$ die Referenz-Porenwasserzusammensetzung des Opalinustons ausgewählt. Für die minimalen und maximalen Schätzungen von $K_{d,ref}$ wurden die Porenwasserzusammensetzungen verwendet, die in Baeyens et al. (2014) zu den niedrigsten bzw. den höchsten Werten von $K_{d,ref}$ führten. Die $K_{d,ref}$-Werte wurden von Baeyens et al. (2014) unter Verwendung vier verschiedener Porenwasserzusammensetzungen berechnet. Dazu gehören eine Referenz-Porenwasserzusammensetzung, die der im schweizerischen Teil der Opalinustonformation beobachteten Porenwasserzusammensetzung entspricht, zwei Endglied-Porenwässer mit einem relativ niedrigen log pCO_2-Wert von -1,5 bar und einem hohen log pCO_2-Wert von -2,8 bar sowie ein Fall mit hohem Salzgehalt und einer Ionenstärke von 0,76 mol/kg. Für den Referenzfall sowie die niedrige und die hohe pCO_2-Zusammensetzung wird eine Ionenstärke von 0,23 mol/kg verwendet. Der pH-Wert schwankt zwischen 7,0 für den hohen PCO_2-Fall und 7,5 für den niedrigen pCO_2-Fall. Die vier Porenwässer führen zu unterschiedlichen Werten für $K_{d,ref}$. Der Referenzfall sowie der Minimal- und Maximalwert aus diesen vier Porenwasserzusammensetzungen sind in Tabelle A. 3 dargestellt.

Zu beachten ist, dass alle Nuklide, die Teil des Inventars sind, das für die Modellierung des Radionuklidtransports (Larue et al. 2013) verwendet wird, in der Datenbank von Baeyens et al. (2014) vorhanden sind, mit Ausnahme von Rubidium (Rb). Für Rb wurden aufgrund der chemischen Ähnlichkeiten die gleichen Sorptionswerte wie für Cäsium (Cs) verwendet. Dies muss jedoch in nachfolgenden Arbeiten evaluiert werden.

Für Calcit sind weniger experimentelle Sorptionsdaten verfügbar und die Mechanismen, die die Sorption von Nukliden bestimmen, sind im Vergleich zu tonhaltigen Gesteinen weniger gut verstanden (Bradbury et al. 2010). Bradbury et al. (2010) ermittelten eine gute Korrelation zwischen dem Sorptionskoeffizienten von Nukliden an Calcit und dem Ionenradius der Nuklide. Diese Korrelation wurde von diesen Autoren verwendet, um den Sorptionskoeffizienten für Nuklide, für die keine Daten verfügbar waren, zu bestimmen. Bradbury et al. (2010) nennen allerdings keinen Ungewissheitsbereich für die Sorptionskoeffizienten für Calcit. Auf der Grundlage der von Bradbury et al. (2010) angegebenen Ungewissheit der linearen Korrelation zwischen dem Ionenradius und dem Sorptionskoeffizienten, wurde hier jedoch ein Ungewissheitsbereich auf den log-transformierten Wert des Sorptionskoeffizienten angewendet. Die resultierenden Werte sind in Tabelle A. 4 aufgeführt.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

Tabelle A. 3 Referenzwerte sowie Mindest- und Maximalwerte der Sorptionskoeffizienten in reinem Illit, berechnet nach Baeyens et al. (2014)

Nuklid	$K_{d,ref}$ best estimate in $m^3\ kg^{-1}$	$K_{d,ref}$ minimum in $m^3\ kg^{-1}$	$K_{d,ref}$ maximum in $m^3\ kg^{-1}$
Be(II)	1,33E+00	1,10E+00	1,45E+00
Cinorg	1,43E-03	8,45E-04	3,38E-03
Corg	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Cl(-I)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
K(I)	5,05E-03	2,94E-03	5,08E-03
Ca(II)	6,30E-04	1,32E-04	6,37E-04
Co(II)	6,72E-01	3,56E-01	1,08E+00
Ni(II)	1,34E+00	1,27E+00	1,43E+00
Se(-II)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Sr(II)	6,36E-04	1,32E-04	6,44E-04
Zr(IV)	1,25E+02	1,18E+02	1,47E+02
Nb(V)	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00
Mo(VI)	3,78E-03	3,07E-03	4,35E-03
Tc(IV)	1,19E+00	1,05E+00	1,28E+00
Pd(II)	3,23E+01	2,73E+00	3,28E+01
Ag(I)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Sn(IV)	1,03E+02	1,03E+02	1,04E+02
I(-I)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Cs(I)	2,04E+00	1,36E+00	2,05E+00
Sm(III)	1,50E+01	8,37E+00	3,41E+01
Eu(III)	5,91E+00	3,61E+00	1,16E+01
Ho(III)	1,05E+01	5,79E+00	2,48E+01
Pb(II)	7,03E+00	1,54E+00	8,45E+00
Po(IV)	5,28E-01	5,28E-01	5,28E-01
Ra(II)	4,42E-04	9,74E-05	4,46E-04
Ac(III)	7,25E+00	4,56E+00	1,35E+01

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

Nuklid	$K_{d,ref}$ best estimate in $m^3\ kg^{-1}$	$K_{d,ref}$ minimum in $m^3\ kg^{-1}$	$K_{d,ref}$ maximum in $m^3\ kg^{-1}$
Th(IV)	3,58E+01	1,70E+01	1,05E+02
Pa(V)	3,30E+01	3,30E+01	3,30E+01
U(IV)	1,98E-01	7,13E-02	1,45E+00
U(VI)	3,72E-04	1,94E-04	3,75E-03
Np(IV)	1,32E+02	1,32E+02	1,32E+02
Pu(III)	7,24E+00	4,35E+00	1,46E+03
Pu(IV)	3,43E-02	1,20E-02	1,53E-01
Am(III)	7,25E+00	4,56E+00	1,35E+01
Cm(III)	7,25E+00	4,56E+00	1,35E+01
Rb	2,04E+00	1,36E+00	2,05E+00

Tabelle A. 4: Referenzwerte sowie minimale und maximale Schätzungen der Sorptionskoeffizienten in reinem Calcit, nach Bradbury et al. (2010)

Nuklid	$K_{d,ref}$ best estimate in $m^3\ kg^{-1}$	$K_{d,ref}$ Minimum in $m^3\ kg^{-1}$	$K_{d,ref}$ Maximum in $m^3\ kg^{-1}$
Be(II)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Cinorg	1,60E-03	1,60E-03	1,60E-03
Corg	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Cl(-I)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
K(I)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Ca(II)	5,00E-05	5,00E-05	5,00E-05
Co(II)	2,00E-03	2,00E-03	2,00E-03
Ni(II)	5,00E-04	5,00E-04	5,00E-04
Se(-II)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Se(IV)	4,00E-05	4,00E-05	4,00E-05
Se(VI)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Sr(II)	5,00E-05	5,00E-05	5,00E-05
Zr(IV)	8,50E-04	8,50E-04	8,50E-04

Nuklid	$K_{d,ref}$ best estimate in $m^3\ kg^{-1}$	$K_{d,ref}$ Minimum in $m^3\ kg^{-1}$	$K_{d,ref}$ Maximum in $m^3\ kg^{-1}$
Hf(IV)	8,50E-04	8,50E-04	8,50E-04
Nb(V)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Mo(VI)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Tc(IV)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Tc(VII)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Ru(IV)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Pd(II)	4,20E-02	4,20E-02	4,20E-02
Ag(I)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Cd(II)	2,00E-01	2,00E-01	2,00E-01
Sn(IV)	3,80E-04	3,80E-04	3,80E-04
Bi(III)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Sb(III)	2,60E-03	2,60E-03	2,60E-03
Sb(V)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
I(-I)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Cs(I)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Eu(III)	3,60E-01	3,60E-01	3,60E-01
Sm(III)	7,40E-01	2,30E-01	2,40E+01
Ln(III)	3,60E-01	3,60E-01	3,60E-01
Pb(II)	2,00E-02	2,00E-02	2,00E-02
Po(IV)	4,00E-05	4,00E-05	4,00E-05
Ra(II)	5,00E-05	5,00E-05	5,00E-05
Th(IV)	4,50E-02	4,50E-02	4,50E-02
Pa(V)	4,60E-03	4,60E-03	4,60E-03
U(IV)	9,50E-02	9,50E-02	9,50E-02
U(VI)	1,20E-03	1,20E-03	1,20E-03
Np(IV)	5,50E-02	5,50E-02	5,50E-02
Np(V)	2,00E-03	2,00E-03	2,00E-03

Nuklid	$K_{d,ref}$ best estimate in $m^3\ kg^{-1}$	$K_{d,ref}$ Minimum in $m^3\ kg^{-1}$	$K_{d,ref}$ Maximum in $m^3\ kg^{-1}$
Pu(III)	2,00E+00	2,00E+00	2,00E+00
Pu(IV)	5,50E-02	5,50E-02	5,50E-02
Pu(V)	1,00E-03	1,00E-03	1,00E-03
Am(III)	1,00E+00	1,00E+00	1,00E+00
Ac(III)	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Cm(III)	8,70E-01	8,70E-01	8,70E-01
Rb	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00

Anhang 4.2.3 Effektiver Diffusionskoeffizient

Anhang 4.2.3.1 Allgemeines

Ähnlich wie der Sorptionskoeffizient, variiert auch der effektive Diffusionskoeffizient zwischen verschiedenen chemischen Elementen. Infolgedessen wird der effektive Diffusionskoeffizient in bestehenden Sicherheitsbewertungen ebenfalls modelliert oder geschätzt. Der nachfolgende Arbeitsablauf zur Abschätzung des effektiven Diffusionskoeffizienten ist weitestgehend von Methoden abgeleitet, die von der Nagra im Rahmen der Suche nach einem Endlager in der Schweiz veröffentlicht wurden (Van Loon 2014). Ähnlich wie der Arbeitsablauf, der für den Sorptionskoeffizienten vorgestellt wurde, ist die Methode allgemein genug, um Diffusionskoeffizienten für Standorte und Gesteine mit unterschiedlichen Tongehalten, Tiefen und Porositäten abschätzen zu können

Anhang 4.2.3.2 Diffusionskoeffizienten von Nukliden

Die Diffusivität in Wasser wird durch die Eigenschaften der Nuklide, die Temperatur und den Salzgehalt des Wassers bestimmt. Für die Diffusion von Radionukliden in Wasser wird Van Loon (2014) gefolgt, der Daten für analoge Ionen verwendet, die von Li & Gregory (1974) veröffentlicht wurden, um die Diffusivität von Radionukliden abzuschätzen. Die Diffusivität von Radionukliden kann in zwei Gruppen unterteilt werden, von denen die eine Gruppe Erdalkalimetalle, Übergangsmetalle, Lanthanoide und Actinoide mit einem relativ niedrigen Diffusionskoeffizienten von $7{,}5(\pm 2{,}5) \times 10^{-10}\ m^2\ s^{-1}$ enthält. Den übrigen Ionen, zu denen Cl^-, Br^-, I^-, K^+, Cs^+, Ag^+ und tritiiertes Wasser (HTO) gehören, wird ein höherer Wert von $20{,}0(\pm 2{,}5) \times 10^{-10}\ m^2\ s^{-1}$ zugeordnet.

Anhang 4.2.3.3 Die Abhängigkeit der Diffusion von Temperatur und Salzgehalt

Die Diffusionsfähigkeit von Radionukliden ist stark von der Temperatur und in geringerem Maße von der Konzentration gelöster Stoffe im Porenwasser abhängig. Simpson & Carr (1958) zeigten, dass die Diffusion über einen Temperaturbereich von 0 °C bis 100 °C der Stokes-Einstein-Beziehung

folgt. Danach kann der Diffusionskoeffizient bei einer Temperatur T als Funktion der Viskosität und des Diffusionskoeffizienten bei einer Referenztemperatur berechnet werden:

$$D_w = D_{w,ref} \frac{\mu_{ref}}{\mu} \frac{T}{T_{ref}} \tag{14}$$

Dabei ist D_w der Diffusionskoeffizient in Wasser ($m^2\ s^{-1}$) und der Index $_{ref}$ bezeichnet den Referenzwert für die Temperatur, die Viskosität und den Diffusionskoeffizienten. Diese Gleichung wird verwendet, um die in Anhang 4.2.3.2 beschriebenen Diffusionskoeffizienten von ihrer Referenztemperatur von 25 °C auf neue Temperaturen umzurechnen. Die Viskosität wird als Funktion der Temperatur und der Konzentration des gelösten Stoffes anhand der folgenden Gleichung berechnet (Batzle & Wang 1992):

$$\mu = 10^{-3}\left(0.1 + (0.333C) + (1.65 + 91.9C^3)e^{-\left(0.42\left(C^{0.8}-0.17\right)^2+0.045\right)T^{0.8}}\right) \tag{15}$$

wobei C der Gewichtsanteil von Natriumchlorid ($kg\ kg^{-1}$) und T die Temperatur (°C) ist. Diese Gleichung gilt im Prinzip nur für Grundwasser, das ausschließlich Natrium und Chlorid enthält. Hier wird die Gleichung als Näherung für Grundwasser verwendet, das auch andere Ionen enthält.

Van Loon et al. (2005) entwickelten eine alternative empirische Gleichung für die Temperaturabhängigkeit der Diffusion in der Opalinustonformation, die auf der Arrhenius-Gleichung basiert:

$$D^T = D_{ref}^{T_{ref}} e^{-\frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T_{ref}}-\frac{1}{T}\right)} \tag{16}$$

Dabei ist E_a die Aktivierungsenergie ($J\ mol^{-1}$) und R die Gaskonstante. Van Loon et al. (2005) berichten von einer guten Übereinstimmung der empirischen Gleichung mit Daten aus der Opalinustonformation unter Verwendung eines Wertes für die Aktivierungsenergie von E_a=2,13 × 10^4 $J\ mol^{-1}$.

Die vorhergesagte Beziehung zwischen Temperatur und Diffusionskoeffizient für die beiden Gleichungen ist in Abbildung A. 12 für den Temperaturbereich von 10 °C bis 55 °C dargestellt, was dem erwarteten Temperaturbereich für ein Endlager bis zu einer Tiefe von 1 500 m entspricht, wobei eine Oberflächentemperatur von 10 °C und ein geothermischer Gradient von 0,03 °C m^{-1} angenommen werden. Der Unterschied zwischen den beiden Gleichungen ist relativ gering, erreicht aber 10 % bei Temperaturen über 40 °C. Da die Gleichung von Van Loon et al. (2005) jedoch nur an Daten aus einer einzigen Formation getestet wurde, wird sich hier für die breiter anwendbare Gleichung von Simpson & Carr (1958) entschieden.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

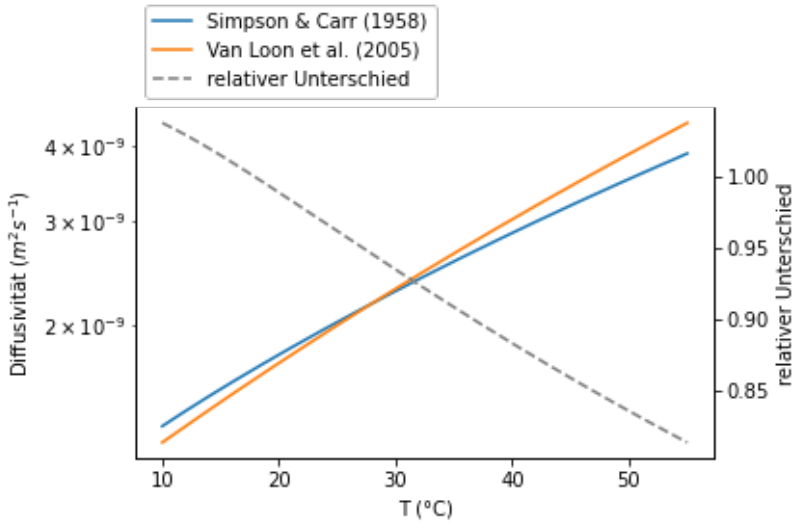


Abbildung A. 12: Abhängigkeit des Diffusionskoeffizienten in Wasser von der Temperatur gemäß den von Simpson & Carr (1958) und Van Loon et al. (2005) vorgeschlagenen Beziehungen.
Die relative Differenz wurde berechnet, indem der nach der Gleichung von Simpson & Carr (1958) berechnete Diffusionskoeffizient durch den nach der Gleichung von Van Loon et al. (2005) berechneten Wert geteilt wurde.

Anhang 4.2.3.4 Die Auswirkungen von Porosität und Tortuosität

Der effektive Diffusionskoeffizient in porösen Medien ist aufgrund der geringeren für die Diffusion zugänglichen Fläche und der längeren Wege, die die Partikel nehmen, viel langsamer als die Diffusion in reinem Wasser. Der effektive Diffusionskoeffizient in einem porösen Medium folgt (Pismen 1974; Ghanbarian et al. 2013):

$$D_e = \frac{\phi D_w}{\tau} \tag{17}$$

wobei D_e der effektive Diffusionskoeffizient in einem porösen Medium ($m^2\ s^{-1}$) und τ die diffusive Tortuosität (dimensionslos) ist. Die diffusive Tortuosität ist definiert als $\tau=(\Delta l/\Delta x)^2$, wobei Δl die durchschnittliche tatsächliche Weglänge (m) und Δx der Abstand zwischen dem Anfangs- und Endpunkt (m) ist (Ghanbarian et al. 2013).

Die Tortuosität variiert mit der Porosität. Es gibt eine Vielzahl von theoretischen und empirischen Gleichungen zur Schätzung des Verhältnisses zwischen Tortuosität und Porosität (Ghanbarian et al. 2013). Die Tortuosität einer zufällig angeordneten Ansammlung von Kugeln mit zufälligen Größen kann anhand der folgenden theoretischen Gleichung berechnet werden (Weissberg 1963):

$$\tau = 1 - P\ln\phi \tag{18}$$

wobei P ein empirischer Faktor (dimensionslos) ist. P ist gleich 0,5, wenn die Gleichung zur Berechnung der Tortuosität von zufällig verteilten Kugeln verwendet wird. Die Tortuosität einer Ansammlung von Zylindern mit zufälliger Größe entspricht der gleichen Gleichung mit einem P-Wert von 1,0 (Tsai & Strieder 1986).

Für Tone wurden jedoch in den meisten früheren Arbeiten empirische Gleichungen anstelle der oben erwähnten theoretischen Gleichungen verwendet. Van Loon (2014) erarbeitete eine erweiterte Version des Archie-Gesetzes, um die anomal hohe Diffusivität bei niedrigen Porositätswerten zu berücksichtigen, die in einer Zusammenstellung von Diffusivitätsdaten in Tongestein beobachtet wird:

$$D_e = D_w \phi^{m_1} + B\phi^{m_2} \quad (19)$$

wobei B ($m^2\ s^{-1}$), m_1 (dimensionslos) und m_2 (dimensionslos) empirische Parameter sind. Eine Überprüfung von Daten aus einer Reihe von sedimentären Formationen in der Schweiz ergab eine ideale Anpassung mit Werten von $B=1 \times 10^{-11}\ m^2\ s^{-1}$, $m_1=2{,}4$ (2,0-3,0) und $m_2=1{,}0\pm0{,}2$ (Van Loon 2014). Diese Gleichung kann mit der Gleichung für den effektiven Diffusionskoeffizienten kombiniert werden, um einen Wert für die Tortuosität zu schätzen, der Folgendes ergibt:

$$1/\tau = \phi^{m_1-1} + B/D_w \phi^{m_2-1} \quad (20)$$

Die Gleichungen führen zu sehr unterschiedlichen Schätzungen der Tortuosität, wie in Abbildung A. 13 zu sehen ist, wobei die empirische Gleichung eine viel höhere Tortuosität vorhersagt als die theoretischen Gleichungen für Zufallskugeln. Die Ursache hierfür liegt wahrscheinlich in der unterschiedlichen Geometrie und den Eigenschaften von Tonmineralen sowie in der heterogeneren Verteilung der Körner in realen Proben.

Ein Vergleich der theoretischen und empirischen Gleichungen mit einer Zusammenstellung von Daten aus Sedimentgesteinen aus Kanada (Xiang et al. 2013) und der Schweiz (Van Loon 2014) zeigt, dass die Gleichungen von Weissberg (1963) und Tsai & Strieder (1986) die effektive Diffusivität überbewerten (vgl. Abbildung A. 14). Die Gleichung von Van Loon (2014) zeigt eine gute Übereinstimmung mit den Daten, mit Ausnahme des Kations Na^+. Die Fehlanpassung von Na^+ wird verursacht durch die zusätzliche Diffusion von Kationen, die an die Mineraloberfläche von Tonen gebunden sind, was weiter unten diskutiert wird.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

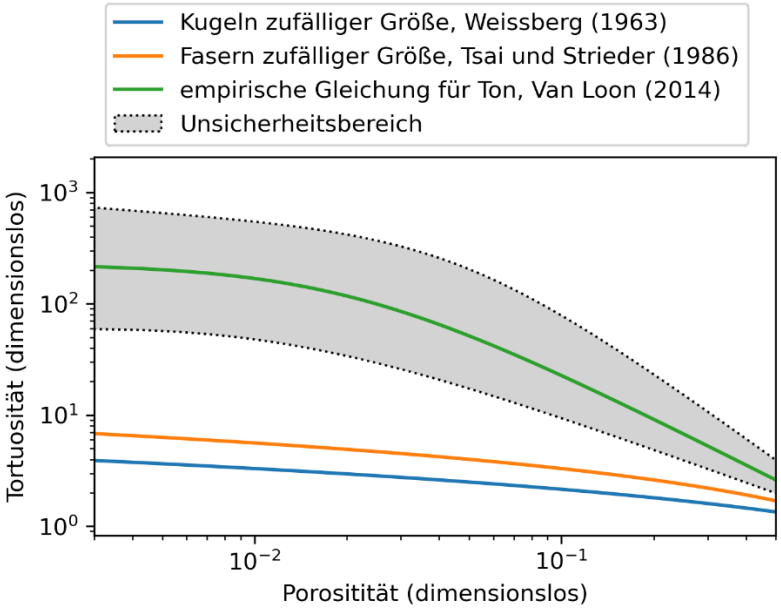


Abbildung A. 13: Beziehung zwischen Tortuosität und zugänglicher Porosität in einer Zusammenstellung von Daten und theoretischen (Weissberg 1963; Tsai & Strieder 1986) und empirischen (Van Loon 2014) Gleichungen

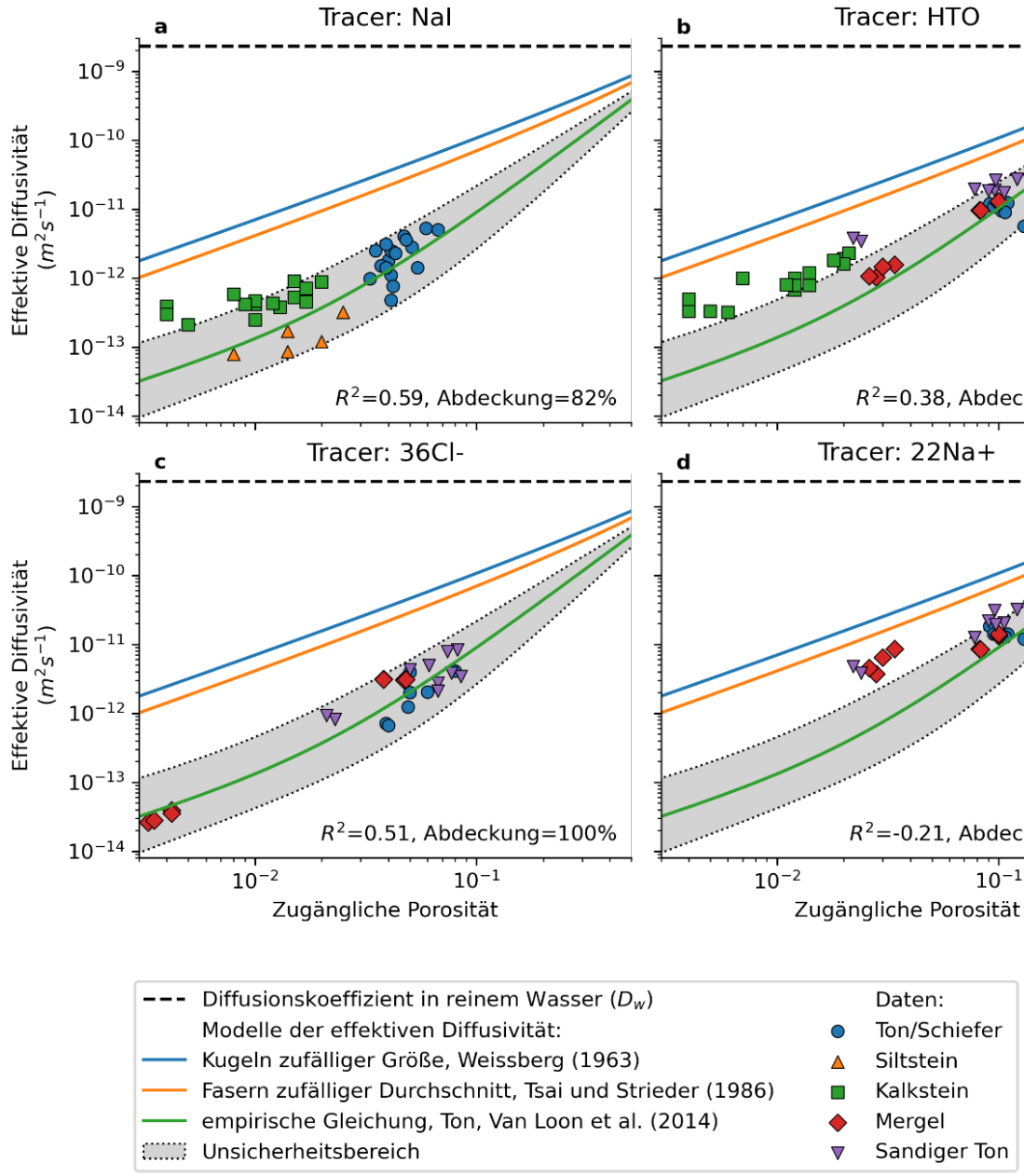


Abbildung A. 14: Abhängigkeit der effektiven Diffusivität von der zugänglichen Porosität in einer Zusammenstellung von Daten und theoretischen (Weissberg 1963; Tsai & Strieder 1986) sowie empirischen (Van Loon 2014) Gleichungen.
Die Diagramme zeigen die Beziehungen für verschiedene Tracer, mit deutlichen Unterschieden in der Diffusivität für Anionen, Kationen und HTO. Datenquellen: Xiang et al. (2013) und Van Loon (2014). R^2 bezeichnet den Determinationskoeffizienten. Abdeckung bezeichnet den prozentualen Anteil der Datenpunkte, der vom Ungewissheitsbereich der Gleichung (Van Loon 2014) abgedeckt wird. Zu beachten ist, dass das Bestimmtheitsmaß negativ sein kann, wenn die Varianz des Modellfehlers die Varianz der Daten übersteigt, wie es bei dem in Diagramm d dargestellten Na+ Tracer der Fall ist.

Anhang 4.2.3.5 Anionen-Ausschlusseffekt

Die elektrische Ladung von Tonteilchen führt dazu, dass ein erheblicher Teil des Porenraums für negativ geladene Teilchen nicht zugänglich ist, wohl aber für positiv geladene oder neutrale Elemente. Dieser so genannte Anionen-Ausschlusseffekt führt zu einem kleineren effektiven Porenraum für Anionen in Gesteinen, die eine Tonkomponente enthalten. Obwohl das Ausmaß dieses Effekts wahrscheinlich vom Tongehalt, der Mineralart und der Porosität abhängt (Van Loon 2014), gibt es nur wenige Daten und theoretische Studien zur Quantifizierung dieser Beziehung. Eine Zusammenstellung gemessener Werte für das Verhältnis der zugänglichen zur gesamten Porosität ist in Abbildung A. 15 dargestellt. Der Anionen-Ausschlusskoeffizient wird hier wie folgt definiert:

$$a = \frac{\phi_a}{\phi} \tag{21}$$

wobei ϕ_a die zugängliche Porosität und a der Anionen-Ausschlusskoeffizient ist. In Anlehnung an die in Abbildung A. 15 dargestellten Daten werden hier ein Durchschnittswert für a von 0,45 und Ungewissheitsgrenzen von 0,3 und 0,6 verwendet.

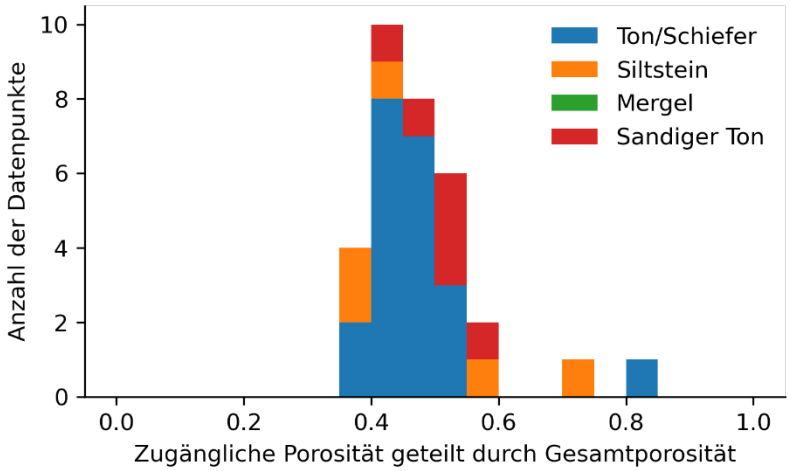


Abbildung A. 15: Das Verhältnis von zugänglicher und gesamter Porosität in einer Zusammenstellung von 32 Datenpunkten von Xiang et al. (2013) und Van Loon (2014)

Anhang 4.2.3.6 Diffusion von sorbierten Kationen

In Tonen findet Diffusion nicht nur im Porenwasser statt, sondern es können auch Kationen diffundieren, die an der Mineraloberfläche von Tonen gebunden sind. Um diesen Effekt zu berücksichtigen, wird ein effektiver Diffusionskoeffizient für Kationen berechnet, der die Auswirkungen der Oberflächendiffusion einschließt. Für Kationen, die an der Oberflächendiffusion teilnehmen, wird die an der Mineraloberfläche stattfindende Diffusion nicht direkt berechnet. Stattdessen wird die Diffusion berücksichtigt, indem ein höherer effektiver Diffusionskoeffizient für die Diffusion im Porenraum verwendet wird, der die Diffusion an Mineraloberflächen somit inkludiert. Es wird den veröffentlichten Gleichungen von Gimmi & Kosakowski (2011) gefolgt, die den korrigierten effektiven Diffusionskoeffizienten wie folgt berechnen:

$$D_{ec} = CFD_e \tag{22}$$

wobei D_{ec} der korrigierte effektive Diffusionskoeffizient und CF ein Korrekturfaktor ist, der wie folgt berechnet wird:

$$CF = 1 + \frac{\rho_b}{K_d}\phi\mu_s \tag{23}$$

wobei μ_s der Oberflächenmobilitätskoeffizient ist. Schätzungen des Oberflächenmobilitätskoeffizienten für verschiedene Ionen wurden in Tabelle 1 in Gimmi & Kosakowski (2011), zusammengestellt. Hier wird der angegebene Mittelwert als beste Schätzung und der Wert plus und minus das Zweifache der Standardabweichung als minimale und maximale Schätzung verwendet.

Anhang 4.3 Zusammenfassung des Arbeitsablaufs

Sorption

Der in den vorangegangenen Abschnitten erläuterte Arbeitsablauf wird im Folgenden kurz zusammengefasst. Die Berechnung des Sorptionskoeffizienten für jedes Nuklid und jede geologische Einheit geschieht in den folgenden Schritten:

1. Der Arbeitsablauf beginnt mit Daten über den Sorptionskoeffizienten für Illit und Calcit für eine Referenz-Porenwasserzusammensetzung und Endglieder-Porenwasserzusammensetzungen, wie von Baeyens et al. (2014) veröffentlicht.
2. Der Sorptionskoeffizient für jedes Nuklid jeder geologischen Einheit wird als lineare Funktion des Anteils von 2 : 1-Ton und Kalzit in jeder geologischen Einheit berechnet

Diffusion

Die Berechnung des effektiven Diffusionskoeffizienten für jedes Nuklid und jede geologische Einheit erfolgt in folgenden Schritten:

1. Der Diffusionskoeffizient in Wasser wird für jedes Nuklid berechnet, wobei die Daten von Li & Gregory (1974) verwendet werden.
2. Der Diffusionskoeffizient bei der geschätzten Temperatur in der Tiefe und der angenommenen Porenwassersalinität wird anhand der Gleichung von Simpson & Carr (1958) geschätzt.
3. Die zugängliche Porosität wird für jedes Anion unter Verwendung eines festen Verhältnisses zwischen zugänglicher und gesamter Porosität berechnet. Für neutrale Elemente und Kationen ist die zugängliche Porosität gleich der Gesamtporosität.
4. Der effektive Diffusionskoeffizient wird anhand der empirischen Gleichung von Van Loon (2014) berechnet, die den effektiven Diffusionskoeffizienten, die Porosität und die Tortuosität miteinander in Beziehung setzt, falls die geologische Formation erhebliche Mengen an Tonmineralen enthält. Für andere Gesteinsarten wird die theoretische Gleichung von Weissberg (1963) verwendet.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

5. Für Kationen wird der effektive Diffusionskoeffizient mit Hilfe der Gleichungen von Gimmi & Kosakowski (2011) korrigiert, um die Diffusion von an der Oberfläche von Tonmineralen gebundenen Ionen zu berücksichtigen. Diese Korrektur wird nur für Formationen durchgeführt, die erhebliche Mengen an Tonmineralen enthalten. Für alle anderen Formationen und für neutrale Elemente und Anionen wird die effektive Diffusivität in diesem Schritt nicht verändert.

Bei diesem Arbeitsablauf werden Daten über die Temperatur, den Porenwassersalzgehalt, die vorherrschende Lithologie (Ton oder Nicht-Ton) und die Porosität als Eingangsdaten verwendet.

Anhang 5 Bestmögliche Einschätzung der Parameterwerte für den Nuklidtransport

In Tabelle A. 5 und Tabelle A. 6 sind die in der Radionuklidtransportmodellierung verwendeten Parameter für den Teiluntersuchungsraum 01_07UR im GzME „Opalinuston“ dargestellt. Es handelt sich um vorläufige Werte, die sich aus dem aktuellen Arbeitsstand ergeben. Tabelle A. 5 enthält Parameter zur Konfiguration und zu relevanten Gesteinseigenschaften der Modelleinheiten, Tabelle A. 6 die nuklidspezifischen Werte (vereinfachter Vektor mit 47 Radionukliden) für die Diffusions- und Sorptionskoeffizienten der Modelleinheiten. Zu beachten ist, dass die Mächtigkeiten in Tabelle A. 5 für die Berechnung im Modell so abgerundet wurden, dass sie Vielfache der Gitterauflösung ergeben. Die Gitterauflösung für die gegenwärtigen Rechenläufe beträgt 2 m. Die nuklidspezifischen Werte für Diffusionskoeffizienten und Sorptionskoeffizienten basieren auf der TB Donautherme und auf dem Workflow zur Bestimmung von Parametern (s. Anhang 4: Quantifizierung von Parameterwerten und Bandbreiten für Modelle des Radionuklidtransports im Untergrund). Sie sind in Abbildung A. 16 bzw.:Abbildung A. 17 veranschaulicht.

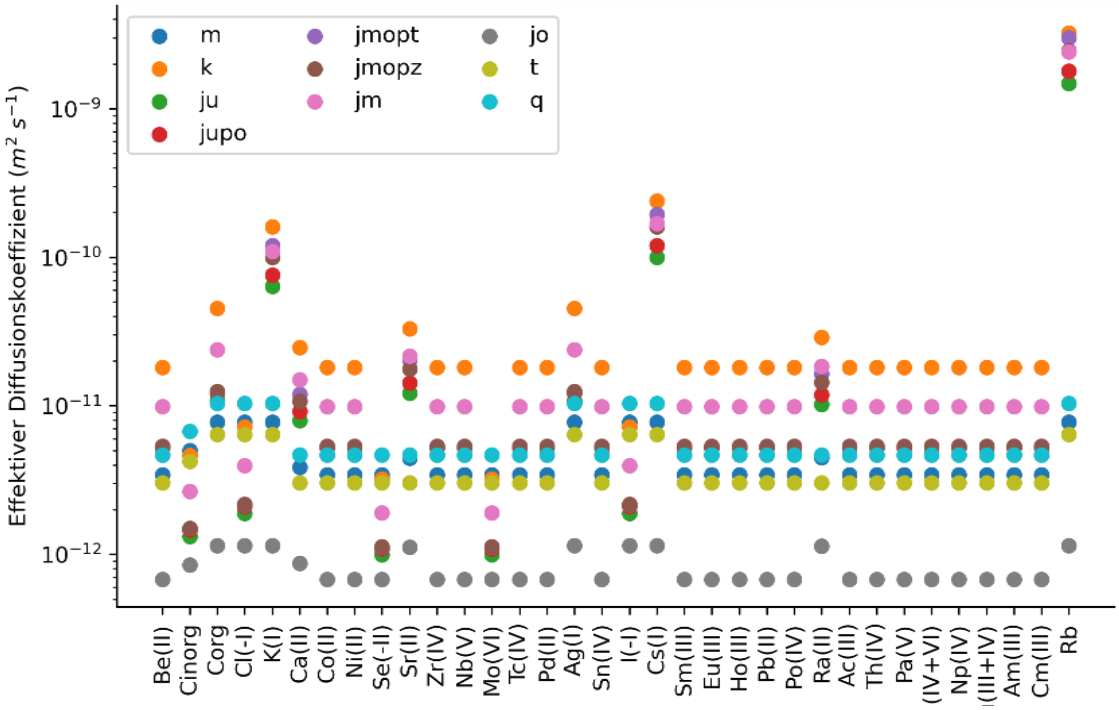


Abbildung A. 16: Effektive Diffusionskoeffizienten der Nuklide (bestmögliche Einschätzungen, B.E.)

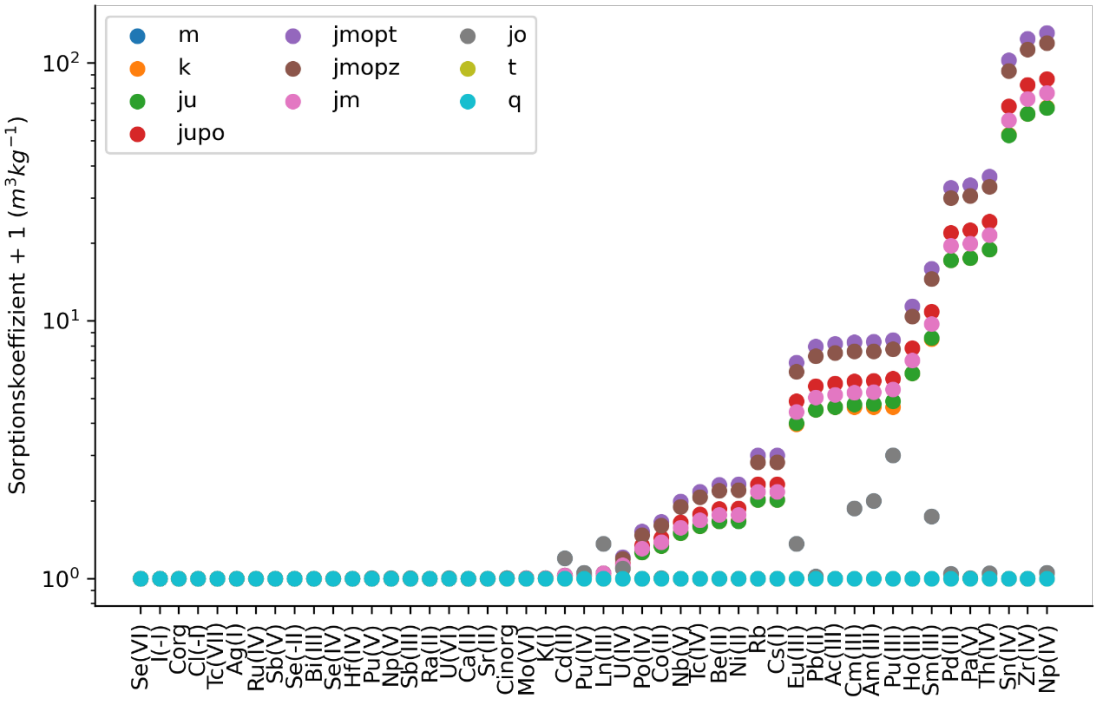


Abbildung A. 17: Sorptionskoeffizienten der Nuklide (bestmögliche Einschätzungen, B.E.)

Tabelle A. 5: Mächtigkeit, Matrixdichte, Porosität und Durchlässigkeitsbeiwerte der Modelleinheiten für die Radionuklidtransportmodellierung im Teiluntersuchungsraum 01_07UR_001_00TG_032_01IG_T_f_jmOPT im GzME "Opalinuston" (bestmögliche Einschätzungen, B.E.)

Name der Einheit	Code	Mächtigkeit in m	Matrixdichte in kg/m³	Porosität	Durchlässigkeitsbeiwert in m/s
Muschelkalk	m	146	2630	0,08	3,16E-10
Keuper	k	166	2750	0,18	1,00E-07
Unterjura	ju	35	2794	0,1	2,00E-09
Posidonienschiefer	jupo	18	2450	0,1062	1,00E-13
Teufelsloch	jmopt	79,1	2734	0,109	3,16E-11
Zillhausen	jmopz	33,55	2500	0,111	1,00E-12
Mitteljura	jm	73,35	2780	0,15	2,00E-15

Name der Einheit	Code	Mächtigkeit in m	Matrixdichte in kg/m³	Porosität	Durchlässigkeits-beiwert in m/s
Oberjura	jo	435,8	2750	0,04	1,26E-04
Tertiär	t	12,6	2706	0,1	5,01E-13
Quartär	q	9,6	2650	0,125	7,94E-04

Tabelle A. 6: Nuklideigenschaften (bestmögliche Einschätzungen, B.E.)

geologische Einheit	Nuklid	effektiver Diffusionskoeffizient in m²/s	Sorptionskoeffizient in m³/kg
m	Be-10	3,42E-12	0,00E+00
m	C-14	4,99E-12	0,00E+00
m	Cl-36	7,79E-12	0,00E+00
m	Ca-41	3,87E-12	5,00E-05
m	Ni-59	3,42E-12	5,00E-04
m	Ni-63	3,42E-12	5,00E-04
m	Se-79	3,42E-12	0,00E+00
m	Rb-87	7,79E-12	0,00E+00
m	Sr-90	4,44E-12	5,00E-05
m	Zr-93	3,42E-12	8,50E-04
m	Nb-94	3,42E-12	0,00E+00
m	Mo-93	3,42E-12	0,00E+00
m	Tc-99	3,42E-12	0,00E+00
m	Pd-107	3,42E-12	4,20E-02
m	Ag-108m	7,79E-12	0,00E+00
m	Sn-126	3,42E-12	3,80E-04
m	I-129	7,79E-12	0,00E+00
m	Cs-135	7,79E-12	0,00E+00
m	Cs-137	7,79E-12	0,00E+00
m	Sm-147	3,42E-12	7,40E-01
m	Sm-151	3,42E-12	7,40E-01
m	Ho-166m	3,42E-12	0,00E+00
m	Cm-248	3,42E-12	8,70E-01
m	Pu-244	3,42E-12	2,00E+00
m	Pu-240	3,42E-12	2,00E+00
m	U-236	3,42E-12	9,50E-02
m	Th-232	3,42E-12	4,50E-02

geologische Einheit	Nuklid	effektiver Diffusionskoeffizient in m²/s	Sorptionskoeffizient in m³/kg
m	U-232	3,42E-12	9,50E-02
m	Cm-245	3,42E-12	8,70E-01
m	Am-241	3,42E-12	1,00E+00
m	Np-237	3,42E-12	5,50E-02
m	U-233	3,42E-12	9,50E-02
m	Th-229	3,42E-12	4,50E-02
m	Cm-246	3,42E-12	8,70E-01
m	Pu-242	3,42E-12	2,00E+00
m	U-238	3,42E-12	9,50E-02
m	Am-242m	3,42E-12	1,00E+00
m	Pu-238	3,42E-12	2,00E+00
m	U-234	3,42E-12	9,50E-02
m	Th-230	3,42E-12	4,50E-02
m	Ra-226	4,49E-12	5,00E-05
m	Cm-247	3,42E-12	8,70E-01
m	Am-243	3,42E-12	1,00E+00
m	Pu-239	3,42E-12	2,00E+00
m	U-235	3,42E-12	9,50E-02
m	Pa-231	3,42E-12	4,60E-03
m	Ac-227	3,42E-12	0,00E+00
k	Be-10	1,81E-11	6,66E-01
k	C-14	4,65E-12	0,00E+00
k	Cl-36	7,21E-12	0,00E+00
k	Ca-41	2,46E-11	3,16E-04
k	Ni-59	1,81E-11	6,71E-01
k	Ni-63	1,81E-11	6,71E-01
k	Se-79	3,21E-12	0,00E+00
k	Rb-87	3,24E-09	1,02E+00
k	Sr-90	3,29E-11	3,19E-04
k	Zr-93	1,81E-11	6,26E+01
k	Nb-94	1,81E-11	5,01E-01
k	Mo-93	3,21E-12	1,89E-03
k	Tc-99	1,81E-11	5,96E-01
k	Pd-107	1,81E-11	1,62E+01
k	Ag-108m	4,53E-11	0,00E+00
k	Sn-126	1,81E-11	5,16E+01
k	I-129	7,21E-12	0,00E+00
k	Cs-135	2,39E-10	1,02E+00

geologische Einheit	Nuklid	effektiver Diffusionskoeffizient in m²/s	Sorptionskoeffizient in m³/kg
k	Cs-137	2,39E-10	1,02E+00
k	Sm-147	1,81E-11	7,52E+00
k	Sm-151	1,81E-11	7,52E+00
k	Ho-166m	1,81E-11	5,26E+00
k	Cm-248	1,81E-11	3,63E+00
k	Pu-244	1,81E-11	3,63E+00
k	Pu-240	1,81E-11	3,63E+00
k	U-236	1,81E-11	9,92E-02
k	Th-232	1,81E-11	1,79E+01
k	U-232	1,81E-11	9,92E-02
k	Cm-245	1,81E-11	3,63E+00
k	Am-241	1,81E-11	3,63E+00
k	Np-237	1,81E-11	6,61E+01
k	U-233	1,81E-11	9,92E-02
k	Th-229	1,81E-11	1,79E+01
k	Cm-246	1,81E-11	3,63E+00
k	Pu-242	1,81E-11	3,63E+00
k	U-238	1,81E-11	9,92E-02
k	Am-242m	1,81E-11	3,63E+00
k	Pu-238	1,81E-11	3,63E+00
k	U-234	1,81E-11	9,92E-02
k	Th-230	1,81E-11	1,79E+01
k	Ra-226	2,90E-11	2,21E-04
k	Cm-247	1,81E-11	3,63E+00
k	Am-243	1,81E-11	3,63E+00
k	Pu-239	1,81E-11	3,63E+00
k	U-235	1,81E-11	9,92E-02
k	Pa-231	1,81E-11	1,65E+01
k	Ac-227	1,81E-11	3,63E+00
ju	Be-10	4,68E-12	6,64E-01
ju	C-14	1,32E-12	0,00E+00
ju	Cl-36	1,89E-12	0,00E+00
ju	Ca-41	7,97E-12	3,21E-04
ju	Ni-59	4,68E-12	6,69E-01
ju	Ni-63	4,68E-12	6,69E-01
ju	Se-79	9,91E-13	0,00E+00
ju	Rb-87	1,48E-09	1,02E+00
ju	Sr-90	1,22E-11	3,24E-04

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

geologische Einheit	Nuklid	effektiver Diffusionskoeffizient in m²/s	Sorptionskoeffizient in m³/kg
ju	Zr-93	4,68E-12	6,24E+01
ju	Nb-94	4,68E-12	5,00E-01
ju	Mo-93	9,91E-13	1,89E-03
ju	Tc-99	4,68E-12	5,94E-01
ju	Pd-107	4,68E-12	1,61E+01
ju	Ag-108m	1,08E-11	0,00E+00
ju	Sn-126	4,68E-12	5,14E+01
ju	I-129	1,89E-12	0,00E+00
ju	Cs-135	1,00E-10	1,02E+00
ju	Cs-137	1,00E-10	1,02E+00
ju	Sm-147	4,68E-12	7,59E+00
ju	Sm-151	4,68E-12	7,59E+00
ju	Ho-166m	4,68E-12	5,24E+00
ju	Cm-248	4,68E-12	3,73E+00
ju	Pu-244	4,68E-12	3,88E+00
ju	Pu-240	4,68E-12	3,88E+00
ju	U-236	4,68E-12	1,11E-01
ju	Th-232	4,68E-12	1,79E+01
ju	U-232	4,68E-12	1,11E-01
ju	Cm-245	4,68E-12	3,73E+00
ju	Am-241	4,68E-12	3,75E+00
ju	Np-237	4,68E-12	6,59E+01
ju	U-233	4,68E-12	1,11E-01
ju	Th-229	4,68E-12	1,79E+01
ju	Cm-246	4,68E-12	3,73E+00
ju	Pu-242	4,68E-12	3,88E+00
ju	U-238	4,68E-12	1,11E-01
ju	Am-242m	4,68E-12	3,75E+00
ju	Pu-238	4,68E-12	3,88E+00
ju	U-234	4,68E-12	1,11E-01
ju	Th-230	4,68E-12	1,79E+01
ju	Ra-226	1,02E-11	2,27E-04
ju	Cm-247	4,68E-12	3,73E+00
ju	Am-243	4,68E-12	3,75E+00
ju	Pu-239	4,68E-12	3,88E+00
ju	U-235	4,68E-12	1,11E-01
ju	Pa-231	4,68E-12	1,65E+01
ju	Ac-227	4,68E-12	3,62E+00

geologische Einheit	Nuklid	effektiver Diffusionskoeffizient in m²/s	Sorptionskoeffizient in m³/kg
jupo	Be-10	5,22E-12	8,63E-01
jupo	C-14	1,46E-12	0,00E+00
jupo	Cl-36	2,11E-12	0,00E+00
jupo	Ca-41	9,16E-12	4,15E-04
jupo	Ni-59	5,22E-12	8,70E-01
jupo	Ni-63	5,22E-12	8,70E-01
jupo	Se-79	1,09E-12	0,00E+00
jupo	Rb-87	1,79E-09	1,32E+00
jupo	Sr-90	1,42E-11	4,19E-04
jupo	Zr-93	5,22E-12	8,11E+01
jupo	Nb-94	5,22E-12	6,49E-01
jupo	Mo-93	1,09E-12	2,45E-03
jupo	Tc-99	5,22E-12	7,72E-01
jupo	Pd-107	5,22E-12	2,10E+01
jupo	Ag-108m	1,21E-11	0,00E+00
jupo	Sn-126	5,22E-12	6,68E+01
jupo	I-129	2,11E-12	0,00E+00
jupo	Cs-135	1,20E-10	1,32E+00
jupo	Cs-137	1,20E-10	1,32E+00
jupo	Sm-147	5,22E-12	9,83E+00
jupo	Sm-151	5,22E-12	9,83E+00
jupo	Ho-166m	5,22E-12	6,81E+00
jupo	Cm-248	5,22E-12	4,82E+00
jupo	Pu-244	5,22E-12	4,96E+00
jupo	Pu-240	5,22E-12	4,96E+00
jupo	U-236	5,22E-12	1,41E-01
jupo	Th-232	5,22E-12	2,32E+01
jupo	U-232	5,22E-12	1,41E-01
jupo	Cm-245	5,22E-12	4,82E+00
jupo	Am-241	5,22E-12	4,83E+00
jupo	Np-237	5,22E-12	8,57E+01
jupo	U-233	5,22E-12	1,41E-01
jupo	Th-229	5,22E-12	2,32E+01
jupo	Cm-246	5,22E-12	4,82E+00
jupo	Pu-242	5,22E-12	4,96E+00
jupo	U-238	5,22E-12	1,41E-01
jupo	Am-242m	5,22E-12	4,83E+00
jupo	Pu-238	5,22E-12	4,96E+00
jupo	U-234	5,22E-12	1,41E-01

geologische Einheit	Nuklid	effektiver Diffusionskoeffizient in m²/s	Sorptionskoeffizient in m³/kg
jupo	Th-230	5,22E-12	2,32E+01
jupo	Ra-226	1,18E-11	2,93E-04
jupo	Cm-247	5,22E-12	4,82E+00
jupo	Am-243	5,22E-12	4,83E+00
jupo	Pu-239	5,22E-12	4,96E+00
jupo	U-235	5,22E-12	1,41E-01
jupo	Pa-231	5,22E-12	2,14E+01
jupo	Ac-227	5,22E-12	4,70E+00
jmopt	Be-10	5,34E-12	1,31E+00
jmopt	C-14	1,49E-12	0,00E+00
jmopt	Cl-36	2,16E-12	0,00E+00
jmopt	Ca-41	1,19E-11	6,28E-04
jmopt	Ni-59	5,34E-12	1,32E+00
jmopt	Ni-63	5,34E-12	1,32E+00
jmopt	Se-79	1,12E-12	0,00E+00
jmopt	Rb-87	2,99E-09	2,01E+00
jmopt	Sr-90	2,04E-11	6,33E-04
jmopt	Zr-93	5,34E-12	1,23E+02
jmopt	Nb-94	5,34E-12	9,86E-01
jmopt	Mo-93	1,12E-12	3,73E-03
jmopt	Tc-99	5,34E-12	1,17E+00
jmopt	Pd-107	5,34E-12	3,18E+01
jmopt	Ag-108m	1,24E-11	0,00E+00
jmopt	Sn-126	5,34E-12	1,02E+02
jmopt	I-129	2,16E-12	0,00E+00
jmopt	Cs-135	1,93E-10	2,01E+00
jmopt	Cs-137	1,93E-10	2,01E+00
jmopt	Sm-147	5,34E-12	1,49E+01
jmopt	Sm-151	5,34E-12	1,49E+01
jmopt	Ho-166m	5,34E-12	1,04E+01
jmopt	Cm-248	5,34E-12	7,26E+00
jmopt	Pu-244	5,34E-12	7,40E+00
jmopt	Pu-240	5,34E-12	7,40E+00
jmopt	U-236	5,34E-12	2,08E-01
jmopt	Th-232	5,34E-12	3,53E+01
jmopt	U-232	5,34E-12	2,08E-01
jmopt	Cm-245	5,34E-12	7,26E+00
jmopt	Am-241	5,34E-12	7,28E+00

geologische Einheit	Nuklid	effektiver Diffusionskoeffizient in m²/s	Sorptionskoeffizient in m³/kg
jmopt	Np-237	5,34E-12	1,30E+02
jmopt	U-233	5,34E-12	2,08E-01
jmopt	Th-229	5,34E-12	3,53E+01
jmopt	Cm-246	5,34E-12	7,26E+00
jmopt	Pu-242	5,34E-12	7,40E+00
jmopt	U-238	5,34E-12	2,08E-01
jmopt	Am-242m	5,34E-12	7,28E+00
jmopt	Pu-238	5,34E-12	7,40E+00
jmopt	U-234	5,34E-12	2,08E-01
jmopt	Th-230	5,34E-12	3,53E+01
jmopt	Ra-226	1,64E-11	4,42E-04
jmopt	Cm-247	5,34E-12	7,26E+00
jmopt	Am-243	5,34E-12	7,28E+00
jmopt	Pu-239	5,34E-12	7,40E+00
jmopt	U-235	5,34E-12	2,08E-01
jmopt	Pa-231	5,34E-12	3,25E+01
jmopt	Ac-227	5,34E-12	7,15E+00
jmopz	Be-10	5,35E-12	1,19E+00
jmopz	C-14	1,50E-12	0,00E+00
jmopz	Cl-36	2,16E-12	0,00E+00
jmopz	Ca-41	1,07E-11	5,71E-04
jmopz	Ni-59	5,35E-12	1,20E+00
jmopz	Ni-63	5,35E-12	1,20E+00
jmopz	Se-79	1,12E-12	0,00E+00
jmopz	Rb-87	2,45E-09	1,83E+00
jmopz	Sr-90	1,77E-11	5,76E-04
jmopz	Zr-93	5,35E-12	1,12E+02
jmopz	Nb-94	5,35E-12	8,96E-01
jmopz	Mo-93	1,12E-12	3,39E-03
jmopz	Tc-99	5,35E-12	1,07E+00
jmopz	Pd-107	5,35E-12	2,89E+01
jmopz	Ag-108m	1,24E-11	0,00E+00
jmopz	Sn-126	5,35E-12	9,23E+01
jmopz	I-129	2,16E-12	0,00E+00
jmopz	Cs-135	1,60E-10	1,83E+00
jmopz	Cs-137	1,60E-10	1,83E+00
jmopz	Sm-147	5,35E-12	1,35E+01
jmopz	Sm-151	5,35E-12	1,35E+01

geologische Einheit	Nuklid	effektiver Diffusionskoeffizient in m²/s	Sorptionskoeffizient in m³/kg
jmopz	Ho-166m	5,35E-12	9,40E+00
jmopz	Cm-248	5,35E-12	6,61E+00
jmopz	Pu-244	5,35E-12	6,74E+00
jmopz	Pu-240	5,35E-12	6,74E+00
jmopz	U-236	5,35E-12	1,90E-01
jmopz	Th-232	5,35E-12	3,21E+01
jmopz	U-232	5,35E-12	1,90E-01
jmopz	Cm-245	5,35E-12	6,61E+00
jmopz	Am-241	5,35E-12	6,62E+00
jmopz	Np-237	5,35E-12	1,18E+02
jmopz	U-233	5,35E-12	1,90E-01
jmopz	Th-229	5,35E-12	3,21E+01
jmopz	Cm-246	5,35E-12	6,61E+00
jmopz	Pu-242	5,35E-12	6,74E+00
jmopz	U-238	5,35E-12	1,90E-01
jmopz	Am-242m	5,35E-12	6,62E+00
jmopz	Pu-238	5,35E-12	6,74E+00
jmopz	U-234	5,35E-12	1,90E-01
jmopz	Th-230	5,35E-12	3,21E+01
jmopz	Ra-226	1,44E-11	4,02E-04
jmopz	Cm-247	5,35E-12	6,61E+00
jmopz	Am-243	5,35E-12	6,62E+00
jmopz	Pu-239	5,35E-12	6,74E+00
jmopz	U-235	5,35E-12	1,90E-01
jmopz	Pa-231	5,35E-12	2,96E+01
jmopz	Ac-227	5,35E-12	6,49E+00
jm	Be-10	9,86E-12	7,63E-01
jm	C-14	2,64E-12	0,00E+00
jm	Cl-36	3,95E-12	0,00E+00
jm	Ca-41	1,50E-11	3,68E-04
jm	Ni-59	9,86E-12	7,69E-01
jm	Ni-63	9,86E-12	7,69E-01
jm	Se-79	1,90E-12	0,00E+00
jm	Rb-87	2,40E-09	1,17E+00
jm	Sr-90	2,15E-11	3,71E-04
jm	Zr-93	9,86E-12	7,17E+01
jm	Nb-94	9,86E-12	5,74E-01
jm	Mo-93	1,90E-12	2,17E-03

geologische Einheit	Nuklid	effektiver Diffusionskoeffizient in m²/s	Sorptionskoeffizient in m³/kg
jm	Tc-99	9,86E-12	6,83E-01
jm	Pd-107	9,86E-12	1,85E+01
jm	Ag-108m	2,38E-11	0,00E+00
jm	Sn-126	9,86E-12	5,91E+01
jm	I-129	3,95E-12	0,00E+00
jm	Cs-135	1,68E-10	1,17E+00
jm	Cs-137	1,68E-10	1,17E+00
jm	Sm-147	9,86E-12	8,70E+00
jm	Sm-151	9,86E-12	8,70E+00
jm	Ho-166m	9,86E-12	6,02E+00
jm	Cm-248	9,86E-12	4,27E+00
jm	Pu-244	9,86E-12	4,41E+00
jm	Pu-240	9,86E-12	4,41E+00
jm	U-236	9,86E-12	1,26E-01
jm	Th-232	9,86E-12	2,05E+01
jm	U-232	9,86E-12	1,26E-01
jm	Cm-245	9,86E-12	4,27E+00
jm	Am-241	9,86E-12	4,29E+00
jm	Np-237	9,86E-12	7,57E+01
jm	U-233	9,86E-12	1,26E-01
jm	Th-229	9,86E-12	2,05E+01
jm	Cm-246	9,86E-12	4,27E+00
jm	Pu-242	9,86E-12	4,41E+00
jm	U-238	9,86E-12	1,26E-01
jm	Am-242m	9,86E-12	4,29E+00
jm	Pu-238	9,86E-12	4,41E+00
jm	U-234	9,86E-12	1,26E-01
jm	Th-230	9,86E-12	2,05E+01
jm	Ra-226	1,85E-11	2,60E-04
jm	Cm-247	9,86E-12	4,27E+00
jm	Am-243	9,86E-12	4,29E+00
jm	Pu-239	9,86E-12	4,41E+00
jm	U-235	9,86E-12	1,26E-01
jm	Pa-231	9,86E-12	1,89E+01
jm	Ac-227	9,86E-12	4,16E+00
jo	Be-10	6,80E-13	0,00E+00
jo	C-14	8,48E-13	0,00E+00
jo	Cl-36	1,15E-12	0,00E+00

geologische Einheit	Nuklid	effektiver Diffusionskoeffizient in m²/s	Sorptionskoeffizient in m³/kg
jo	Ca-41	8,71E-13	5,00E-05
jo	Ni-59	6,80E-13	5,00E-04
jo	Ni-63	6,80E-13	5,00E-04
jo	Se-79	6,80E-13	0,00E+00
jo	Rb-87	1,15E-12	0,00E+00
jo	Sr-90	1,11E-12	5,00E-05
jo	Zr-93	6,80E-13	8,50E-04
jo	Nb-94	6,80E-13	0,00E+00
jo	Mo-93	6,80E-13	0,00E+00
jo	Tc-99	6,80E-13	0,00E+00
jo	Pd-107	6,80E-13	4,20E-02
jo	Ag-108m	1,15E-12	0,00E+00
jo	Sn-126	6,80E-13	3,80E-04
jo	I-129	1,15E-12	0,00E+00
jo	Cs-135	1,15E-12	0,00E+00
jo	Cs-137	1,15E-12	0,00E+00
jo	Sm-147	6,80E-13	7,40E-01
jo	Sm-151	6,80E-13	7,40E-01
jo	Ho-166m	6,80E-13	0,00E+00
jo	Cm-248	6,80E-13	8,70E-01
jo	Pu-244	6,80E-13	2,00E+00
jo	Pu-240	6,80E-13	2,00E+00
jo	U-236	6,80E-13	9,50E-02
jo	Th-232	6,80E-13	4,50E-02
jo	U-232	6,80E-13	9,50E-02
jo	Cm-245	6,80E-13	8,70E-01
jo	Am-241	6,80E-13	1,00E+00
jo	Np-237	6,80E-13	5,50E-02
jo	U-233	6,80E-13	9,50E-02
jo	Th-229	6,80E-13	4,50E-02
jo	Cm-246	6,80E-13	8,70E-01
jo	Pu-242	6,80E-13	2,00E+00
jo	U-238	6,80E-13	9,50E-02
jo	Am-242m	6,80E-13	1,00E+00
jo	Pu-238	6,80E-13	2,00E+00
jo	U-234	6,80E-13	9,50E-02
jo	Th-230	6,80E-13	4,50E-02
jo	Ra-226	1,14E-12	5,00E-05
jo	Cm-247	6,80E-13	8,70E-01

geologische Einheit	Nuklid	effektiver Diffusionskoeffizient in m²/s	Sorptionskoeffizient in m³/kg
jo	Am-243	6,80E-13	1,00E+00
jo	Pu-239	6,80E-13	2,00E+00
jo	U-235	6,80E-13	9,50E-02
jo	Pa-231	6,80E-13	4,60E-03
jo	Ac-227	6,80E-13	0,00E+00
t	Be-10	3,03E-12	0,00E+00
t	C-14	4,24E-12	0,00E+00
t	Cl-36	6,40E-12	0,00E+00
t	Ca-41	3,03E-12	0,00E+00
t	Ni-59	3,03E-12	0,00E+00
t	Ni-63	3,03E-12	0,00E+00
t	Se-79	3,03E-12	0,00E+00
t	Rb-87	6,40E-12	0,00E+00
t	Sr-90	3,03E-12	0,00E+00
t	Zr-93	3,03E-12	0,00E+00
t	Nb-94	3,03E-12	0,00E+00
t	Mo-93	3,03E-12	0,00E+00
t	Tc-99	3,03E-12	0,00E+00
t	Pd-107	3,03E-12	0,00E+00
t	Ag-108m	6,40E-12	0,00E+00
t	Sn-126	3,03E-12	0,00E+00
t	I-129	6,40E-12	0,00E+00
t	Cs-135	6,40E-12	0,00E+00
t	Cs-137	6,40E-12	0,00E+00
t	Sm-147	3,03E-12	0,00E+00
t	Sm-151	3,03E-12	0,00E+00
t	Ho-166m	3,03E-12	0,00E+00
t	Cm-248	3,03E-12	0,00E+00
t	Pu-244	3,03E-12	0,00E+00
t	Pu-240	3,03E-12	0,00E+00
t	U-236	3,03E-12	0,00E+00
t	Th-232	3,03E-12	0,00E+00
t	U-232	3,03E-12	0,00E+00
t	Cm-245	3,03E-12	0,00E+00
t	Am-241	3,03E-12	0,00E+00
t	Np-237	3,03E-12	0,00E+00
t	U-233	3,03E-12	0,00E+00
t	Th-229	3,03E-12	0,00E+00

geologische Einheit	Nuklid	effektiver Diffusionskoeffizient in m²/s	Sorptionskoeffizient in m³/kg
t	Cm-246	3,03E-12	0,00E+00
t	Pu-242	3,03E-12	0,00E+00
t	U-238	3,03E-12	0,00E+00
t	Am-242m	3,03E-12	0,00E+00
t	Pu-238	3,03E-12	0,00E+00
t	U-234	3,03E-12	0,00E+00
t	Th-230	3,03E-12	0,00E+00
t	Ra-226	3,03E-12	0,00E+00
t	Cm-247	3,03E-12	0,00E+00
t	Am-243	3,03E-12	0,00E+00
t	Pu-239	3,03E-12	0,00E+00
t	U-235	3,03E-12	0,00E+00
t	Pa-231	3,03E-12	0,00E+00
t	Ac-227	3,03E-12	0,00E+00
q	Be-10	4,67E-12	0,00E+00
q	C-14	6,73E-12	0,00E+00
q	Cl-36	1,04E-11	0,00E+00
q	Ca-41	4,67E-12	0,00E+00
q	Ni-59	4,67E-12	0,00E+00
q	Ni-63	4,67E-12	0,00E+00
q	Se-79	4,67E-12	0,00E+00
q	Rb-87	1,04E-11	0,00E+00
q	Sr-90	4,67E-12	0,00E+00
q	Zr-93	4,67E-12	0,00E+00
q	Nb-94	4,67E-12	0,00E+00
q	Mo-93	4,67E-12	0,00E+00
q	Tc-99	4,67E-12	0,00E+00
q	Pd-107	4,67E-12	0,00E+00
q	Ag-108m	1,04E-11	0,00E+00
q	Sn-126	4,67E-12	0,00E+00
q	I-129	1,04E-11	0,00E+00
q	Cs-135	1,04E-11	0,00E+00
q	Cs-137	1,04E-11	0,00E+00
q	Sm-147	4,67E-12	0,00E+00
q	Sm-151	4,67E-12	0,00E+00
q	Ho-166m	4,67E-12	0,00E+00
q	Cm-248	4,67E-12	0,00E+00
q	Pu-244	4,67E-12	0,00E+00

geologische Einheit	Nuklid	effektiver Diffusionskoeffizient in m²/s	Sorptionskoeffizient in m³/kg
q	Pu-240	4,67E-12	0,00E+00
q	U-236	4,67E-12	0,00E+00
q	Th-232	4,67E-12	0,00E+00
q	U-232	4,67E-12	0,00E+00
q	Cm-245	4,67E-12	0,00E+00
q	Am-241	4,67E-12	0,00E+00
q	Np-237	4,67E-12	0,00E+00
q	U-233	4,67E-12	0,00E+00
q	Th-229	4,67E-12	0,00E+00
q	Cm-246	4,67E-12	0,00E+00
q	Pu-242	4,67E-12	0,00E+00
q	U-238	4,67E-12	0,00E+00
q	Am-242m	4,67E-12	0,00E+00
q	Pu-238	4,67E-12	0,00E+00
q	U-234	4,67E-12	0,00E+00
q	Th-230	4,67E-12	0,00E+00
q	Ra-226	4,67E-12	0,00E+00
q	Cm-247	4,67E-12	0,00E+00
q	Am-243	4,67E-12	0,00E+00
q	Pu-239	4,67E-12	0,00E+00
q	U-235	4,67E-12	0,00E+00
q	Pa-231	4,67E-12	0,00E+00
q	Ac-227	4,67E-12	0,00E+00

Anhang 6 Begriffsbestimmung der Wirtsgesteine

Anhang 6.1 Anpassung der Begriffsbestimmung „Steinsalz“

Im ersten Schritt des Standortauswahlverfahrens, der Ausweisung von Teilgebieten nach § 13 StandAG, ist zunächst die vereinfachte Annahme getroffen worden, dass sowohl Steinsalz in stratiformer Lagerung als auch Salzstrukturen in steiler Lagerung aus reinem Steinsalz bestehen. In der Realität bestehen sie aus einer Abfolge verschiedener Gesteinstypen. Im Fall von stratiformer Lagerung weisen Salzstrukturen aufgrund ihrer Genese eine natürliche Heterogenität auf. Gesteinstypen in Salzstrukturen in steiler Lagerung wurden im Zuge der Salzstrukturgenese miteinander verfaltet. Für die Ermittlung von Standortregionen für die übertägige Erkundung nach § 14 StandAG, wird der Detailgrad der Betrachtungen erhöht. Hierfür wird die Wirtsgesteinsdefinition angepasst.

Die angepasste Definition ermöglicht eine zielgerichtete Aus- und Bewertung von Informationen aus verfügbaren Bohrungen (Schichtenverzeichnisse, geophysikalische Bohrlochmessungen etc.). Bedingt durch Ablagerungs- und Aufstiegsgeschichte liegen in Salzformationen bereichsweise lithologische Heterogenitäten vor. Es wird festgelegt, welcher Heterogenitätsgrad bezogen auf das Vorhandensein von Zwischenschichten und Einschaltungen im Rahmen der Wirtsgesteinsdefinition zugelassen ist.

Anhang 6.2 Begriffsbestimmung „Steinsalz“

Steinsalz ist Hauptkomponente mit einem Halit-Anteil von mindestens 90 % (z. B. (von Hodenberg et al. 1987)).

Es werden nur Steinsalzhorizonte einer Formation mit einer Mindestmächtigkeit von 100 m betrachtet. Zwischenschichten anderer lithologischer Zusammensetzung sind zulässig, solange die Zwischenschichten die Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht beeinflussen. Für Steinsalz „in stratiformer“ und „steiler Lagerung“ ergeben sich aufgrund der unterschiedlichen Genese abweichende Anforderungen (s. Anhang 6.2.1 und Anhang 6.2.2).

Anhang 6.2.1 Anwendung Steinsalz „in stratiformer Lagerung“

- Die Anforderung, dass Steinsalz als Hauptkomponente vorliegt, gilt als erfüllt, wenn in der petrographischen Beschreibung vorhandener Bohrungen mit Schichtenverzeichnis als Hauptkomponente Halit/Halitit/Steinsalz (^na), Bändersalz (^bds), Fasersalz (^fas) oder vergleichbar (vgl. Okrusch & Matthes 2014) angegeben wird.
- Zwischenschichten anderer lithologischer Zusammensetzung (Anhydrit, Tonstein, Salzton und Kalisalze) sind bis max. 5 % der 100 m mächtigen endlagerrelevanten Steinsalzfolge (Arbeitshypothese) zulässig, sofern die Einzelschichten 3 m Mächtigkeit (Arbeitshypothese) nicht überschreiten. Bei vielen und/oder mächtigen Zwischenschichten besteht ein größeres Risiko der Bildung von Fluidwegsamkeiten (z. B. Popp 2022; Herbert & Schwandt 2007).

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

- Der Einlagerungsbereich darf nicht durch Zwischenschichten anderer lithologischer Zusammensetzung unterbrochen sein, weshalb ein durchgehender, ausreichend mächtiger Bereich (Arbeitshypothese 30 m) mit Steinsalz im Wirtsgesteinsbereich mit Barrierefunktion vorhanden sein muss.
- Die ermittelten Mächtigkeiten beziehen sich immer auf eine bestimmte Steinsalz-Formation (z. B. Staßfurt-Steinsalz) und werden nicht über mehrere Formationen kumuliert.

Anhang 6.2.2 Anwendung Steinsalz „in steiler Lagerung“

- Zwischenschichten anderer lithologischer Zusammensetzung sind zulässig, solange eine Mächtigkeit von über 1 m (Arbeitshypothese) aus Bohrungsdaten nicht überschritten wird. Aufgrund der Genese ist die Unterscheidung zwischen vertikaler und stratigraphischer Mächtigkeit nur bedingt ableitbar.
- Zulässige Zwischenschichten können aus Anhydrit oder Tonstein (Salzton) bestehen.
- Kalium- und Magnesiumsalze dürfen nicht in den 100 m vorkommen, da hier ein erhöhtes Risiko zur Bildung von Fluidwegsamkeiten besteht.

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

Anhang 6.3 Begriffsbestimmung „Tongestein“ (unverändert) (BGE 2020j)

Tongesteine sind klastische Sedimente und Sedimentgesteine, die überwiegend aus Mineralpartikeln kleiner 0,002 mm (Tonfraktion) bestehen (z. B. Heim 1990). Vorwiegend sind Tongesteine aus Tonmineralen aufgebaut, untergeordnete Bestandteile sind Quarz, Karbonate, Feldspäte und Akzessorien wie Eisensulfide (Pyrit, Markasit), Titanoxide (Anatas, Rutil), Eisenoxidhydroxide (Goethit) und Apatit (Phosphorit) sowie Gips und organischer Kohlenstoff (z. B. Heim 1990; Füchtbauer 1988). Je nach Karbonatgehalt werden Tone als Mergelton, Tonmergel, Mergel oder Kalkmergel bezeichnet. Tongesteine mit ihrer charakteristischen Korngrößenverteilung sind meist durch den Absatz von Partikeln aus aquatischen Transportmedien entstanden. Aquatischer Transport von Ton erfolgt als Schwebfracht sowohl in terrestrischer Umgebung (Flüsse und Seen) als auch marin (Küsten/Schelf und Tiefsee) (z. B. Füchtbauer 1992).

Die guten Eigenschaften als Barriere- bzw. Wirtsgestein bei der Endlagerung hochradioaktiver Abfälle sind im Wesentlichen auf die fein- bzw. feinstkörnige Textur der Tongesteine sowie auf deren mineralogische Zusammensetzung zurückzuführen. Tongesteine weisen durch ihre Zusammensetzung eine geringe Permeabilität und niedrige Durchlässigkeitsbeiwerte auf (siehe z. B. Bryant 2003; Katsube & Connell 1998; Neuzil 1994). Sie wirken als chemische Puffer und besitzen aufgrund ihrer großen spezifischen Oberfläche ein sehr hohes Sorptionsvermögen für Radionuklide (Müller-Vonmoos & Kohler 1993) sowie ein sehr geringes Lösungsverhalten. Bei niedrigem Diagenese-/Verfestigungsgrad haben sie eine hohe Plastizität und sind bei entsprechenden Gehalten an Dreischicht-Tonmineralen quellfähig durch Wasseraufnahme (Müller-Vonmoos & Kohler 1993).

Die Barriereeigenschaften des Tongesteins werden wesentlich durch das Verhältnis, in dem die verschiedenen Tonminerale (z. B. Kaolin-Minerale, Illite, Montmorillonite/Smektite, Chlorite, Vermikulite) zueinander auftreten, sowie durch das Verhältnis von Tonmineralen zu anderen Mineralen (z. B. Feldspat, Quarz) und deren Korngrößen bestimmt (siehe z. B. Reuter 1985; Kohler & Ustrich 1988; Bryant 2003). Ebenso sind petrophysikalische und geomechanische Eigenschaften der Tongesteine abhängig von der Versenkungsgeschichte und der damit verbundenen mechanischen sowie physikochemischen Kompaktion/Verfestigung, Mineralumwandlung und Zementation (Worden & Burley 2003).

Laut § 23 Abs. 5 Nr. 1 StandAG müssen die einschlusswirksamen Gebirgsbereiche eines Endlagersystems eine Gebirgsdurchlässigkeit mit k_f-Werten von kleiner als 10^{-10} m/s aufweisen. Entsprechend § 23 Abs. 5 Nr. 5 StandAG dürfen keine Erkenntnisse oder Daten vorliegen, welche den Erhalt der Barrierewirkung gemäß § 23 Abs. 5 Nr. 5 StandAG zweifelhaft erscheinen lassen. Im StandAG werden die Termini Tongestein und Tonstein synonym verwendet. Daher definiert die Vorhabenträgerin BGE plastische „Tone“ und diagenetisch verfestigte „Tonsteine“ zusammen als „Tongestein“.

Zu den weniger günstigen Eigenschaften von Tongestein als potenziellem Wirtsgestein gehört der irreversible Verlust des Rückhaltevermögens bei zu hohen Temperaturen.

Als Tongesteinsformation und Tongesteinsabfolge werden im Folgenden Gesteinsformationen bezeichnet, die überwiegend aus Tongesteinen bestehen, aber noch zusätzlich andere Gesteine wie

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

z. B. Sandsteine oder Karbonatgesteine enthalten. Tongesteinsformationen werden somit nicht ausschließlich durch Tongesteine charakterisiert; eingeschlossen werden damit auch Ton-dominierte Vertreter aus der kontinuierlichen Reihe Kalkstein-Mergel-Tonstein. Nicht zu den endlagerrelevanten Tongesteinen zählen die Tonschiefer, bei denen es sich um metamorphe Tonsteine handelt, die nicht nach Schichtflächen, sondern nach Schieferungsflächen ablösen.

Aufgrund ihrer günstigen Eigenschaften für die Endlagerung radioaktiver Abfälle wurden und werden international sowohl unverfestigte bzw. teilverfestigte Tone wie z. B. die Boom Clay Formation (siehe dazu Honty & De Craen 2012; OECD 2003) und die Ypresian Clay Formation (van Marcke & Laenen 2005) als auch verfestigte Tonsteine wie z. B. der Opalinuston in der Schweiz (siehe dazu Nagra 2001, 2002d) sowie Tonsteine des Callovium-Oxfordium in Frankreich (siehe dazu Andra 2005b) in Untertagelaboren erforscht.

Anhang 6.4 Begriffsbestimmung „Kristallines Wirtsgestein“ (unverändert) (BGE 2020j)

Im Weiteren werden nicht die im StandAG gebrauchten Begriffe „Kristallin“ und „Kristallingestein“ auf die Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen angewendet, sondern diese mit der Bezeichnung „kristalline Wirtsgesteine“ spezifiziert und ersetzt.

Kristalline Wirtsgesteine sind nach Auffassung der BGE

- Plutonite entsprechend der Klassifikation nach (Streckeisen 1974, 1976); (siehe Abbildung A. 18) und
- hochgradig regionalmetamorphe Gesteine der Fazies Amphibolit, Eklogit und Granulit nach Eskola (1915), zu welchen u. a. Gneise und Migmatite gezählt werden (siehe Abbildung A. 19).

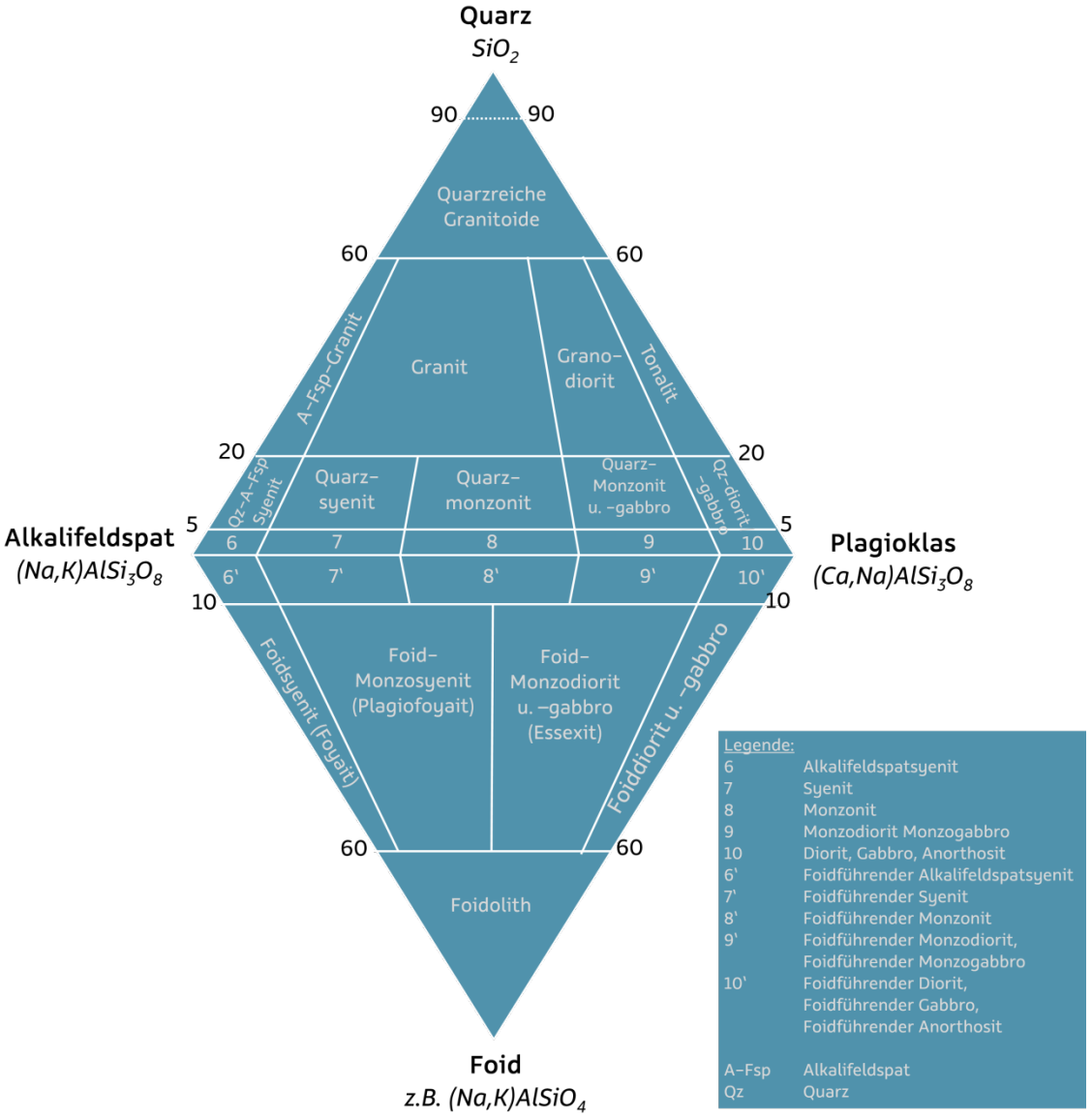


Abbildung A. 18: IUGS-Klassifikation der Plutonite im Streckeisen-Diagramm; aus (Okrusch & Matthes 2014).
Alle hier dargestellten Plutonite werden für ein Endlager im Kristallingestein herangezogen.

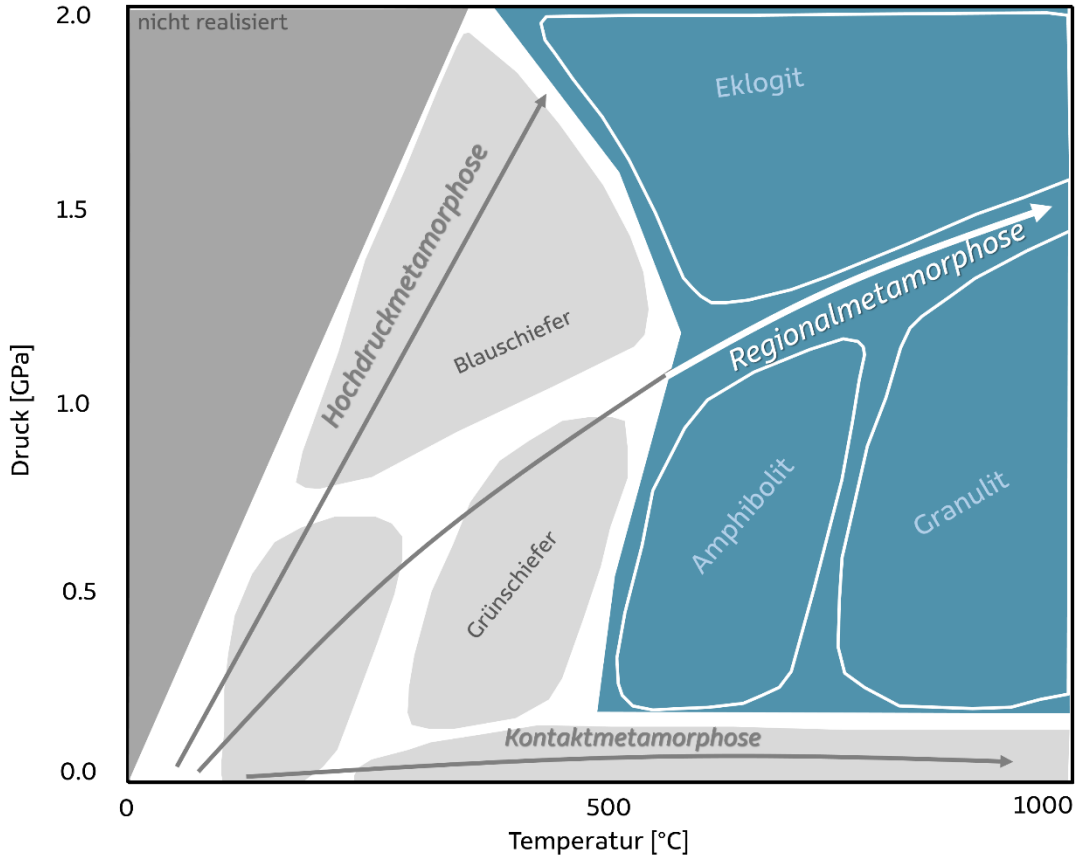


Abbildung A. 19: Druck-Temperatur-Diagramm der metamorphen Mineralfazies (nach Bucher & Grapes (2011)).
Das blaue Feld zeigt das Stabilitätsfeld der hochgradigen Regionalmetamorphose an, welches kristallines Wirtsgestein hervorbringen kann.

Plutonite zählen zu den magmatischen Gesteinen und sind in der tiefen Erdkruste langsam auskristallisiert. Sie weisen die gleiche chemische und mineralogische Zusammensetzung wie die feinkörnigeren Vulkanite auf, doch haben diese noch heißen, plutonische Magmen vor ihrer Erstarrung nicht die Erdoberfläche erreicht. Plutonite gelangen erst durch Erosion darüber liegender Gesteinsschichten oder durch Hebungsprozesse während der Tektonik an die Erdoberfläche.

Hochgradig regionalmetamorphe Gesteine waren relativ hohen Drücken (größer als 0,3 GPa) und Temperaturen (größer als 500 °C) ausgesetzt (Abbildung A. 19), bei denen es zur charakteristischen Mineralumwandlung gekommen ist, ohne dabei das Ausgangsgestein gänzlich aufzuschmelzen. Ausgangsgesteine können Sedimentgesteine, Magmatite oder auch andere Metamorphite sein.

Vulkanite und gering bis mittelstark regionalmetamorph beanspruchte Gesteine sowie Hochdruck- und Kontaktmetamorphite (speziell Phyllite, Hornfelse und Schiefer) sind nach Auffassung der BGE keine kristallinen Wirtsgesteine entsprechend § 23 Abs. 1 S. 1 StandAG.

Bei den endlagerrelevanten Eigenschaften potenzieller Wirtsgesteine zählen beim Kristallingestein u. a. hohe Festigkeiten, sehr geringes Lösungsverhalten und hohe Temperaturbelastbarkeit zu den „günstigen Eigenschaften“ (BGR 2007; Lersow 2018). Die Temperaturbelastbarkeit in Bezug auf die

zugeführte Nachzerfallswärme durch die eingelagerten hochradioaktiven Abfälle schafft Sicherheit, dass sich die initial festgestellten Eigenschaften durch die zugeführte Wärme nicht oder kaum verändern. Viele der Kristallingesteine, die nicht Plutonite oder hochgradig regionalmetamorphe Gesteine sind, weisen diese Eigenschaften nicht auf und können die Integrität der Barrierewirkung für den Nachweiszeitraum von einer Million Jahren (§ 23 Abs. 5 Nr. 5 StandAG) nicht sicher gewährleisten.

Kompakte, ungestörte Gesteinskomplexe bestehend aus Plutoniten oder hochgradig regionalmetamorphen Gesteinen besitzen die o. g. günstigen Eigenschaften im Sinne einer Eignung als Wirtsgestein für ein Endlager gemäß StandAG und erfüllen damit die Mindestanforderungen nach § 23 Abs. 5 StandAG. Mikrorisse und Kluftnetze in den Gesteinen können die Gebirgsdurchlässigkeit erhöhen und die Barrierewirkung herabsetzen und sind weniger günstig für die Endlagerung. Eine Bewertung der Gebiete hinsichtlich dieser Aspekte kann erst mit Hilfe standortspezifischer Untersuchungen erfolgen. Zum derzeitigen Stand des Standortauswahlverfahrens werden jene Mindestanforderungen als erfüllt angesehen.

Lersow (2018) hält fest, dass Kristallingesteine, so auch Plutonite, eine hohe mechanische Standfestigkeit bieten, wobei sie andererseits gleichzeitig häufig von wasserführenden Klüften durchzogen sind. Domenico & Schwartz (1990) geben Mittelwerte für Gebirgsdurchlässigkeiten von ungestörten magmatischen und metamorphen Gesteinen im Bereich von 10^{-14} bis 10^{-10} m/s an. Im geklüfteten Zustand sind diese Gesteine durch eine größere Durchlässigkeit gekennzeichnet (10^{-9} m/s bis 10^{-4} m/s). In diesen Fällen müssen technische und geotechnische Barrieren den sicheren Einschluss von radioaktiven Abfällen für den Nachweiszeitraum gewährleisten.

Gneise gehen regionalmetamorph oberhalb von 600 °C u. a. aus Graniten hervor. Diese Gesteine fallen zwar unter die geschieferten Metamorphite (Markl 2015), werden aber trotzdem im internationalen Raum als Wirtsgestein berücksichtigt (z. B. Aaltonen et al. 2010; Whiterspoon & Bodvarsson 2001; Svensk Kärnbränslehantering AB 2000). Die BGE behandelt Gneise als kristallines Wirtsgestein.

Migmatite sind partiell aufgeschmolzene Gesteine. In der kontinentalen Erdkruste ist es ein verbreitetes Gestein, das aus deutlich unterscheidbaren, nach Mineralbestand und Gefüge verschiedenen Anteilen besteht. Ein Teil ist als metamorphes Gestein anzusprechen, während der andere Teil typische Merkmale von Magmatiten zeigt.

Literaturverzeichnis

Aaltonen, I., Lahti, M., Engström, J., Mattila, J., Paananen, M., Paulamäki, S., Gehor, S., Kärki, A., Ahokas, T., Torvela, T. & Front, K. (2010): *Geological Model of the Olkiluoto Site - Version 2*. Posiva Working Report Posiva Oy, Eurajoki

ABBergV: Allgemeine Bundesbergverordnung vom 23. Oktober 1995 (BGBl. I S. 1466), die zuletzt durch Artikel 4 der Verordnung vom 18. Oktober 2017 (BGBl. I S. 3584) geändert worden ist

ABVO: Allgemeine Bergverordnung über Untertagebetriebe, Tagebaue und Salinen vom 2. Februar 1966

Achtziger-Zupančič, P., Loew, S. & Hiller, A. (2017): *Factors controlling the permeability distribution in fault vein zones surrounding granitic intrusions (Ore Mountains/Germany)*. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, Bd. 122, S. 1876-1899. ISSN 2169-9313. DOI: https://doi.org/10.1002/2016JB013619

Achtziger-Zupančič, P., Loew, S., Hiller, A. & Mariethoz, G. (2016): *3D fluid flow in fault zones of crystalline basement rocks (Poehla-Tellerhaeuser Ore Field, Ore Mountains, Germany)*. Geofluids, Bd. 16, S. 688-710. ISSN 1468-8115. DOI: https://doi.org/10.1111/gfl.12192

Agemar, T., Alten, J.-A., Ganz, B., Kuder, J., Kühne, K., Schumacher, S. & Schulz, R. (2014a): *The Geothermal Information System for Germany – GeotIS*. Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, Bd. 165, S. 129-144. DOI: 10.1127/1860-1804/2014/0060

Agemar, T., Schellschmidt, R. & Schulz, R. (2012): *Subsurface temperature distribution in Germany*. Geothermics, Bd. 44, S. 65-77. ISSN 03756505. DOI: https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2012.07.002

Agemar, T., Weber, J. & Schulz, R. (2014b): *Deep Geothermal Energy Production in Germany*. Energies, Bd. 7, S. 4397-4416. ISSN 19961073. DOI: 10.3390/en7074397

Ahlbom, K., Albino, B., Carlsson, L., Danielsson, J., Nilsson, G., Olsson, O., Sehlstedt, S., Stejskal, V. & Stenberg, L. (1983a): *Evaluation of the geological, geophysical and hydrogeological conditions at Kamlunge*. SKBF-KBS-TR-83-54. Swedish Nuclear Fuel Supply Co. Stockholm, Sweden

Ahlbom, K., Albino, B., Carlsson, L., Nilsson, G., Olsson, O., Stenberg, L. & Timje, H. (1983b): *Evaluation of the geological, geophysical and hydrogeological conditions at Gideå*. SKBF-KBS-TR-83-53. Swedish Nuclear Fuel Supply Co. Stockholm, Sweden

Ahlbom, K., Carlsson, L., Carlsten, L.-E., Duran, O., Larsson, N.-Å. & Olsson, O. (1983c): *Evaluation of the geological, geophysical and hydrogeological conditions at Fjällveden*. SKBF-KBS-TR-83-52. Swedish Nuclear Fuel Supply Co. Stockholm, Sweden

Ahlbom, K., Carlsson, L., Gentzschein, B., Jämtlid, A., Olsson, O. & Tirén, S. (1983d): *Evaluation of the geological, geophysical and hydrogeological conditions at Svartboberget*. SKBF-KBS-TR-83-55. Swedish Nuclear Fuel Supply Co. Stockholm, Sweden

AkEnd (2002): *Auswahlverfahren für Endlagerstandorte: Empfehlungen des AkEnd – Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte*. Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe. Köln

Alfarra, A., Bertrams, N., Bollingerfehr, W., Eickemeier, R., Flügge, J., Frenzel, B., Maßmann, J., Mayer, K.-M., Mönig, J., Mrugalla, S., Müller-Hoeppe, N., Reinhold, K., Rübel, A., Schubarth-Engelschall, N., Simo, E., Thiedau, J., Thiemeyer, T., Weber, J. R. & Wolf, J. (2020a): *Grundlagen zur Bewertung eines Endlagersystems in einer Tongesteinsformation geringerer Mächtigkeit (T2) - Entwurf Stand 03.04.2020*. Ergebnisse aus dem Vorhaben RESUS. BGE

TECHNOLOGY GmbH, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH. Braunschweig. ISBN 978-3-94768558-5

Alfarra, A., Bertrams, N., Bollingerfehr, W., Eickemeier, R., Flügge, J., Frenzel, B., Maßmann, J., Mayer, K.-M., Mönig, J., Mrugalla, S., Müller-Hoeppe, N., Reinhold, K., Rübel, A., Schubarth-Engelschall, N., Simo, E., Thiedau, J., Thiemeyer, T., Weber, J. R. & Wolf, J. (2020b): *Grundlagen zur Bewertung eines Endlagersystems in einer Tongesteinsformation größerer Mächtigkeit (T1) - Entwurf Stand 03.04.2020*. Ergebnisse aus dem Vorhaben RESUS. BGE TECHNOLOGY GmbH, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH. Braunschweig

Allia, V. (1996): *Sedimentologie und Ablagerungsgeschichte des Opalinustons in der Nordschweiz*. Dissertation, Universität Basel, Geologisch-Paläontologisches Institut., S. 185, Basel,

Amann, F. & Löw, S. (2009): *Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager: Beurteilung und Anwendung der bautechnischen Auswahlkriterien*. Expertenbericht im Rahmen der Beurteilung des Vorschlags geologische Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager, Etappe 1, Sachplan geologische Tiefenlager. Ingenieurgeologie der ETH Zürich. Zürich, Schweiz

Amann, F. & Löw, S. (2016): *Beurteilung der nachgereichten geologischen und felsmechanischen Unterlagen zur maximalen Tiefenlage*. Expertenbericht im Rahmen der Beurteilung des Vorschlags von mindestens zwei geologischen Standortgebieten pro Lagertyp, Etappe 2, Sachplan geologische Tiefenlager. Expertenbericht (ENSI 33/531). ETH Zürich, Professur für Ingenieurgeologie. Zürich, Schweiz

Andra (2005a): *Dossier 2005 Argile - Tome "Safety evaluation of a geological repository"*. Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs. Châtenay-Malabry, France

Andra (2005b): *Dossier 2005 Argile – Tome «Évolution phénoménologique du stockage géologique»*. Andra. o. O.

Andra (2005c): *Dossier 2005 Argile Synthesis: Evaluation of the feasibility of a geological repository in an argillaceous formation*. Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs. Haute-Marne, France

Andra (2005d): *Dossier 2005 Granite Tome - Safety analysis of a geological repository*. Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs. Châtenay-Malabry Cedex, France

Andra (2016a): *Cigeo - Proposed Operations Master Plan (PDE)*. CG-TE-D-NTE-AMOA-SDR-0000-15-0063. Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs. o. O.

Andra (2016b): *Safety Options Report - Operating Part (DOS-Expl)*. CG-TE-D-NTE-AMOA-SR1-0000-15-0060. Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs. o. O.

Andra (2020): *The Cigeo Project - France's Industrial Centre for Geological Disposal of radioactive waste*. Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs. Châtenay-Malabry, France

Armand, G., Zghondi, R., de La Vaissière, R., Cornet, J. & Jaber, J. (2021): *Outcome from the Meuse/Haute-Marne Underground Research Laboratory on the behaviour of Callovo-Oxfordian claystone to different excavation technics: From the rock to the structure*. In:°o. E. (Hrsg.): *Tage der Standortauswahl* Online, 11.+12.02.2021. TU Bergakademie Freiberg

AtG: Atomgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 15. Juli 1985 (BGBl. I S. 1565), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 10. August 2021 (BGBl. I S. 3530) geändert worden ist

Babuška, V., Plomerová, J. & Fischer, T. (2007): *Intraplate seismicity in the western Bohemian Massif (central Europe): A possible correlation with a paleoplate junction*. Journal of Geodynamics, Bd. 44, S. 149-159. ISSN 02643707. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jog.2007.02.004

Baeyens, B., Thoenen, T., Bradbury, M. H. & Marques Fernandes, M. (2014): *Sorption Data Bases for Argillaceous Rocks and Bentonite for the Provisional Safety Analyses for SGT-E2*. Technical Report 12-04. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra). Wettingen, Switzerland

Baltes, B. & Röhlig, K.-J. (2004): *Development of safety criteria in Germany: aim, process and experiences*. In: *Management of Uncertainty in Safety Cases and the Role of Risk*, Stockholm, Sweden, 2.-4.02.2004. Paris, France: OECD Nuclear Energy Agency. ISBN 9264008780

Balzer, D., Reichenbach, W. & Zeibig, S. (2020): *Staßfurt-Salz: Staßfurt-Steinsalz und Kaliflöz Staßfurt*. In: Deutsche Stratigraphische Kommission (Hrsg.): Stratigraphie von Deutschland XII: Zechstein. S. 257-262, Heft 89, Berlin: DGGV. ISBN 9783510492411

Bandemer, H. & Gottwald, S. (1995): *Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, Fuzzy Methods with Applications*. o. O.: Wiley. ISBN 0471956368

Bär, K., Reinsch, T. & Bott, J. (2020): *The PetroPhysical Property Database (P3) – a global compilation of lab-measured rock properties*. Earth System Science Data, Bd. 12, S. 2485-2515. DOI: https://doi.org/10.5194/essd-12-2485-2020

Baranyi, I., Lippolt, H. J. & Todt, W. (1976): *Kalium-Argon-Altersbestimmungen an tertiären Vulkaniten des Oberrheingraben-Gebietes: II. Die Alterstraverse vom Hegau nach Lothringen.* Oberrheinische Geologische Abhandlungen, Bd. 25, S. 41-62. ISSN 00782939

Batzle, M. L. & Wang, Z. (1992): *Seismic properties of pore fluids*. Geophysics, Bd. 57, S. 1396-1408. DOI: 10.1190/1.1443207

Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU) (2019): *Hydrogeologische Karte* 1:100.000. Augsburg: Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU).

Becker, D.-A., Bertrams, N., Bollingerfehr, W., Eickenmeier, R., Flügge, J., Frenzel, B., Maßmann, J., Mayer, K.-M., Mönig, J., Mrugalla, S., Müller-Hoeppe, N., Reinhold, K., Rübel, A., Schubarth-Engelschall, N., Simo, E., Thiedau, J., Thiemeyer, T., Weber, J. R. & Wolf, J. (2020): *Grundlagen zur Bewertung eines Endlagersystems in einer Kristallingesteinsformation mit mehreren einschlusswirksamen Gebirgsbereichen (K1) - Entwurf Stand 03.04.2020*. Ergebnisse aus dem Vorhaben RESUS. BGE TECHNOLOGY GmbH, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH. Braunschweig

Beer, M., Ferson, S. & Kreinovich, V. (2013): *Imprecise probabilities in engineering analyses*. Mechanical Systems and Signal Processing, Bd. 37, S. 4-29. ISSN 08883270. DOI: 10.1016/j.ymssp.2013.01.024

Behr, H.-J., Dürbaum, H.-J., Bankwitz, P., Bankwitz, E., Benek, R., Berger, H.-J., Brause, H., Conrad, W., Foerste, K., Frischbutter, A., Gebrande, H., Giese, P., Göthe, W., Gürtler, J., Hänig, D., Haupt, M., Heinrichs, T., Horst, W., Hurtig, E., Kämpf, H., Kramer, W., Krentz, O., Lang, M., Lorenz, W., Lück, E., Müller, H. J., Raab, S., Rabbel, W., Rauche, H., Ritter, E., Schulze, A., Schwarz, G., Seifert, W., Springer, M., Tauber, S. & Trzebski, R. (1994): *Crustal structure of the Saxothuringian Zone: Results of the deep seismic profile MVE-90 (East)*. Zeitschrift für geologische Wissenschaften, Bd. 22, S. 647-770

Berger, H.-J., Brause, H., Leonhardt, D. & Linnemann, U. (2011a): *Baueinheiten des Grundgebirgsstockwerkes: Neoproterozoikum: Elbezone*. In: W. Pälchen & H. Walter (Hrsg.): Geologie von Sachsen I: Geologischer Bau und Entwicklungsgeschichte. 2. Aufl., S. 28-31, Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 9783510652709

Berger, H.-J., Brause, H. & Linnemann, U. (2011b): *Baueinheiten des Grundgebirgsstockwerkes: Die cadomische tektonometamorph-magmatische Entwicklung*. In: W. Pälchen & H. Walter (Hrsg.): Geologie von Sachsen I: Geologischer Bau und Entwicklungsgeschichte. 2. Aufl., S. 40-51, Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 9783510652709

Berger, H.-J., Brause, H. & Linnemann, U. (2011c): *Baueinheiten des Grundgebirgsstockwerkes: Frühpaläozoische tektonometamorph-magmatische Entwicklung*. In: W. Pälchen & H. Walter (Hrsg.): Geologie von Sachsen I: Geologischer Bau und Entwicklungsgeschichte. 2. Aufl., S. 88-91, Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 9783510652709

Berger, H.-J., Felix, M., Görne, S., Koch, E., Krentz, O., Förster, A., Förster, H.-J., Konietzky, H., Lunow, C., Walter, K., Schütz, H., Stanek, K. & Wagner, S. (2011d): *Tiefengeothermie Sachsen*. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG). Dresden

Bertrams, N., Bollingerfehr, W., Dörr, S., Filbert, W., Simo, E., Fahland, S., J., H., Heusermann, S., Kühnlenz, T., Mrugalla, S., Reinhold, K., Buhmann, D., Kindlein, J., Mönig, J., Wolf, J., Minkley, W. & Popp, T. (2015): *Konzeptentwicklung für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle in flach lagernden Salzschichten in Deutschland sowie Entwicklung und Überprüfung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes KOSINA* Zwischenbericht Dezember 2015 FKZ 02E11395/02E11405/TEC-37-2015-Z DBETEC, BGR, GRS, IfG. Peine

Bertrams, N., Bollingerfehr, W., Eickemeier, R., Fahland, S., Flügge, J., Frenzel, B., Hammer, J., Kindlein, J., Liu, W., Maßmann, J., Mayer, K.-M., Mönig, J., Mrugalla, S., Müller-Hoeppe, N., Reinhold, K., Rübel, A., Schubart-Engelschall, N., Simo, E., Thiedau, J., Thiemeyer, T., Weber, J. R. & Wolf, J. (2020a): *Grundlagen zur Bewertung eines Endlagersystems in steil lagernden Salzformationen - Abschlussbericht*. RESUS. GRS - 569. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) GmbH, BGE TECHNOLOGY GmbH, Bundesanstalt für Geologie und Rohstoffe (BGR). Braunschweig. ISBN 9783947685554

Bertrams, N., Bollingerfehr, W., Eickemeier, R., Fahland, S., Flügge, J., Frenzel, B., Hammer, J., Kindlein, J., Liu, W., Maßmann, J., Mayer, K.-M., Mönig, J., Mrugalla, S., Müller-Hoeppe, N., Reinhold, K., Rübel, A., Schubarth-Engelschall, N., Simo, E., Thiedau, J., Thiemeyer, T., Weber, J. R. & Wolf, J. (2020b): *Grundlagen zur Bewertung eines Endlagersystems in flach lagernden Salzformationen bei einer höheren Auslegungstemperatur*. RESUS. GRS - 570. BGE TECHNOLOGY GmbH, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH. Braunschweig. ISBN 9783947685561

Bertrams, N., Herold, P., Herold, M., Krone, J., Lommerzheim, A., Prignitz, S. & Simo Kuate, E. (2017): *Entwicklung eines technischen Konzeptes für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle und ausgediente Brennelemente im Kristallingestein in Deutschland*. KONEKD. Abschlussbericht TEC-20-2017-AB. DBE Technology GmbH. Peine

Bertrams, N., Herold, P., Leonhardt, J., Marggraf, U., Seidel, D. & Wunderlich, A. (2021): *Weiterentwicklung der Konzepte der Transport- und Einlagerungstechnik von Endlagerbehältern*. TREND. BGE TEC 2021-01. BGE TECHNOLOGY GmbH. Peine

Beuth, T., Bracke, G., Buhmann, D., Dresbach, C., Keller, S., Krone, J., Lommerzheim, A., Mönig, J., Mrugalla, S., Rübel, A. & Wolf, J. (2012): *Szenarienentwicklung: Methodik und*

Anwendung. Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS - 284. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), DBE Technology GmbH, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH. Köln. ISBN 9783939355601

Beuth, T., Orzechowski, J., Stolzenberg, G., Wollrath, J., Mrugalla, S., Weber, J. R., Böttcher, I., Lommerzheim, A., Bracke, G., Mönig, J., Rübel, A., Wolf, J., Metz, V., Schäfer, T., Chaudry, S., Plischke, E. & Röhlig, K.-J. (2016): *Position des Arbeitskreises zum Thema: Anforderungen an die Methode zur Ableitung von Szenarien für ein Endlager für radioaktive Abfälle*. atw, Bd. 61, S. 678-683. ISSN 14315254

BFE (2008): *Sachplan geologischer Tiefenlager*. Bundesamt für Energie (BFE). Ittigen, Schweiz

BFE (2018): *Ergebnisbericht zu Etappe 2: Festlegungen und Objektblätter*. Sachplan geologische Tiefenlager. Bundesamt für Energie (BFE). Bern, Schweiz

BfS (2002): *Genehmigung zur Aufbewahrung von Kernbrennstoffen im Standort-Zwischenlager im Ortsteil Bramsche der Stadt Lingen der Kernkraftwerke Lippe-Ems GmbH*. Bundesamt für Strahlenschutz (BfS). Salzgitter

BGE (2018a): *Arbeitshilfen zur Datenabfrage Mindestanforderung vom 19.03.2018 (Abfrage der Daten für die Anwendung der Mindestanforderungen gemäß Standortauswahlgesetz)*. Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE). https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Standortsuche/Wesentliche_Unterlagen/Arbeitshilfen/20180319_Abfrage_der_Daten_fuer_die_Anwendung_der_Mindestanforderungen_gemaess_Standortauswahlgesetz.pdf

BGE (2020a): *Arbeitshilfe zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien im Rahmen von § 13 StandAG*. Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE). https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Standortsuche/Wesentliche_Unterlagen/Methodensteckbriefe_fuer_Forum/20200506_3_Endfassung_Arbeitshilfe_zur_Anwendung_der_geowissenschaftlichen_Abwaegungskriterien_im_AStV.pdf

BGE (2020af): *Glossar der BGE zum Standortauswahlverfahren*. Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH

BGE (2020b): *Referenzdatensätze zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien im Rahmen von § 13 StandAG - Grundlagen*. Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE). https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Standortsuche/Wesentliche_Unterlagen/Methodensteckbriefe_fuer_Forum/20200506_2_Endfassung_Referenzdatensaetze_zur_Anwendung_der_geowissenschaftlichen_Abwaegungskriterien_im_Rahmen_von____13_StandAG_im_AStV_2_.pdf

BGE (2020ci): *Vorgehensweise bei der Bewertung der Indikatoren „Überdeckung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs mit grundwasserhemmenden Gesteinen, Verbreitung und Mächtigkeit grundwasserhemmender Gesteine im Deckgebirge“ und „Verbreitung und Mächtigkeit erosionshemmender Gesteine im Deckgebirge des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ des Kriteriums zur Bewertung des Schutzes des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durch das Deckgebirge (Anlage 11 (zu § 24 Abs. 5) StandAG) im Rahmen von § 13 StandAG. Ergänzende Erläuterungen zur untersetzenden Unterlage „Teilgebiete und Anwendung Geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“* Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH. https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/20201211_Ergaenzende_Erlaeuterungen_zur_Vorgehensweise_zur_Anwendung_von_Anlage_11_StandAG.pdf

BGE (2020g): *Zwischenbericht Teilgebiete gemäß § 13 StandAG*. Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH.

https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Standortsuche/Wesentliche_Unterlagen/Zwischenbericht_Teilgebiete/Zwischenbericht_Teilgebiete_barrierefrei.pdf

BGE (2020h): *Anwendung Ausschlusskriterien gemäß § 22 StandAG. Untersetzende Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete*. Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH. https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Standortsuche/Wesentliche_Unterlagen/Zwischenbericht_Teilgebiete/Anwendung_Ausschlusskriterien_gemaess___22_StandAG__Untersetzende_Unterlage_des_Zwischenberichts_Teilgebiete__Rev._001.pdf

BGE (2020j): *Anwendung Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG. Untersetzende Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete*. Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH. https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Standortsuche/Wesentliche_Unterlagen/Zwischenbericht_Teilgebiete/Anwendung_MA_gemaess___23_StandAG_Rev._001_barrierefrei.pdf

BGE (2020k): *Teilgebiete und Anwendung Geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG. Untersetzende Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete*. Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH. https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Standortsuche/Wesentliche_Unterlagen/Zwischenbericht_Teilgebiete/Teilgebiete_und_Anwendung_Geowissenschaftliche_Abwaegungskriterien_gemaess__24_StandAG__Untersetzende_Unterlage_zum_Zwischenbericht_Teilgebiete_.pdf

BGE (2021b): *Grundlegende Anforderungen an Endlagerbehälter für hochradioaktive Abfälle* Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH. https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Standortsuche/Wesentliche_Unterlagen/Methodik/Phase_I_Schritt_2/Grundlegende_Anforderungen_an_Endlagerbehaelter_fuer_hochradioaktive_Abfaelle_REV00_barrierefrei.pdf

BGE (2021e): *Steckbrief für Forschungsvorhaben: Berücksichtigung subglazialer Erosionsprozesse bei Auswahl eines Standortes für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle*. Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH. https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Standortsuche/Forschung/20210818_Steckbrief_Suchtiefe_barrierefrei.pdf

BGE (2021f): *Steckbrief für Forschungsvorhaben: Quantifizierung und Prognose von Erosionsprozessen in Deutschland*. Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH. https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Standortsuche/Forschung/2021-12-20_BGE_Steckbrief_Forschungsvorhaben_Quantifizierung_und_Prognose_von_Erosionsprozessen_barrierefrei.pdf

BGE (2021g): *Steckbrief für Forschungsvorhaben: Neotektonische Aktivität in Mittel- und Süddeutschland*. Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH. https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Standortsuche/Forschung/2021-12-09_BGE_Steckbrief_Forschungsvorhaben_Neotektonische_Aktivitaet_in_Mittel-_und_Sueddeutschland_barrierefrei_1_.pdf

BGE (2022a): *Konzept zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung*. Peine: BGE

BGR (2007): *Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland. Untersuchung und Bewertung von Regionen mit potenziell geeigneten Wirtsgesteinsformationen*. Geotechnische Bericht. Hannover/Berlin: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe.

BGR (2021): *3D Modell des tieferen Untergrundes des Norddeutschen Beckens*. [Umweltportal]: Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz. Zugriff am:

22.12.2021. Verfügbar unter https://numis.niedersachsen.de/trefferanzeige?docuuid=8b70fe0f-0b03-477b-a3cd-c0f13a2c41b2&plugid=/ingrid-group:iplug-csw-dsc-bgr&docid=lwEZCngBp3e9lFohOF1-

BGR, LAGB, LBEG, LBGR, LLUR & LUNG (2021): *3D-Strukturmodell des Norddeutschen Becken – Projekt (TUNB). Version 2021*. [Internet Website]: bgr.de. Zugriff am: 10.08.2021. Verfügbar unter https://gst.bgr.de

Bilke, L., Flemisch, B., Kalbacher, T., Kolditz, O., Helmig, R. & Nagel, T. (2019): *Development of Open-Source Porous Media Simulators: Principles and Experiences*. Transport in Porous Media, Bd. 130, S. 337-361. ISSN 1573-1634. DOI: 10.1007/s11242-019-01310-1

Bjorge, M., Kreye, P., Heim, E., Wellmann, F. & Rühaak, W. (2022): *The role of geological models and uncertainties in safety assessments*. Environmental Earth Sciences, Bd. 81, S. 1-10. DOI: 10.1007/s12665-022-10305-z

Blum, P., Mackay, R., Riley, M. S. & Knight, J. L. (2005): *Performance assessment of a nuclear waste repository: Upscaling coupled hydro-mechanical properties for far-field transport analysis*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Bd. 42, S. 781-792. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2005.03.015

Blümling, P., Bernier, F., Lebon, P. & Martin, C. D. (2007): *The excavation damaged zone in clay formations time-dependent behaviour and influence on performance assessment*. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, Bd. 32, S. 588-599. DOI: 10.1016/j.pce.2006.04.034

BMU (1997): RS-Handbuch 3-53: Richtlinie für den Inhalt der Fachkundeprüfung des verantwortlichen Schichtpersonals in Forschungsreaktoren vom 14. November 1997 (GMBl. 1997, Nr. 42)

BMU (2010): *Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle*. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Bonn

BMU (2019): *Zuständigkeit Behälterentwicklung*. [Internetadresse]. Bonn: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. Zugriff am: 23.02.2022. Verfügbar unter https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Standortsuche/Wesentliche_Unterlagen/05_-_Meilensteine/20190913_Schreiben_vom_BMU_Zustaendigkeit_Behaelterentwicklung_1_.pdf

BMU (2020): *Bericht der Bundesregierung für die siebte Überprüfungskonferenz im Mai 2021 zur Erfüllung des Gemeinsamen Übereinkommens über die Sicherheit der Behandlung abgebrannter Brennelemente und über die Sicherheit der Behandlung radioaktiver Abfälle*. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. Bonn

BMU (2021a): *Neue Lösung für Rücknahme radioaktiver Abfälle aus Frankreich*. [Internetadresse]: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. Zugriff am: 15.12.2021. Verfügbar unter https://www.bmu.de/meldung/neue-loesung-fuer-ruecknahme-radioaktiver-abfaelle-aus-frankreich/

BMU (2021b): *Verzeichnis radioaktiver Abfälle (Bestand zum 31. Dezember 2019 und Prognose)*. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. Berlin

BMUB (2013): *Verzeichnis radioaktiver Abfälle - Bestand zum 31. Dezember 2013 und Prognose*. K-MAT 13. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Bonn

BMUB (2015a): *Programm für eine verantwortungsvolle und sichere Entsorgung bestrahlter Brennelemente und radioaktiver Abfälle (Nationales Entsorgungsprogramm)*. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Bonn

BMUB (2015b): Sicherheitsanforderungen an Kernkraftwerke

BMUB (2018): *Report of the Federal Republic of Germany for the Sixth Review Meeting in May 2018*. Joint Convention of the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Bonn

Boiron, M.-C., Cathelineau, M. & Richard, A. (2010): *Fluid flows and metal deposition near basement/cover unconformity: lessons and analogies from Pb–Zn–F–Ba systems for the understanding of Proterozoic U deposits*. Geofluids, Bd. 10, S. 270-292. ISSN 1468-8115. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1468-8123.2010.00289.x

Bollingerfehr, W., Bertrams, N., Minkley, W., Buhmann, D., Mönig, J., Eickemeier, R., Popp, T., Fahland, S., Prignitz, S., Filbert, W., Reinhold, K., Hammer, J., Simo, E., Kindlein, J., Thiemeyer, T., Knauth, M., Völkner, E., Liu, W. & Wolf, J. (2018): *Concept developments for a generic repository for heat-generating waste in bedded salt formations in Germany*. (KOSINA) Synthesebericht BGE TEC 2018-13. BGE TECHNOLOGY GmbH. Peine

Bollingerfehr, W., Filbert, W., Lerch, C. & Tholen, M. (2012): *Endlagerkonzepte - Bericht zum Arbeitspaket 5*. Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS - 272. DBE TECHNOLOGY GmbH. Peine

Bollingerfehr, W., Filbert, W., Pöhler, M., Tholen, M. & Wehrmann, J. (2008): *AP 1.2 - Konzeptionelle Endlagerplanung und Zusammenstellung des endzulagernden Inventars*. Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW: ISIBEL. TEC-20-2008-AP. DBE TECHNOLOGY GmbH. Peine

Bollingerfehr, W., Herklotz, M., Herzog, C., Jobmann, M., Lommerzheim, A., Weiß, E., Wolf, J., Ziegenhagen, J., Hammer, J., Sönnke, J. & Mingerzahn, G. (2011): *Entwicklung und Umsetzung von technischen Konzepten für Endlager in tiefen geologischen Formationen in unterschiedlichen Wirtsgesteinen* EUGENIA. TEC-29-2008-AB. DBE TECHNOLOGY GmbH. Peine

Bombien, H., Hoffers, B., Breuckmann, S., Helms, M., Lademann, K., Lange, M., Oelrich, A., Reimann, R., Rienäcker, J., Schmidt, C., Slaby, M.-F. & Ziesch, J. (2012): *Der Geotektonische Atlas von Niedersachsen und dem deutschen Nordseesektor als geologisches 3D-Modell Einleitung*. Gmit Geowissenschaftliche Mitteilungen, Bd. 48, S. 6-13

Bornemann, O., Behlau, J., Fischbeck, R., Hammer, J., Jaritz, W., Keller, S., Mingerzahn, G. & Schramm, M. (2008): *Standortbeschreibung Gorleben Teil 3: Ergebnisse der über- und untertägigen Erkundung des Salinars*. Geologisches Jahrbuch, Reihe C, Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 9783510959648

Bossart, P., Bernier, F., Birkholzer, J., Bruggeman, C., Connolly, P., Dewonck, S., Fukaya, M., Herfort, M., Jensen, M., Matray, J.-M., Mayor, J. C., Moeri, A., Oyama, T., Schuster, K., Shigeta, N., Vietor, T. & Wieczorek, K. (2017): *Mont Terri rock laboratory, 20 years of research: introduction, site characteristics and overview of experiments*. Swiss Journal of Geosciences, Bd. 110, S. 3-22

Bracke, G., Hartwig-Thurat, E., Larue, J., Meleshyn, A. & Weyand, T. (2019): *Untersuchungen zu den „maximalen physikalisch möglichen Temperaturen“ gemäß § 27 StandAG im Hinblick auf die Grenztemperatur an der Außenfläche von Abfallbehältern*. Bericht GRS-A-3948. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH. Köln

Bradbury, M. H., Baeyens, B. & Thoenen, T. (2010): *Sorption Data Bases for Generic Swiss Argillaceous Rock Systems*. Paul Scherrer Institut. Wettingen, Switzerland

Branco, W. (1892): *Ein neuer Tertiär-Vulkan bei Stuttgart, zugleich ein Beweis, dass sich die Alb einst bis zur Landeshauptstadt hin ausdehnte*. Tübingen: W. Armbruster & O. Riecker

Bräuer, K., Kämpf, H., Niedermann, S. & Strauch, G. (2018): *Monitoring of helium and carbon isotopes in the western Eger Rift area (Czech Republic): Relationships with the 2014 seismic activity and indications for recent (2000–2016) magmatic unrest*. Chemical Geology, Bd. 482, S. 131-145. ISSN 00092541. DOI: https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2018.02.017

Bräuer, V., Dohrmann, R., Enste, G., Fahland, S., Gräsle, W., Hammer, J., Hertzsch, J.-M., Hesser, J., Heusermann, S., Kaufhold, S., Landsmann, B., Maßmann, J., Mertineit, M., Mrugalla, S., Schäfers, A., Schramm, M., Schuster, K., Sönnke, J., Stadler, S., Stührenberg, D., Weber, J. R. & Weitkamp, A. (2016): *Beratung der Endlagerkommission 9S2014010000*. Antworten der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe zum Pflichtenheft "Literaturstudie Wärmeentwicklung - Gesteinsverträglichkeit". K-MAT 55. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Hannover

Breidung, K. P. (2002): *Forschungsprojekt Schachtverschluss Salzdetfurth Schacht II. Abschlussbericht - Kurzfassung*. K+S AG. Bad Salzdetfurth

Bryant, W. R. (2003): *Permeability of Clays, Silty-Clays and Clayey-Silts*. In: E. D. Scott, A. H. Bouma & W. R. Bryant (Hrsg.): Siltstones, Mudstones and Shales: Depositional Processes and Characteristics. Bd. 1, S. 344-352, Tulsa, Oklaoma: SEPM Society for Sedimentary Geology - Gulf Coast Association of Geological Societies. ISBN 9781565760943. DOI: 10.2110/sepmmisc.01.0344

BT-Drs. 18/9100: Abschlussbericht der Kommission: Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe: Verantwortung für die Zukunft - Ein faires und transparentes Verfahren für die Auswahl eines nationalen Endlagerstandortes, Deutscher Bundestag, Drucksache 18/9100 vom 07.03.2017

BT-Drs. 18/11398: Gesetzentwurf der Fraktionen CDU/CSU, SPD und BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN: Entwurf eines Gesetzes zur Fortentwicklung des Gesetzes zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle und anderer Gesetze, Deutscher Bundestag, Drucksache 18/11398 vom 07.03.2017

BT-Drs. 19/19291: Verordnung des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit: Verordnung über Sicherheitsanforderungen und vorläufige Sicherheitsuntersuchungen für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle

Bucher, K. & Grapes, R. (2011): *Petrogenesis of Metamorphic Rocks*. Berlin, Heidelberg: Springer. ISBN 978-3-540-74169-5. DOI: 10.1007/978-3-540-74169-5

Buhmann, D., Mönig, J., Wolf, J., Heusermann, S., Keller, S., Weber, J. R., Bollingerfehr, W., Filbert, W., Kreienmeyer, M., Krone, J. & Tholen, M. (2008): *Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW*. ISIBEL. TEC-09-2008-AB. DBE TECHNOLOGY GmbH, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH. Peine

Capouet, M., Carter, A. & Ciambrella, M. (2019): *International Features, Events and Processes (IFEP) List for the Deep Geological Disposal of Radioactive Waste. Version 3.0*. OECD-NEA. Paris, France

Carlé, W., mit Beiträgen von Bayer, H.-J. & Bloos, G. (1982): *Geologie und Hydrogeologie der Mineral- und Thermalwässer von Bad Überkingen, Landkreis Göppingen, Baden-Württemberg (II)*. Geologisches Jahrbuch C, Bd. 31, S. 3-72

Čermák, V., Huckenholz, H.-G., Rybach, L., Schmid, R., Schopper, J. R., Schuch, M., Stöffler, D. & Wohlenberg, J. (1982): *Landolt-Börnstein - Zahlenwerte und Funktionen aus Naturwissenschaften und Technik. Neue Serie. Gruppe 5, Geophysik und Weltraumforsch. Band 1. Teilband a, Physikalische Eigenschaften der Gesteine*. Berlin: Springer. ISBN 0387103333

Chandler, N., Dixon, D., Gray, M., Hara, K., Cournut, A. & Tillerson, J. (1998): *The Tunnel Sealing Experiment: An In Situ Demonstration of Technologies for Vault Sealing*. Atomic Energy of Canada Ltd., Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation (PNC), Agence nationale pour la gestion des d´echets radioactifs (ANDRA), Sandia National Laboratories. o. O.

Clauser, C. (2003): *Numerical Simulation of Reactive Flow in Hot Aquifers*. 1. Aufl., Berlin: Springer. ISBN 9783540438687. DOI: 10.1007/978-3-642-55684-5

Czaikowski, O., Wolters, O., Düsterloh, R. & Lux, K.-H. (2005): *Gebirgsmechanische Beurteilung von Tongesteinsformationen im Hinblick auf die Endlagerung radioaktiver Abfälle.* Technische Universität Clausthal. Clausthal-Zellerfeld

Damsgaard, A., Suckale, J., Piotrowski, J. A., Houssais, M., Siegfried, M. R. & Fricker, H. A. (2017): *Sediment behavior controls equilibrium width of subglacial channels*. Journal of Glaciology, Bd. 63, S. 1034-1048. ISSN 00221430. DOI: https://doi.org/10.1017/jog.2017.71

DBE TEC (1998): *Systembeschreibung Übergeordnete Energieversorgung einschließlich Ersatzstrom*. Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH. Salzgitter

DBE TEC (2016): *Gutachten - Flächenbedarf für ein Endlager für wärmeentwickelnde, hoch radioaktive Abfälle*. K-MAT 58. DBE Technology GmbH. Peine

Deichmann, N., Ballarin Dolfin, D. & Kastrup, U. (2000): *Seismizität der Nord- und Zentralschweiz*. Technischer Bericht NTB 00-05. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra). Wettingen, Switzerland

Der Kiureghian, A. & Ditlevsen, O. (2009): *Aleatory or epistemic? Does it matter?* Structural safety, Bd. 31, S. 105-112. ISSN 01674730. DOI: https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2008.06.020

Deutsche Stratigraphische Kommission (Hrsg.) (2020): *Stratigraphie von Deutschland XII: Zechstein*. Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft fÜr Geowissenschaften, Heft 89. Berlin: DGGV. ISBN 9783510492411

Dhondt, G. (2004): *The Finite Element Method for Three-Dimensional Thermomechanical Applications*. West Sussex, England: John Wiley & Sons. ISBN 9780470857526

Diersch, H.-J. G. & Kolditz, O. (2002): *Variable-density flow and transport in porous media: approaches and challenges*. Advances in Water Resources, Bd. 25, S. 899-944. ISSN 03091708

Dillenardt, J. (2010): *Temperatur-Tiefen Verteilung in der Elbtalzone: Ermittlung geothermischer Parameter typischer Gesteine und 2D numerische Modellierung für die Regionen Meißen-Dresden-Pirna*. Diplomarbeit, Technische Universität Bergakademie Freiberg, Fakultät für Geowissenschaften, Geotechnik und Bergbau, S. 78, Freiberg,

DIN EN 1998-1/NA:2011-01: *Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben - Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbau*. Berlin: Beuth

Domenico, P. A. & Schwartz, F. W. (1990): *Physical and chemical hydrogeology*. New York, NY 10158-0012: John Wiley and Sons, Inc. ISBN 0471529877

Dörr, S., Bollingerfehr, W. & Filbert, W. (2014): *Status quo der Lagerung C-14-haltiger Abfälle aus deutschen Hochtemperatur- und Forschungsreaktoren und Strategie zu deren künftigen Endlagerung - Abschlussbericht*. TEC-20-2014-AB. DBE TECHNOLOGY GmbH. Peine

Dörr, S., Bollingerfehr, W., Filbert, W. & Tholen, M. (2011): *Status quo der Lagerung ausgedienter Brennelemente aus stillgelegten / rückgebauten deutschen Forschungsreaktoren und Strategie (Lösungsansatz) zu deren künftigen Behandlung / Lagerung*. LABRADOR. Abschlussbericht. DBE TECHNOLOGY GmbH. Peine

Drong, H. J. (2003): *Das kristalline Grundgebirge in Bohrungen des nordwestlichen Alpenvorlandes*. Geologica Bavarica, Bd. 108, S. 13-110

Dunworth, E. A. & Wilson, M. (1998): *Olivine Melilitites of the SW German Tertiary Volcanic Province: Mineralogy and Petrogenesis*. Journal of Petrology, Bd. 39, S. 1805-1836. ISSN 00223530. DOI: 10.1093/petroj/39.10.1805

Eckhardt, A. (2020): *Sicherheit angesichts von Ungewissheit – Ungewissheiten im Safety Case*. Literaturstudie. TRANSENS-Bericht-01. TRANSENS. Zollikerberg, Schweiz

Egli, D., Mosar, J., Ibele, T. & Madritsch, H. (2017): *The role of precursory structures on Tertiary deformation in the Black Forest-Hegau region*. International Journal of Earth Sciences, Bd. 106, S. 2297-2318. ISSN 14373262. DOI: 10.1007/s00531-016-1427-8

EinwirkungsBergV: Einwirkungsbereichs-Bergverordnung vom 11. November 1982 (BGBl. I S. 1553, 1558), die zuletzt durch Artikel 3 der Verordnung vom 18. Oktober 2017 (BGBl. I S. 3584) geändert worden ist

Elsner, H. (2016): *Salz. Salze in Deutschland*. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)

EndlSiAnfV: Endlagersicherheitsanforderungsverordnung vom 6. Oktober 2020 (BGBl. I S. 2094)

EndlSiUntV: Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung vom 6. Oktober 2020 (BGBl. I S. 2094, 2103)

Engelmann, H. J., Filbert, W., Heda, M., Hedemann, W., Hubert, R. & Neydak, J. (1995): *Direkte Endlagerung ausgedienter Brennelemente, Handhabungsversuche zur Streckenlagerung - Abschlussbericht*. DEAB. DEAB T 60. DBE TECHNOLOGY GmbH, Siemag Transplan GmbH. Peine

ESK (2013): *Leitlinien für die trockene Zwischenlagerung bestrahlter Brennelemente und Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle in Behältern - Revidierte Fassung vom 10.06.2013*. Empfehlung der Entsorgungskommission. Entsorgungskommission. Bonn

ESK (2015): *Evaluation der Rand- und Rahmenbedingungen, Bewertungsgrundsätze sowie der Kriterien des Arbeitskreises Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd)* DISKUSSIONSPAPIER der Entsorgungskommission. Entsorgungskommission. Bonn

ESK (2018): *Leitlinie zum Schutz von Endlagern gegen Hochwasser*. Empfehlung der Entsorgungskommission. Entsorgungskommission. Bonn

ESK (2019): *Sicherheitskonzeptionelle Anforderungen an das Barrierensystem eines Endlagers für hoch radioaktive Abfälle und deren Umsetzbarkeit, Stellungnahme der Entsorgungskommission*. Entsorgungskommission. Bonn

ESK (2021): *Diskussionspapier Standortvergleich*. Entsorgungskommission. Bonn

Eskola, P. (1915): *On the relations between the chemical and mineralogical composition in the metamorphic rocks of the Orijarvi region*. In: Suomen geologinen komissioni, Suomen geologinen toimikunta & Geologinen tutkimuslaitos (Hrsg.): Bulletin de la Commission Géologique de la Finlande, Ausgaben 39-44. S. 1-277, Bulletin de la Commission Geologique de Finlande, 40: Geologinen tutkimuslaitos. ISBN 0365-9283

Euridice (2018): *Activity Report*. Doc 19-104. ESV Euridice EIG. Mol, Belgium

Europäische Kommission, Generaldirektion Forschung und Innovation, Bechthold, W., Heusermann, S. & Smailos, E. (2004): *Backfilling and Sealing of Underground Respositories for Radioactive Waste in Salt: Bambus II Project*. final report. Publications Office. o. O. ISBN 9289477679

Faulkner, D. R., Jackson, C. A. L., Lunn, R. J., Schlische, R. W., Shipton, Z. K., Wibberley, C. A. J. & Withjack, M. O. (2010): *A review of recent developments concerning the structure, mechanics and fluid flow properties of fault zones*. Journal of Structural Geology, Bd. 32, S. 1557-1575. ISSN 0191-8141. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jsg.2010.06.009

Fehn, C., Wirsing, G. & Engesser, W. (2010): *Informationssystem Speichergesteine für den Standort Deutschland – eine Grundlage zur klimafreundlichen geotechnischen und energetischen Nutzung des tieferen Untergrundes (Speicher-Kataster Deutschland): Endbericht Erstellung von Potenzialkarten in Baden-Württemberg.* Regierungspräsidium Freiburg, Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB). Freiburg i. Br.

Filbert, W., Bollingerfehr, W., Heda, M., Lerch, C., Niehues, N., Pöhler, M., Schulz, J., Schwarz, T., Toussaint, M. & Wehrmann, J. (2010): *Optimization of the Direct Disposal Concept by Emplacing SF Canisters in Boreholes - Final Report*. TEC-10-2009-AB. DBE TECHNOLOGY GmbH. Peine

Filbert, W. & Pöhler, M. (2008): *AP2: Bewertung der Betriebssicherheit*. Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW: ISIBEL. TEC-17-2008-AP. DBE TECHNOLOGY GmbH. Peine

Fischer-Appelt, K., Baltes, B., Buhmann, D., Larue, J. & Mönig, J. (2013): *Synthesebericht für die VSG: Bericht zum Arbeitspaket 13*. Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben GRS-290. Gesellschaft für Anlagen-und Reaktorsicherheit (GRS) mbH. Köln. ISBN 9783939355663

Fischer, T., Horálek, J., Hrubcová, P., Vavryčuk, V., Bräuer, K. & Kämpf, H. (2014): *Intra-continental earthquake swarms in West-Bohemia and Vogtland: A review*. Tectonophysics, Bd. 611, S. 1-27. ISSN 00401951. DOI: 10.1016/j.tecto.2013.11.001

Fleig, S. & Röhling, S. (2019): *InSpEE-DS: Errichtung von Salzkavernen zur Speicherung erneuerbarer Energien in Doppelsalinaren und flachlagernden Salzen*. [Online]: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe,. Zugriff am: 25.08.2020. Verfügbar unter https://www.robeha.de/DE/Gemeinsames/Nachrichten/Veranstaltungen/2019/Hauskolloquium_2019_2020/Bilder/2019-11-26_01_g.html;jsessionid=091F6F48EB9FA03D1B87771E42BCD3FA.2_cid321?nn=1545784

Fleig, S. & Röhling, S. (2020): *Informationssystem Salz: Planungsgrundlagen, Auswahlkriterien und Potenzialabschätzung für die Errichtung von Salzkavernen zur Speicherung von Erneuerbaren Energien (Wasserstoff und Druckluft) - Doppelsalinare und flach lagernde Salzschichten Teilprojekt Salz- und Strukturgeologie*. Sachbericht 03ET6062B. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Hannover

Förster, H.-J., Tischendorf, G., Pälchen, W., Benek, R., Seltmann, R. & Kramer, M. (2011): *Spätvariszischer Magmatismus*. In: W. Pälchen & H. Walter (Hrsg.): Geologie von Sachsen I: Geologischer Bau und Entwicklungsgeschichte. 2. Aufl., S. 257-296, Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 9783510652709

Frank, M., Groschopf, P., Sauer, K., Simon, P. & Wild, H. (1975): *Die marin-sedimentären Eisenerze des Dogger in Baden-Württemberg*. In: M. Frank & P. Groschopf (Hrsg.): Sammelwerk

Deutsche Eisenerzlagerstätten. S. 23-128, Geologisches Jahrbuch Reihe D, 10, Hannover: Schweizerbart. ISBN 9783510961825

Franke, D. (2020): *Geologie von Ostdeutschland (Sachsen, Thüringen, Sachsen-Anhalt, Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern) - Ein Kompendium*. Glienicke/Nordbahn: Dietrich Franke. Letzte Aktualisierung am: 12.02.2020. Zugriff am: 01.03.2020. Verfügbar unter http://www.regionalgeologie-ost.de/

Franz, M. & Nitsch, E. (2009): *Zur lithostratigraphischen Gliederung des Aalenium in Baden–Württemberg*. LGRB-Informationen, Bd. 22, S. 123–146

Frischbutter, A. (1979): *Zur Geochemie der präkambrischen Gesteine der Elbezone unter besonderer Berücksichtigung etwa gleichalter Gesteinskomplexe ihres Rahmens*. Veröffentlichungen des Zentralinstituts für Physik der Erde, 54, Potsdam: Zentralinstitut Physik der Erde. DOI: https://doi.org/10.2312/zipe.1979.054

Füchtbauer, H. (1988): *Sedimente und Sedimentgesteine (Sediment-Petrologie Teil II)*. 4. Aufl. Aufl., Stuttgart: Schweizerbart. ISBN ISBN 978-3-510-65138-2

Füchtbauer, H. (1992): *Sedimentologie und Diagenese des Oberkarbons in NW-Deutschland*. Zeitschrift für angewandte Geologie, Bd. 38, S. 37-40. ISSN 0044-2259

Gabriel, G., Vogel, D., Scheibe, R., Lindner, H., Pucher, R., Wonik, T. & Krawczyk, C. M. (2011): *Anomalies of the Earth's total magnetic field in Germany – the first complete homogenous data set reveals new opportunities for multiscale geoscientific studies*. Geophysical Journal International, Bd. 184, S. 1113-1118. ISSN 0956-540X. DOI: 10.1111/j.1365-246X.2010.04924.x

Gall, H., Müller, D. & Pohl, J. (1977): *Zum geologischen Bau der Randzone des Ries-Kraters*. Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie, Bd. 1977, S. 65-94

Gaus, I., Garitte, B., Senger, R., Gens, A., Vasconcelos, R., Garcia-Sineriz, J.-L., Trick, T., Wieczorek, K., Czaikowski, O., Schuster, K., Mayor, J. C., Velasco, M., Kuhlmann, U. & Villar, M. V. (2014): *The HE-E Experiment: Lay-out, Interpretation and THM Modelling*. NAB 14-53. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle. Wettingen, Switzerland

Geissler, W. H., Kämpf, H., Kind, R., Bräuer, K., Klinge, K., Plenefisch, T., Horálek, J., Zedník, J. & Nehybka, V. (2005): *Seismic structure and location of a CO_2 source in the upper mantle of the western Eger (Ohře) Rift, central Europe*. Tectonics, Bd. 24, S. 1-23. ISSN 02787407. DOI: https://doi.org/10.1029/2004TC001672

GeoMol Team (2015): *GeoMol – Assessing subsurface potentials of the Alpine Foreland Basins for sustainable planning and use of natural resources. Project Report*. Bayerisches Landesamt für Umwelt Augsburg

Geyer, M., Nitsch, E. & Simon, T. (Hrsg.) (2011): *Geologie von Baden-Württemberg*. 5. Aufl. Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 9783510652679

Ghanbarian, B., Hung, A. G., Ewing, R. P. & Sahimi, M. (2013): *Tortuosity in Porous Media: A Critical Review*. Soil Science Society of America Journal, Bd. 77, S. 1461-1477. DOI: 10.2136/sssaj2012.0435

Gimmi, T. & Kosakowski, G. (2011): *How Mobile are Sorbed Cations in Clays and Clay Rocks?* Environmental Science & Technology, Bd. 45, S. 1443-1449. DOI: 10.1021/es1027794

Goulty, N. R., Sargent, C., Andras, P. & Aplin, A. C. (2016): *Compaction of diagenetically altered mudstones – Part 1: Mechanical and chemical contributions*. Marine and Petroleum Geology, Bd. 77, S. 703-713. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2016.07.015

Hammond, G. E., Lichtner, P. C., Lu, C. & Mills, R. T. (2012): *PFLOTRAN: Reactive Flow & Transport Code for Use on Laptops to Leadership-Class Supercomputers*. In: F. Zhang, G.-T. Yeh & J. C. Parker (Hrsg.): Groundwater Reactive Transport Models. S. 141-159, o. O.: Bentham Science Publishers

Haneke, K., Starke, B., Schuck, A., Goldsworthy, M., Pateiro Fernández, J. B. & Pieper, C. (2021): *Untersuchung zu übertägigen Erkundungsprogrammen für hydrologische, hydrogeologische und hydrochemische Fragestellungen im Standortauswahlverfahren (übErStand)*. BASE - Forschungsberichte zur Sicherheit der nuklearen Entsorgung Endbericht Vorhaben 4717F01201. Brenk Systemplanung GmbH. Berlin. urn:nbn:de:0221-2021110329460

Hansen, J., Doudou, S., Palmu, M. & White, M. (2016): *DOPAS Work Package 6 Deliverable D6.4: Final Summary Report*. DOPAS Project. European Commission. o. O.

Hardt, J., Norden, B., Bauer, K., Toelle, O. & Krambach, J. (2021): *Surface cracks—geomorphological indicators for late Quaternary halotectonic movements in Northern Germany*. Earth Surface Processes and Landforms, Bd. 46, S. 2963-2983. DOI: 10.1002/esp.5226

Heemann, U., Kull, H., Li, S., Miehe, R. & Müller, C. (2014): *VIRTUS Virtuelles Untertagelabor im Steinsalz Anhang B Protokolle Literaturauswertung der Daten zum thermisch-hydraulisch-mechanischen Materialverhalten von Salzgesteinen und EBS-Materialien*. GRS - 354 Anhang B. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH. o. O. ISBN 9783944161341

Heim, D. (1990): *Tone und Tonminerale. Grundlagen der Sedimentologie und Mineralogie*. Stuttgart: Ferdinand Enke Verlag

Heinicke, J., Stephan, T., Alexandrakis, C., Gaupp, R. & Buske, S. (2019): *Alteration as possible cause for transition from brittle failure to aseismic slip: the case of the NW-Bohemia / Vogtland earthquake swarm region*. Journal of Geodynamics, Bd. 124, S. 79-92. ISSN 0264-3707. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jog.2019.01.010

Hekel, U. (1994): *Hydrogeologische Erkundung toniger Festgesteine am Beispiel des Opalinuston (Unteres Aalenium)*. Tübingen, Germany: Institut und Museum für Geologie und Paläontologie der Universität Tübingen

Herbert, H. J. & Schwandt, A. (2007): *Salzlösungszuflüsse im Salzbergbau Mitteldeutschlands*. GRS-226. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit(GRS) mbH. Köln. ISBN 9783939355007

Herold, P., Bertrams, N., Prignitz, S. & Simo Kuate, E. (2018a): *Technische Konzepte für die Rückholung der Einlagerungsvariante horizontale Streckenlagerung in Tongesteinsformationen*. ERNESTA. BGE TECHNOLOGY GmbH. Peine

Herold, P., Förster, B., Bertrams, N., Buhmann, D., Filbert, W., Leonhardt, J., Lommerzheim, A. & Noseck, U. (2020a): *Ableitung von Einwirkungen von Innen für die Betriebsphase eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle*. BASEL. GRS - 619. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) GmbH, BGE TECHNOLOGY GmbH. Braunschweig. ISBN 9783949088056

Herold, P., Gruner, M., Jobmann, M., Kudla, W. & Müller, C. (2020b): *Teilbericht zum Arbeitspaket 1 - Konzeptentwicklung für Schachtverschlüsse im Ton- und Salzgestein*. ELSA Phase 2. BGE TEC 2020-11. BGE TECHNOLOGY GmbH, Technische Universität Bergakademie Freiberg - Institut für Bergbau und Spezialtiefbau. Peine

Herold, P., Prignitz, S., Simo, E., Filbert, W. & Bertrams, N. (2018b): *Entwicklung technischer Konzepte zur Rückholung von Endlagerbehältern mit wärmeentwickelnden radioaktiven*

Abfällen und ausgedienten Brennelementen aus Endlagern in Salz- und Tongesteinsformationen. (ERNESTA) Abschlussbericht BGE TEC 2018-11. BGE TECHNOLOGY GmbH. Peine

Herold, P., Simo, E., Räuschel, H., Engelhardt, H.-J., te Kook, J., Pflüger, B., Scior, C. & Studeny, A. (2020c): *Ausbau von Grubenbauen für ein HAW-Endlager in Tongestein - Abschlussbericht*. AGEnT. BGE TEC 2020-26. BGE TECHNOLOGY GmbH, DMT GmbH & Co. KG. Peine

Hofmann, F., Schlatter, R. & Weh, M. (2000): *Blatt 1011 Beggingen (Südhälfte) mit SW-Anteil von Blatt 1012 Singen (Atlasblatt 97), Erläuterungen*. 1:25.000. Bern Hallwag Kümmerly+Frey. Geologischer Atlas der Schweiz. ISBN 9783906723372

Honty, M. & De Craen, M. (2012): *Boom Clay mineralogy – qualitative and quantitative aspects*. External Report of the Belgian Nuclear Research Centre. SCK CEN. Mol, Belgium

Horn, P., Lippolt, H. J. & Todt, W. (1972): *Kalium-Argon-Altersbestimmungen an tertiären Vulkaniten des Oberrheingrabens. I. Gesamtgesteinsalter*. Eclogae Geologicae Helvetiae, Bd. 65, S. 131-156. DOI: 10.5169/seals-164081

Hoth, P., Wirth, H., Reinhold, K., Bräuer, V., Krull, P. & Feldrappe, H. (2007): *Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands. Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen*. Berlin / Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)

Hou, Z. & Lux, K.-H. (2000): *Berechnungsverfahren zur Ermittlung der Tragfähigkeit von Pfeilern im Salzbergbau in Abhängigkeit von der Standzeit*. Glückauf-Forschungshefte, Bd. 61, S. 112-122

Hrubcová, P., Geissler, W. H., Bräuer, K., Vavryčuk, V., Tomek, Č. & Kämpf, H. (2017): *Active Magmatic Underplating in Western Eger Rift, Central Europe*. Tectonics, Bd. 36, S. 2846-2862. ISSN 02787407. DOI: https://doi.org/10.1002/2017TC004710

Hunsche, U., Schulze, O., Walter, F. & Plischke, I. (2003): *Projekt Gorleben: Thermomechanisches Verhalten von Salzgestein*. Abschlussbericht. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

Huster, H., Hübscher, C. & Seidel, E. (2020): *Impact of Late Cretaceous to Neogene plate tectonics and Quaternary ice loads on supra-salt deposits at Eastern Glückstadt Graben, North German Basin*. International Journal of Earth Sciences, Bd. 109, S. 1029-1050. DOI: 10.1007/s00531-020-01850-8

Hüttner, R., Brost, E., Homilius, J. & Schmidt-Kaler, H. (1980): *Struktur des Ries-Kraterrandes auf Grund geoelektrischer Tiefensondierungen*. Geologisches Jahrbuch, Reihe E, Bd. 19, S. 95-118

IAEA (2003): *Scientific and Technical Basis for the Geological Disposal of Radioactive Wastes*. Technical Reports Series No. 413. International Atomic Energy Agency. Vienna, Austria

IAEA (2012): *The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste*. IAEA Safety Standards. Specific Safety Guide No. SSG-23. International Atomic Energy Agency (IAEA). Wien, Österreich

IAEA (2013): *The Safety Case and Safety Assessment for the Predisposal Management of Radioactive Waste*. International Atomic Energy Agency. Vienna, Austria

IAEA (2019): *Terminology Used in Nuclear Safety and Radiation Protection 2018 Edition*. IAEA Safety Glossary. International Atomic Energy Agency (IAEA). Wien, Österreich

Ingebritsen, S. E. & Manning, C. E. (1999): *Geological implications of a permeability-depth curve for the continental crust*. Geology, Bd. 27, S. 1107-1110. ISSN 19432682. DOI: https://doi.org/10.1130/0091-7613(1999)027<1107:GIOAPD>2.3.CO;2

Ingebritsen, S. E., Sanford, W. E. & Neuzil, C. E. (2006): *Groundwater in Geologic Processes*. 2. Aufl., Cambridge: Cambridge University Press. ISBN 0521603218

Ishihara, S. (1977): *The magnetite-series and ilmenite-series granitic rocks*. Mining geology, Bd. 27, S. 293-305. ISSN 0026-5209. DOI: 10.11456

Jackson, M. P. A. & Hudec, M. R. (2017): *Salt tectonics: Principles and practice*. Cambridge, UK: Cambridge University Press. ISBN 9781107013315

Jahn, S., Mrugalla, S. & Stark, L. (2016): *Endlagerstandortmodell SÜD (AnSichT) – Teil II: Zusammenstellung von Gesteinseigenschaften für den Langzeitsicherheitsnachweis*. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)

Jahn, S. & Sönnke, J. (2013): *Zusammenstellung von Gesteinseigenschaften für den Langzeitsicherheitsnachweis: Zwischenbericht*. *Methodenentwicklung und Anwendung eines Sicherheitsnachweiskonzeptes für einen generischen HAW-Endlagerstandort im Tonstein (AnSichT) : Endlagerstandortmodell Nord (AnSichT)*. Zwischenbericht. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

Jähne-Klingberg, F., Stück, H., Bebiolka, A., Bense, F. & Stark, L. (2019): *Prognosemöglichkeiten von großräumigen Vertikalbewegungen für Deutschland*. Abschlussbericht. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)

Jobmann, M., Bebiolka, A., Jahn, S., Lommerzheim, A., Maßmann, J., Meleshyn, A., Mrugalla, S., Reinhold, K., Rübel, A., Stark, L. & Ziefle, G. (2017a): *Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager in Tonstein (ANSICHT)*. Synthesebericht TEC-19-2016-AB. BGR, GRS, DBE TECHNOLOGY GmbH. Peine

Jobmann, M., Bebiolka, A., Jahn, S., Lommerzheim, A., Maßmann, J., Meleshyn, A., Mrugalla, S., Reinhold, K., Rübel, A., Stark, L. & Ziefle, G. (2017b): *Sicherheits- und Nachweismethodik für ein Endlager im Tongestein in Deutschland - Synthesebericht*. Projekt ANSICHT. TEC-19-2016-AB. DBE TECHNOLOGY GmbH, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Peine

Jobmann, M. & Lommerzheim, A. (2015): *Endlagerkonzept sowie Verfüll- und Verschlusskonzept für das Endlagerstandortmodell SÜD*. ANSICHT. TEC-26-2015-TB. DBE TECHNOLOGY GmbH. Peine

Jockwer, N. & Wieczorek, K. (2008): *Advective and Diffusive Gas Transport in Rock Salt Formations*. ADDIGAS. GRS - 234. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH. Cologne, Germany. ISBN 9783939355083

K-Drs. 268: *Abschlussbericht der Kommision Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe*. Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe Berlin, 5. Juli 2016

Kartendienst des TLUBN (2022): *Geologische Karte Thüringen (1:25000)*. [Website]: Thüringer Landesamt für Umwelt, Bergbau und Naturschutz (TLUBN). Zugriff am: 23.02.2022. Verfügbar unter https://antares.thueringen.de/cadenza/pages/map/default/index.xhtml;jsessionid=C3E9610C3D52F8A03B94024CFE9BCD81?mapId=baf487f7-805a-425b-8ddf-c7cb64d9ed92&mapSrs=EPSG%3A25832&mapExtent=434073.8777777778%2C5543501%2C884945.1222222222%2C5745719

Katsube, T. J. & Connell, S. (1998): *Shale permeability characteristics*. Geological Survey of Canada, Current Research, Bd. 1998-E, S. 183-192. DOI: 10.4095/209964

Katzung, G., Müller, U., Krienke, H.-D., Krull, P. & Strahl, U. (2004): *Auflagerung des Quartärs und der Glazialtektonik*. In: G. Katzung (Hrsg.): Geologie von Mecklenburg-Vorpommern. S. 397-408, Stuttgart: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller). ISBN 9783510652105

Kim, Y.-S., Peacock, D. C. P. & Sanderson, D. J. (2004): *Fault damage zones*. Journal of Structural Geology, Bd. 26, S. 503-517. ISSN 01918141. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jsg.2003.08.002

King, F. (2017): *Nuclear waste canister materials: Corrosion behavior and long-term performance in geological repository systems*. In: M. J. Apted & J. Ahn (Hrsg.): Geological Repository Systems for Safe Disposal of Spent Nuclear Fuels and Radioactive Waste. 2. Aufl., S. 365-408, Cambridge: Woodhead Publishing Series in Energy. ISBN 9780081006429. DOI: 10.1016/B978-0-08-100642-9.00013-X

King, F., Lilja, C., Pedersen, K., Pitkänen, P. & Vähänen, M. (2012): *An Update of the State-of-the-art Report on the Corrosion of Copper Under Expected Conditions in a Deep Geologic Repository*. Posiva 2011-01. Posiva Oy. Eurajoki, Finland

Kinzelbach, W. (1987): *Numerische Methoden zur Modellierung des Transports von Schadstoffen im Grundwasser*. München: Oldenbourg. ISBN 3486263463

KlimaBergV: Klima-Bergverordnung vom 9. Juni 1983 (BGBl. I S. 685), die durch Artikel 5 Absatz 2 der Verordnung vom 18. Oktober 2017 (BGBl. I S. 3584) geändert worden ist

Kneuker, T., Bartels, A., Bebiolka, A., Beilecke, T., Bense, F., Beushausen, M., Frenzel, B., Jähne-Klingberg, F., Lang, J., Lippmann-Pipke, J., May, F., Mertineit, M., Noack, V., Pollok, L., Reinhold, K., Rummel, L., Schubarth-Engelschall, N., Schumacher, S., Stück, H. & Weber, J. R. (2020): *Standortauswahl. Zusammenstellung und Bewertung von geowissenschaftlichen Methoden und Programmen für die übertägige Standorterkundung (GeoMePS) - Zusammenstellung von Erkundungszielen für die übertägige Erkundung gemäß §16 StandAG*. Zwischenbericht. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)

Kneuker, T., Beilecke, T., Pollok, L., Schubarth-Engelschall, N., Semroch, R. & Dlugosch, R. (2021): *Standortauswahl. Zusammenstellung und Bewertung von geowissenschaftlichen Methoden und Programmen für die übertägige Standorterkundung (GeoMePS) - Datenbankbasierte Zusammenstellung geowissenschaftlicher Erkundungsmethoden für die übertägige Standorterkundung gemäß §16 StandAG*. Zwischenbericht. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)

Kock, I., Faß, T., Fischer-Appelt, K., Frieling, G., Larue, J. & Wartenberg, W. (2021): *Messmethoden für übertägige Erkundungsprogramme gemäß StandAG (MessEr)*. BASE - Forschungsberichte zur Sicherheit der nuklearen Entsorgung Abschlussbericht Vorhaben 4717F01202. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH. Berlin. urn:nbn:de:0221-2021110529626

Kockel, F. & Krull, P. (1995): *Endlagerung stark wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands Untersuchung und Bewertung von von Salzformationen*. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Hannover

Kohler, E. E. & Ustrich, E. (1988): *Tonminerale und ihre Wirksamkeit in natürlichen und technischen Schadstoffbarrieren.* In: K. A. Czurda & J. F. Wagner (Hrsg.): Tone in der Umwelttechnik. Jahrestagung 1988 der Deutschen Ton- und Tonmineralgruppe DTTG., Bd. 4, S. 1-19, Karlsruhe: Schriftenreihe Angewandte Geologie Karlsruhe

Kolditz, O., Görke, U.-J., Shao, H. & Wang, W. (2012): *Thermo-Hydro-Mechanical-Chemical Processes in Porous Media: Benchmarks and Examples*. Berlin: Springer-Verlag. ISBN 9783642271762

Komulainen, J. J., Vaittinen, T., Picken, P. & Heikkinen, E. (2018): *Hydrogeological Bedrock Characterisation Based on Posiva Flow Log Measurement Data*. In: C. Wolkersdorfer, L. Sartz, A. Weber, J. Burgess & G. Tremblay (Hrsg.): Mine Water – Risk to Opportunity. Bd. 2, S. 654-660, Pretoria, South Africa: Tshwane University of Technology. ISBN 9780620806503

Kozdrój, W., Krentz, O. & Opletal, M. (Hrsg.) (2001): *Comments on the Geological Map Lausitz-Jizera-Karkonosze (without Cenozoic sediments) - 1: 100 000*. Dresden: Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie. ISBN 3896793233

Kröchert, J., Schmieder, M., Theye, T. & Buchner, E. (2009): *Considerations on the age of the Urach volcanic field (Southwest Germany)*. Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, Bd. 160, S. 325-331. DOI: 10.1127/1860-1804/2009/0160-0325

KTA 2207: Sicherheitstechnische Regel des Kerntechnischen Ausschusses (KTA): Schutz von Kernkraftwerken gegen Hochwasser. Fassung 11/04

Landesamt für Umwelt Bergbau und Naturschutz (TLUBN) (2021): *Validierung des Zwischenberichts „Teilgebiete“ für Thüringen*. TLUBN. Thüringen

Larue, J., Baltes, B., Fischer, H., Frieling, G., Kock, I., Navarro, M. & Seher, H. (2013): *Radiologische Konsequenzenanalyse*. Bericht zum Arbeitspaket 10 - Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben GRS-289. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH. Köln. ISBN 9783939355656

Le Maitre, R., Streckeisen, A., Zanettin, B., Le Bas, M., Bonin, B. & Bateman, P. (2002): *Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms: Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks*. 2. Aufl., Cambridge: Cambridge University Press. ISBN 9780521619486. DOI: DOI: 10.1017/CBO9780511535581

Lersow, M. (2018): *Endlagerung aller Arten von radioaktiven Abfällen und Rückständen: Langzeitstabile,, langzeitsichere Verwahrung in Geotechnischen Umweltbauwerken - Sachstand,, Diskussion und Ausblick* Berlin / Breitenbrunn-Erzgeb.: Springer Spektrum. ISBN 978-3-662-57821-6. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-662-57822-3

LfULG (2016): *Artus 2b: Kenntnisstandsanalyse zum tektonischen Bau von Sachsen*. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, TU Bergakademie Freiberg. Freiberg

LfULG (2021): *Fachstellungnahme des LfULG zum „Zwischenbericht Teilgebiete gemäß § 13 StandAG“ der Bundesgesellschaft für Endlagerung vom 28.09.2020 – zur Betroffenheit des Freistaates Sachsen*. Sächsisches Landesamt für Umwelt Landwirtschaft und Geologie (LfULG),. Freiberg

LGRB (2015): *Geologische Karte von Baden-Württemberg*. 1:50.000. Freiburg im Breisgau: Regierungspräsidium Freiburg.

LGRB (2021): *Fachliche Stellungnahme des Landesamts für Geologie, Rohstoffe und Bergbau zum Zwischenbericht Teilgebiete* Regierungspräsidium Freiburg, Landesamt für Geologie Rohstoffe und Bergbau (LGRB). Freiburg i. Br.

LGRBwissen (2022a): *Bergrutsch Mössingen*. [Website]: Regierungspräsidium Freiburg, Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB). Zugriff am: 24.02.2022. Verfügbar unter https://lgrbwissen.lgrb-bw.de/ingenieurgeologie/massenbewegungen/hangrutschungen-

rutschen/hangrutschungen-im-grenzbereich-des-mitteljuras-zum-oberjura-am-albtrauf/bergrutsch-moessingen

LGRBwissen (2022b): *Hydrogeologischer Überblick Unterjura und Mitteljura in Baden-Württemberg*. [Webpage]: Regierungspräsidium Freiburg, Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau (LGRB). Zugriff am: 21.02.2022. Verfügbar unter https://lgrbwissen.lgrb-bw.de/hydrogeologie/unterjura-mitteljura/hydrogeologischer-ueberblick

Li, Y.-H. & Gregory, S. (1974): *Diffusion of ions in sea water and in deep-sea sediments*. Geochimica et Cosmochimica Acta, Bd. 38, S. 703-714. DOI: 10.1016/0016-7037(74)90145-8

Linnemann, U. & Schauer, M. (1999): *Die Entstehung der Elbezone vor dem Hintergrund der cadomischen und variszischen Geschichte des Saxothuringischen Terranes - Konsequenzen aus einer abgedeckten geologischen Karte*. Zeitschrift für geologische Wissenschaften, Bd. 27, S. 385-400. ISSN 03034534

Lippolt, H. J., Gentner, W. & Wimmenauer, W. (1963): *Altersbestimmungen nach der Kalium-Argon-Methode an tertiären Eruptivgesteinen Südwestdeutschlands*. Jahreshefte des geologischen Landesamtes Baden-Württemberg, Bd. 6, S. 507-538

Lippolt, H. J., Todt, W. & Baranyi, I. (1973): *K-Ar ages of basaltic rocks from the Urach volcanic district, SW Germany*. Fortschritte der Mineralogie, Bd. 50, S. 101-102

Liu, W., Völkner, E., Minkley, W. & Popp, T. (2017): *Zusammenstellung der Materialparameter für THM-Modellberechnungen Ergebnisse aus dem Vorhaben KOSINA*. Ergebnisbericht. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

Lommerzheim, A. & Jobmann, M. (2015): *Endlagerkonzept sowie Verfüll- und Verschlusskonzept für das Endlagerstandortmodell NORD*. ANSICHT. TEC-14-2015-TB. DBE TECHNOLOGY GmbH. Peine

LRGBwissen (2021): *Opalinuston*. [Webpage]: Regierungspräsidium Freiburg, Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau. Zugriff am: 2021-06-21. Verfügbar unter https://lgrbwissen.lgrb-bw.de/rohstoffgeologie/rohstoffe-des-landes/ziegeleirohstoffe-grobkeramische-rohstoffe/opalinuston

Luijendijk, E. & Gleeson, T. (2015): *How well can we predict permeability in sedimentary basins? Deriving and evaluating porosity-permeability equations for noncemented sand and clay mixtures*. Geofluids, Bd. 15, S. 67-83. ISSN 14688115. DOI: 10.1111/gfl.12115

Lux, K.-H. & Eberth, S. (2002): *Entwicklung und Fundierung der Anforderung "Günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen" Teil B: Weiterführende laborative und rechnerische Untersuchungen*. Gutachten im Auftrag des AkEnd K-MAT 12-21. TU Clausthal. Clausthal-Zellerfeld

Lux, K.-H., Eberth, S. & Lomo-Appeyh, G. M. (2002): *Entwicklung und Fundierung der Anforderung "Günstige gebirgsmechanische Voraussetzung" Teil A: Grundlegende rechnerische Untersuchungen*. Gutachten im Auftrag des AkEnd K-MAT 12-20. TU Clausthal. Clausthal-Zellerfeld

Malz, A. & Kley, J. (2012): *The Finne fault zone (central Germany): Structural analysis of a partially inverted extensional fault zone by balanced cross-sections*. International Journal of Earth Sciences, Bd. 101, S. 2167–2182. DOI: 10.1007/s00531-012-0778-z

Markl, G. (2015): *Minerale und Gesteine: Mineralogie - Petrologie - Geochemie*. 3. Auflage. Aufl., Berlin: Springer Spektrum. ISBN 978-3-662-44627-0. DOI: 10.1007/978-3-662-44628-7

Masset, O. & Loew, S. (2010): *Hydraulic conductivity distribution in crystalline rocks, derived from inflows to tunnels and galleries in the Central Alps, Switzerland*. Hydrogeology Journal, Bd. 18, S. 863-891. ISSN 14350157. DOI: https://doi.org/10.1007/s10040-009-0569-1

Maßmann, J. (2016): *Endlagerstandortmodell SÜD (AnSichT) – Teil III: Auswahl von Gesteins- und Fluideigenschaften für numerische Berechnungen im Rahmen des Langzeitsicherheitsnachweises*. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)

Mäussnest, O. (1974a): *Die Eruptionspunkte des Schwäbischen Vulkans, Teil I*. Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft, Bd. 125, S. 23-54. DOI: 10.1127/zdgg/125/1974/23

Mäussnest, O. (1974b): *Die Eruptionspunkte des Schwäbischen Vulkans, Teil II*. Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft, Bd. 125, S. 277-352. DOI: 10.1127/zdgg/125/1974/277

McKay, M. D., Beckmann, R. J. & Conover, W. J. (1979): *Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code*. Technometrics, Bd. 21, S. 239-245. DOI: 10.1080/00401706.1979.10489755

Mehlhorn, G. (1997): *Der Ingenieurbau - Teil 4: Werkstoffe, Elastizitätstheorie*. Berlin: Ernst. ISBN 3433015708

Meleshyn, A. & Noseck, U. (2012): *Radionuclide Inventory of Vitrified Waste after Spent Nuclear Fuel Reprocessing at La Hague*. GRS 294. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH. Brunswick, Germany

Meleshyn, A., Weyand, T., Bracke, G., Kull, H. & Wieczorek, K. (2016): *Wärmeentwicklung/Gesteinverträglichkeit*. Kommission Lagerung radioaktiver Abfallstoffe K-MAT 64. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH

Mengel, K. (2006): *Einfluss der Temperaturerhöhung auf die mineralogischen und anorganisch-chemischen Eigenschaften von Kreide-Tonformationen (Apt)*. Abschlussbericht. Institut für Mineralogie und Mineralische Rohstoffe, Technische Universtität Clausthal-Zellerfeld. Clausthal-Zellerfeld, Deutschland

Meschede, M. (2018): *Geologie Deutschlands: Ein prozessorientierter Ansatz*. 2. Aufl., Berlin: Springer Spektrum. ISBN 9783662564226

Messmer, S. & Berger, P. (2014): *Sicherheitstechnische Betrachtungen zu Standseilbahnen für den Zugang zu einem zukünftigen geologischen Tiefenlager*. NAB 14-77. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle. Wettingen, Schweiz

Meyer, R. K. F. & Schmidt-Kaler, H. (1996): *Jura*. In: W. Freudenberger & K. Schwerd (Hrsg.): Erläuterungen zur geologischen Karte von Bayern 1:500.000. 4. neubearbeitete Auflage. Aufl., S. 90-102, München: Bayerisches Geologisches Landesamt

Mitchell, T. M. & Faulkner, D. R. (2012): *Towards quantifying the matrix permeability of fault damage zones in low porosity rocks*. Earth and Planetary Science Letters, Bd. 339-340, S. 24-31. ISSN 0012-821X. DOI: https://doi.org/10.1016/j.epsl.2012.05.014

Möller, B. & Beer, M. (2004): *Fuzzy Randomness: Uncertainty in Civil Engineering and Computational Mechanics*. Berlin, Germany: Springer. ISBN 3540402942

Mönig, J., Bertrams, N., Bollingerfehr, W., Fahland, S., Frenzel, B., Maßmann, J., Müller-Hoeppe, N., Reinhold, K., Rübel, A., Schubart-Engelschall, N., Simo, E., Thiedau, J., Weber, J. R. & Wolf, J. (2020a): *Empfehlungen zur sicherheitsgerichteten Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien des StandAG - Synthese aus dem Vorhaben RESUS - Entwurf Stand 03.04.2020*. 03.04.2020. Ergebnisse aus dem Vorhaben RESUS.

BGE TECHNOLOGY GmbH, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH. Braunschweig

Mönig, J., Bertrams, N., Bollingerfehr, W., Fahland, S., Frenzel, B., Maßmann, J., Müller-Hoeppe, N., Reinhold, K., Rübel, A., Schubarth-Engelschall, N., Simo, E., Thiedau, J., Weber, J. R. & Wolf, J. (2020b): *Empfehlungen zur sicherheitsgerichteten Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien des StandAG - Synthesebericht*. RESUS. GRS - 567. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, BGE TECHNOLOGY GmbH, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Braunschweig. ISBN 9783947685530

Mönig, J., Buhmann, D., Rübel, A., Wolf, J., Baltes, B. & Fischer-Appelt, K. (2012): *Sicherheits- und Nachweiskonzept - Bericht zum AP 4*. Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS - 277. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH. Köln. ISBN 9783939355533

Mönig, J., Buhmann, D., Rübel, A., Wolf, J., Baltes, B., Peiffer, F. & Fischer-Appelt, K. (2011): *Grundzüge des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes: Bericht zum Arbeitspaket 4; vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben*. Köln ; Garching bei München [u.a.}: GRS. ISBN 9783939355472

Mrugalla, S. (2011): *Geowissenschaftliche Langzeitprognose: Bericht zum Arbeitspaket 2; vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben*. Köln ; Garching bei München [u.a.]: GRS. ISBN 9783939355519

Mrugalla, S. (2014): *Geowissenschaftliche Langzeitprognose für Norddeutschland - ohne Endlagereinfluss (AnSichT)*. Ergebnisbericht. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)

Müller-Hoeppe, N., Buhmann, D., Czaikowski, O., Engelhardt, H.-J., Herbert, H.-J., Lerch, C., Linkamp, M., Wieczorek, K. & Xie, M. (2012): *Integrität geotechnischer Barrieren: Teil 1 Vorbemessung - Bericht zum Arbeitspaket 9.2*. Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS - 287. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) GmbH, DBE TECHNOLOGY GmbH. Köln. ISBN 9783939355632

Müller-Vonmoos, M. & Kohler, E. (1993): *Geotechnik und Entsorgung*. In: K. Jasmund & G. Lagaly (Hrsg.): Tonminerale und Tone: Struktur, Eigenschaften, Anwendungen und Einsatz in Industrie und Umwelt. . S. 312-357, Heidelberg / Darmstadt: Steinkopff. ISBN 978-3-7985-0923-8

Müller, U. & Obst, K. (2008): *Junge halokinetische Bewegungen im Bereich der Salzkissen Schlieven und Marnitz in Südwest-Mecklenburg*. Brandenburgische Geowissenschaftliche Beiträge, Bd. 15, S. 147-154

Murawski, H. & Meyer, W. (2010): *Geologisches Wörterbuch*. 12. Aufl., Heidelberg: Springer Spektrum. ISBN 9783662540503

Nagra (1994): *Kristallin-I Gesamtsynthese der regionalen Untersuchungen zur Endlagerung hochaktiver Abfälle im kristallinen Grundgebirge der Nordschweiz*. Technical Report NTB 93-09. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra). Wettingen, Schweiz

Nagra (2001): *Sondierbohrung Benken Untersuchungsbericht*. TECHNISCHER BERICHT 00-01. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra). Wettingen, Schweiz

Nagra (2002a): *Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis)*. Technical Report 02-05. National

Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste (Nagra). Wettingen, Switzerland. ISBN 1015-2636

Nagra (2002b): *FEP Management for Safety Assessment - Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis)*. Project Opalinus Clay. Technical Report 02-23. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle. Wettingen, Switzerland

Nagra (2002c): *Konzept für die Anlage und den Betrieb eines geologischen Tiefenlagers*. Projekt Opalinuston. Technischer Bericht 02-02. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle. Wettingen, Schweiz

Nagra (2002d): *Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse: Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle*. Projekt Opalinuston. Technischer Bericht 02-03. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra). Wettingen, Schweiz

Nagra (2008a): *Begründung der Abfallzuteilung, der Barrierensysteme und der Anforderungen an die Geologie. Bericht zur Sicherheit und technischen Machbarkeit*. Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA-und das HAA-Lager. NTB 08-05. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle. Wettingen, Schweiz

Nagra (2008b): *Darlegung der Anforderungen, des Vorgehens und der Ergebnisse*. Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager. Technischer Bericht 08-03. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfäll. Wettingen, Schweiz

Nagra (2009): *Alternatives Ausbaukonzept ("Liner concept") für BE/HAA-Lagerstollen*. Standortunabhängige Grundlagen Anlagen und Betrieb SGT-ZE / SUG 2.3. NAB 09-07. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra). Wettingen, Schweiz

Nagra (2014a): *Beurteilung der Tiefenlage in Bezug auf die geotechnischen Bedingungen: Grundlagen für die Abgrenzung und Bewertung der Lagerperimeter*. NAB 14-81. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle. Wettingen, Schweiz

Nagra (2014b): *Ergänzende Sicherheitsbetrachtungen für die Untertageanlagen der geologischen Tiefenlager in der Betriebsphase: Vorgaben, Vorgehen und Dokumentation der Ergebnisse*. NAB 14-51. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra). Wettingen, Schweiz

Nagra (2014c): *Geologische Grundlagen - Dossier VIII: Charakterisierbarkeit und Explorierbarkeit*. SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage. NTB 14-02/VIII. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Nagra). Wettingen, Schweiz

Nagra (2014d): *Sicherheitstechnischer Vergleich und Vorschlag der in Etappe 3 weiter zu untersuchenden geologischen Standortgebiete*. SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage. Technischer Bericht 14-01. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle. Wettingen, Schweiz

Nagra (2016a): *ENSI-Nachforderung zum Indikator "Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit" in SGT Etappe 2 - Zusammenfassende Darstellung der Zusatzdokumentation*. NAB 16-41. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle. Wettingen, Schweiz

Nagra (2016b): *The Nagra Research, Development and Demonstration (RD&D) Plan for the Disposal of Radioactive Waste in Switzerland*. NTB 16-02. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle. Wettingen, Switzerland

Nagra (2021): *The Nagra Research, Development and Demonstration (RD&D) Plan for the Disposal of Radioactive Waste in Switzerland*. Technical Report 21-02. National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste (Nagra). Wettingen, Switzerland

Navarro, M., Weyand, T., Eckel, J. & Fischer, H. (2019): *Indikatoren zur Bewertung des Einschlusses und der Isolation mit exemplarischer Anwendung auf ein generisches Endlagersystem mit dem Wirtsgestein Tongestein*. GRS - A - 3985. Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH. Braunschweig

Nelder, J. A. & Mead, R. (1965): *A Simplex Method for Function Minimization* The Computer Journal, Bd. 7, S. 308-313. DOI: 10.1093/comjnl/7.4.308

Neuzil, C. E. (1994): *How permeable are clays and shales?* Water Resources Research, Bd. 30, S. 145-150. ISSN 0043-1397. DOI: 10.1029/93wr02930

Neuzil, C. E. (2019): *Permeability of Clays and Shales*. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, Bd. 47, S. 247-273. DOI: 10.1146/annurev-earth-053018-060437

Nummi, O. (2019): *Plan for Uncertainty Assessment in the Safety Case for the Operating Licence Application*. Posiva Oy. Eurajoki, Finland. ISBN 9789516522695

OECD-NEA (1997): *Lessons Learnt from Ten Performance Assessment Studies*. OECD Nuclear Energy Agency. Paris, France

OECD-NEA (2013): *The Nature and Purpose of the Post-closure Safety Cases for Geological Repositories*. NEA/RWM/R(2013)1. OECD Nuclear Energy Agenycy. Paris, France

OECD-NEA (2016): *Scenario Development Workshop Synopsis*. NEA/RWM/R(2015)3. OECD Nuclear Energy Agenycy. Paris, France

OECD-NEA (2018): *NEA Feature, Event and Process (FEP) Database*. Paris, France: OECD Nulcear Energy Agency

OECD (2003): *SAFIR 2: Belgian R&D Programme on the Deep Disposal of High-level and Long-lived Radioactive Waste: An International Peer Review*. Paris: Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-Operation and Development. ISBN 92-64-18499-6

Okrusch, M. & Matthes, S. (2014): *Mineralogie - Eine Einführung in die spezielle Mineralogie, Petrologie und Lagerstättenkunde*. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum. ISBN 978-3-642-34660-6. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-34660-6

Oldenburg, C. M. & Pruess, K. (1995): *EOS7R: Radionuclide transport for TOUGH2*. LBL-34868. Lawrence Berkeley National Lab. Berkeley, USA

Padovani, C., King, F., Lilja, C., Féron, D., Necib, S., Crusset, D., Deydier, V., Diomidis, N., Gaggiano, R., Ahn, T., Keech, P. G., Macdonald, D. D., Asano, H., Smart, N., Hall, D. S., Hänninen, H., Engelberg, D., Noël, J. J. & Shoesmith, D. W. (2017): *The corrosion behaviour of candidate container materials for the disposal of high-level waste and spent fuel – a summary of the state of the art and opportunities for synergies in future R&D*. Corrosion Engineering, Science and Technology, Bd. 52, S. 227-231. DOI: 10.1080/1478422X.2017.1356973

Pälchen, W. & Walter, H. (Hrsg.) (2011): *Geologie von Sachsen 1*. 2. Aufl., Geologischer Bau und Entwicklungsgeschichte. Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 9783510652709

Patel, R., Punshon, C., Nicholas, J., Bastid, P., Zhou, R., Schneider, C., Bagshaw, N., Howse, D., Hutchinson, E., Asano, R. & King, F. (2012): *Canister Design Concepts for Disposal of Spent Fuel and High Level Waste*. NTB 12-06. Nagra. Wettingen, Switzerland

Peiffer, F., McStocker, B., Gründler, D., Ewig, F., Thomauske, B., Havenith, A. & Kettler, J. (2012a): *Abfallspezifikation und Mengengerüst - Basis Ausstieg aus der Kernenergienutzung (Juli 2011)*. Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS - 278. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbh, Institut für Sicherheitstechnologie (ISTec) GmbH, international nuclear safety engineering (nse) GmbH. Köln. ISBN 9783939355542

Peiffer, F., McStocker, B., Gründler, D., Ewig, F., Thomauske, B., Havenith, A. & Kettler, J. (2012b): *Abfallspezifikation und Mengengerüst - Basis Laufzeitverlängerung der Kernkraftwerke (September 2010)*. Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbh, Institut für Sicherheitstechnologie (ISTec) GmbH, international nuclear safety engineering (nse) GmbH. Köln. ISBN 9783939355502

Piotrowski, J. A. (2006): *Groundwater Under Ice Sheets and Glaciers*. In: P. G. Knight (Hrsg.): Glacier Science and Environmental Change. S. 50-60, Oxford Blackwell Publishing. ISBN 9781405100182. DOI: https://doi.org/10.1002/9780470750636.ch9

Pismen, L. M. (1974): *Diffusion in porous media of a random structure*. Chemical Engineering Science, Bd. 29, S. 1227-1236. DOI: 10.1016/0009-2509(74)80122-3

Plischke, I. (2007): *Determination of mechanical homogeneous areas in the rock salt mass using creep properties for a classification scheme*. In: M. Wallner, K. H. Lux, W. Minkley & H. R. J. Hardy (Hrsg.): The Mechanical Behavior of Salt – Understanding of THMC Processes in Salt. S. 321-325, London: Taylor & Francis Group. ISBN 9780415443982

Plum, H., Ondreka, J. & Armbruster, V. (2008): *Hydrogeologische Einheiten in Baden-Württemberg*. LGRB-Informationen, Bd. 20, S. 106. ISSN 1619-5329

Pollok, L., Hammer, J. & Musmann, P. (2020): *Salinarstrukturen – Entstehung, Außenformen und Internbau*. In: Deutsche Stratigraphische Kommission (Hrsg.): Stratigraphie von Deutschland XII: Zechstein. S. 559-593, Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, Heft 89, Berlin: DGGV. ISBN 9783510492411

Popp, T. (2022): *Eigenschaften und Potential stratiformer Salz-Formationen für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle*. 37/2021. Institut für Gebirgsmechanik GmbH. Leipzig

Posiva Oy & SKB (2017): *Safety functions, performance targets and technical design requirements for a KBS-3V repository*. Posiva SKB Report 01. Posiva Oy, Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB). Eurajoki (Finland), Stockholm (Sweden)

Prestel, R. & Schloz, W. (2011): *Aufstiege von tiefem Kohlendioxid (CO_2) durch die Opalinuston-Formation in Baden-Württemberg*. Jahreshefte der Gesellschaft für Naturkunde in Württemberg, Bd. 167, S. 163-190

PTKA (2021): *BMWi geförderte FuE-Vorhaben zur „Entsorgung radioaktiver Abfälle“ - Berichtszeitraum: 1. Januar - 30. Juni 2021*. Karlsruher Institut für Technologie. Karlsruhe

Raiko, H. (2005): *Disposal Canister for Spent Nuclear Fuel – Design Report*. Posiva 2005-02. VTT Processes. Olkiluoto, Finland

Ramoni, M., Sommer, M., Jost, P., Janele, S. & Vogelhuber, M. (2016): *Nachforderung des ENSI zum Indikator Tiefenlage im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit*. Expertenbericht im Rahmen der Beurteilung des Vorschlags von mindestens zwei geologischen Standortgebieten pro Lagertyp, Etappe 2, Sachplan geologische Tiefenlager. Prüfbericht ENSI 33/530. Basler & Hofmann AG, Dr. von Moos AG. Brugg, Schweiz

Rappsilber, I. (2003): *Struktur und Entwicklung des nördlichen Saale-Beckens (Sachsen-Anhalt): Geophysik und Geologie*. Dissertation, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Mathematisch-Naturwissenschaftlich-Technische Fakultät S. 120, Halle (Saale), 07.02.2003

Reading, H. G. (2004): *Sedimentary Environments: Processes, Facies and Stratigraphy*. 3. Aufl., Oxford: Blackwell Science. ISBN 0632036273

Reicherter, K., Froitzheim, N., Jarosiński, M., Badura, J., Franzke, H.-J., Hansen, M., Hübscher, C., Müller, R., Poprawa, P., Reinecker, J., Stackebrandt, W., Voigt, T., Eynatten, H. V. & Zuchiewicz, W. (2008): *Alpine tectonics north of the Alps*. In: T. McCann (Hrsg.): The Geology of Central Europe. Bd. 2: Mesozoic and Cenozoic, S. 1232-1285, London: The Geological Society. ISBN 9781862392656. DOI: 10.1144/cev2p.7

Reinhardt, S., Bebiolka, A. C. & Weitkamp, A. (2017): *Pleistozäne übertiefte Strukturen in Süddeutschland*. Pleistozäne übertiefte Strukturen und ihre Bedeutung für die Langzeitsicherheit möglicher Endlagerstandorte in Süddeutschland. Abschlussbericht. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). Berlin

Reinhold, K., Stark, L., Kühnlenz, T. & Ptock, L. (2016): *Endlagerstandortmodell SÜD (AnSichT), Teil I: Beschreibung des geologischen Endlagerstandortmodells*. Ergebnisbericht 9Y3207000000. BGR. Hannover

Reuter, E. (1985): *Entwurf, Prüfung und Eigenschaften mineralischer Basisabdichtungen*. In: H. Mesek (Hrsg.): Abdichten von Deponien, Altlasten und kontaminierten Standorten - Mitteilungen des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik der TU Braunschweig Bd. 20, S. 53-86, Braunschweig: Institut für Grundbau und Bodenmechanik der TU Braunschweig

Revil, A., Grauls, D. & Brévart, O. (2002): *Mechanical compaction of sand/clay mixtures*. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, Bd. 107, S. ECV 11-1-ECV 11-15. DOI: 10.1029/2001JB000318

Richtlinie 2011/70/EURATOM: Richtlinie des Rates vom 19. Juli 2011 über einen Gemeinschaftsrahmen für die verantwortungsvolle und sichere Entsorgung abgebrannter Brennelemente und radioaktiver Abfälle

Röckel, L. & Stober, I. (2017): *Die neue Tiefbohrung Weißenstadt im Granit des Fichtelgebirges*. Grundwasser, Bd. 22, S. 165-173. ISSN 1432-1165. DOI: 10.1007/s00767-017-0361-4

Röhlig, K.-J., Van Luik, A., Schneider, J., Griffault, L., Gierszewski, P., Noseck, U., Mönig, J. & Navarro, M. (2012): *Methods for Safety Assessment of Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste*. Outcomes of the NEA MeSA Initiative, Paris, France: OECD Nuclear Energy Agency. ISBN 9789264991903

RSK (1996): RSK-Leitline für Druckwasserreaktoren - 3. Ausgabe vom 14. Oktober 1981 (Banz 1982, Nr. 69a) mit den Änderungen: in Abschn. 21.1 (BAnz 1984, Nr. 104), in Abschn. 21.2 (BAnz 1983, Nr. 106) und in Abschn. 7 (BAnz 1996, Nr. 158a) mit Berichtigung (BAnz 1996, Nr. 214)

Rupf, I. & Nitsch, E. (2008): *Das geologische Landesmodell von Baden-Württemberg: Datengrundlagen, technische Umsetzung und erste geologische Ergebnisse*. Stand: August 2007. Aufl., LGRB-Informationen, 21, Freiburg: Landesamt f. Geologie, Rohstoffe u. Bergbau

Saanio, T., Kirkkomäki, T., Keto, P., Kukkola, T. & Raiko, H. (2007): *Preliminary Design of the Repository - Stage 2*. Working Report 2006-94. Posiva OY. Olkiluoto, Finland

Saar, M. O. & Manga, M. (2004): *Depth dependence of permeability in the Oregon Cascades inferred from hydrogeologic, thermal, seismic, and magmatic modeling constraints*. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, Bd. 109, S. 1-19. ISSN 01480227. DOI: https://doi.org/10.1029/2003JB002855

Schachl, E. (1987): *Kali- und Steinsalzbergwerk Niedersachsen-Riedel der Kali und Salz AG, Schachtanlage Riedel. - Zechsteinstratigraphie und Innenbau des Salzstockes von*

Wathlingen-Hänigsen. In: J. Kulick & J. Paul (Hrsg.): Internationales Symposium Zechstein - Exkursionsführer. Bd. 1, S. 69-100, Wiesbaden: Subkomm. Perm/Trias d. Stratigr. Komm. DUGW/IUGS

Schön, J. (1983): *Petrophysik: physikalische Eigenschaften von Gesteinen und Mineralen*. Stuttgart: Enke. ISBN 3432929714

Schön, J. H. (2015): *Physical properties of rocks - Fundamentals and Principles of Petrophysics*. 2. Aufl., Developments in Petroleum Science, Amsterdam, Netherlands: Elsevier. ISBN 9780081004043

Schreiber, U. & Jentzsch, G. (2021): *Vulkanische Gefährdung in Deutschland* Bewertung möglicher vulkanischer Aktivitäten der nächsten 1 Million Jahre in Deutschland inklusive Festlegung der Gebiete mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit in diesem Zeitraum. Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH. Bonn

Schreiner, A. (1992): *Erläuterungen zu Blatt Hegau und westlicher Bodensee*. 3. Aufl. Geologische Karte 1 : 50 000 von Baden-Württemberg. Geologisches Landesamt Baden-Württemberg. Freiburg i. Br.

Schreiner, A. (2008): *Hegau und westlicher Bodensee*. 3. Aufl., Sammlung geologischer Führer, Berlin: Gebr. Borntraeger. ISBN 9783443150839

Schweigert, G. (2018): *Der Scharnhäuser Vulkan – eine Bestandsaufnahme 125 Jahre nach Brancos Beschreibung*. Jahreshefte der Gesellschaft für Naturkunde in Württemberg, Bd. 174, S. 191-207. ISSN 03682307. DOI: https://doi.org/10.26251/jhgfn.174.2018.191-207

Scibek, J. (2020): *Multidisciplinary database of permeability of fault zones and surrounding protolith rocks at world-wide sites*. Scientific Data, Bd. 7, S. 1-14. ISSN 20524463. DOI: 10.1038/s41597-020-0435-5

Sebastian, U. (2013): *Die Geologie des Erzgebirges*. Berlin/Heidelberg: Springer Spektrum. ISBN 978-3-8274-2977-3. DOI: 10.1007/978-3-8274-2977-3

Seidel, G. (2004): *Zur Lage und Entwicklung der Zechsteinbasis in Thüringen*. Geowissenschaftliche Mitteilungen von Thüringen, Bd. 11, S. Seite 63 - 69

Seidel, G. (2013): *Stratigraphie, Fazies und geologische Stellung des Zechsteins und der Trias Thüringens*. Beiträge zur Geologie von Thüringen. Neue Folge, Bd. 20, S. 21 - 78

Shmonov, V. M., Vitiovtova, V. M., Zharikov, A. V. & Grafchikov, A. A. (2003): *Permeability of the continental crust: Implications of experimental data*. Journal of Geochemical Exploration, Bd. 78-79, S. 697-699. ISSN 03756742. DOI: https://doi.org/10.1016/S0375-6742(03)00129-8

Simpson, J. H. & Carr, H. Y. (1958): *Diffusion and Nuclear Spin Relaxation in Water*. Physical Review, Bd. 111, S. 1201-1202. DOI: 10.1103/PhysRev.111.1201

Sindern, W. & Borowski, S. (2014): *Sicherheitstechnische Betrachtungen zu Schachtförderanlagen für den Zugang zu einem zukünftigen geologischen Tiefenlager*. NAB 14-75. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle. Wettingen, Schweiz

SKB (2010): *Design and production of the KBS-3 repository*. TR-10-12. Svensk Kärnbränslehantering AB. Stockholm, Sweden

SKB (2011a): *Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark - Volume I*. Main report of the SR-Site project. TR-11-01. Svensk Kärnbränslehantering AB. Stockholm, Sweden

SKB (2011b): *Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark - Volume II*. Main report of the SR-Site project. TR-11-01. Svensk Kärnbränslehantering AB. Stockholm, Sweden

SKB (2011c): *Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark - Volume III*. Main report of the SR-Site project. TR-11-01. Svensk Kärnbränslehantering AB. Stockholm, Sweden

SKB (2015): *Safety analysis for SFR Long-term safety - Main report for the safety assessment SR-PSU*. TR-14-01. Svensk Kärnbränslehantering AB. Stockholm, Sweden

Skiba, P., Gabriel, G., Scheibe, R., Seidemann, O., Vogel, D., Krawczyk, C. & Vinnemann, C. (2010): *Schwerekarte der Bundesrepublik Deutschland 1:1.000.000*. [Internet Webpage]. Hannover: LIAG - Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik. Zugriff am: 08.03.2021. Verfügbar unter https://www.leibniz-liag.de/forschung/methoden/gravimetrie-magnetik/bouguer-anomalien.html

Snowdon, A. P., Normani, S. D. & Sykes, J. F. (2021): *Analysis of Crystalline Rock Permeability Versus Depth in a Canadian Precambrian Rock Setting*. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, Bd. 126, S. 21. DOI: 10.1029/2020JB020998

StandAG: Standortauswahlgesetz vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), das zuletzt durch Artikel 247 der Verordnung vom 19. Juni 2020 (BGBl. I S. 1328) geändert worden ist

StandAG: Standortauswahlgesetz vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 7. Dezember 2020 (BGBl. I S. 2760) geändert worden ist

Stark, L. (2014): *Geowissenschaftliche Langzeitprognose für Süddeutschland - ohne Endlagereinfluss (AnSichT)*. Ergebnisbericht. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)

Stark, L., Gerardi, J., Jahn, S., Jobmann, M., Keller, S., Lommerzheim, A., Meleshyn, A., Mrugalla, S., Reinhold, K. & Rübel, A. (2014): *Projekt ANSICHT FEP-Katalog für das Endlagerstandortmodell NORD – Dokumentation – (Anlage zum Bericht).* DBE TECHNOLOGY GmbH, GRS, BGR. Peine/Hannover

Stark, L., Jahn, S., Jobmann, M., Lommerzheim, A., Meleshyn, A., Mrugalla, S., Reinhold, K. & Rübel, A. (2016): *Projekt ANSICHT - FEP Katalog für das Endlagerstandortmodell SÜD: Konzept und Aufbau*. DBE TECHNOLOGY GmbH, GRS, BGR. Peine/Hannover

Stober, I. (2013): *Die thermalen Karbonat-Aquifere Oberjura und Oberer Muschelkalk im Südwestdeutschen Alpenvorland*. Grundwasser, Bd. 18, S. 259–269. DOI: 10.1007/s00767-013-0236-2

Stober, I. & Bucher, K. (1999): *Origin of salinity of deep groundwater in crystalline rocks*. Terra Nova, Bd. 11, S. 181-185. ISSN 09544879. DOI: https://doi.org/10.1046/j.1365-3121.1999.00241.x

Stober, I. & Bucher, K. (2005): *The upper continental crust, an aquifer and its fluid: hydaulic and chemical data from 4 km depth in fractured crystalline basement rocks at the KTB test site*. Geofluids, Bd. 5, S. 8-19. ISSN 1468-8115. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1468-8123.2004.00106.x

Stober, I. & Bucher, K. (2007): *Hydraulic properties of the crystalline basement*. Hydrogeology Journal, Bd. 15, S. 213-224. ISSN 1435-0157. DOI: 10.1007/s10040-006-0094-4

Stober, I. & Bucher, K. (2015): *Hydraulic conductivity of fractured upper crust: insights from hydraulic tests in boreholes and fluid-rock interaction in crystalline basement rocks*. Geofluids, Bd. 15, S. 161-178. ISSN 1468-8115. DOI: 10.1111/gfl.12104

Stober, I., Wolfgramm, M. & Birner, J. (2014): *Hydrochemie der Tiefenwässer in Deutschland*. Zeitschrift für geologische Wissenschaften, Bd. 41/42, S. 339 – 380

Streckeisen, A. L. (1974): *Classification and nomenclature of plutonic rocks recommendations of the IUGS subcommission on the systematics of Igneous Rocks*. Geologische Rundschau, Bd. 63, S. 773-786. ISSN 1432-1149. DOI: 10.1007/BF01820841

Streckeisen, A. L. (1976): *To each plutonic rock its proper name*. Earth-Science Reviews, Bd. 12, S. 1-33. ISSN 0012-8252. DOI: https://doi.org/10.1016/0012-8252(76)90052-0

StrlSchV: Strahlenschutzverordnung vom 29. November 2018 (BGBl. I S. 2034, 2036), die zuletzt durch Artikel 83 des Gesetzes vom 10. August 2021 (BGBl. I S. 3436) geändert worden ist

Suchi, E., Dittmann, J., Knopf, S., Müller, C. & Schulz, R. (2014): *Geothermie-Atlas zur Darstellung möglicher Nutzungskonkurrenzen zwischen CO_2-Einlagerung (CCS) und Tiefer Geothermie in Deutschland*. Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, Bd. 165, S. 439-453. DOI: 10.1127/1860-1804/2014/0070

Svensk Kärnbränslehantering AB (2000): *Integrated account of method, site selection and programme prior to the site investigation phase*. Technical Report TR-01-03. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co Stockholm

Tartakovsky, D. M. & Dentz, M. (2019): *Diffusion in Porous Media: Phenomena and Mechanisms*. Transport in Porous Media, Bd. 130. DOI: 10.1007/s11242-019-01262-6

Thyberg, B. & Jahren, J. (2011): *Quartz cementation in mudstones: sheet-like quartz cement from clay mineral reactions during burial*. Petroleum Geoscience, Bd. 17, S. 53-63. DOI: 10.1144/1354-079310-028

TLUBN (2021): *Validierung des Zwischenberichts Teilgebiete der Bundesgesellschaft für Endlagerung für die Gebietsanteile Thüringens*. 07.06.2021. Referat 81 Geologische Landesaufnahme, Geologisches Landesarchiv. Thüringer Landesamt für Umwelt, Bergbau und Naturschutz (TLUBN). o. O.

Tsai, D. S. & Strieder, W. (1986): *Effective conductivities of random fiber beds*. Chemical Engineering Communications, Bd. 40, S. 207-218. DOI: 10.1080/00986448608911698

Uhlmann, S. (2016): *Vorgehensweise bei der Szenarienentwicklung in der Nachverschlussphase von Endlagern in tiefen geologischen Formationen*. Bericht zum Arbeitspaket 1: Weiterentwicklung des internationalen Stands von Wissenschaft und Technik zu Methoden und Werkzeugen für Betriebs- und Langzeitsicherheitsnachweise. GRS - 424. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH. Köln. ISBN 9783946607069

UM BW (2018): *Leitlinien Qualitätssicherung Erdwärmesonden (LQS EWS)*. Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg. Stuttgart

Van Loon, L. R. (2014): *Effective diffusion coefficients and porosity values for argillaceous rocks and bentonite: measured and estimated values for the provisional safety analyses for SGT-E2*. NTB 12-03. Paul Scherrer Institut. Villigen, Switzerland

Van Loon, L. R., Baeyens, B. & Bradbury, M. H. (2005): *Diffusion and retention of sodium and strontium in Opalinus clay: Comparison of sorption data from diffusion and batch sorption measurements, and geochemical calculations*. Applied Geochemistry, Bd. 20, S. 2351-2363. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2005.08.008

Van Loon, L. R., Soler, J. M., Müller, W. & Bradbury, M. H. (2004): *Anisotropic diffusion in layered argillaceous rocks: a case study with Opalinus Clay*. Environmental Science & Technology, Bd. 38, S. 5721-5728

van Marcke, P. & Laenen, B. (2005): *The Ypresian clays as possible host rock for radioactive waste disposal: an evaluation*. Belgian Agency for Radioactive Waste and Enriched Fissile Materials (ONDRAF/NIRAS). Brussels, Belgium

Vigfusson, J., Maudoux, J., Raimbault, P., Röhlig, K.-J. & Smith, R. E. (2007): *European Pilot Study on The Regulatory Review of the Safety Case for Geological Disposal of Radioactive Waste - Case Study: Uncertainties and their Management*. Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen (HSK), Federaal Agentschap voor Nucleaire Controle – L'Agence fédérale de Contrôle nucléaire (FANC – AFCN), Autorité de sûreté nucléaire (ASN), Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Environment Agency. o. O.

Villinger, E. & Franz, M. (2011): *Erläuterungen zu Geologische Übersichts- und Schulkarte von Baden-Württemberg 1:1000000*. 13., völlig neu bearb. Aufl. Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg. Freiburg

Virtanen, P., Gommers, R., Oliphant, T. E., Haberland, M., Reddy, T., Cournapeau, D., Burovski, E., Peterson, P., Weckesser, W., Bright, J., van der Walt, S. J., Brett, M., Wilson, J., Millman, K. J., Mayorov, N., Nelson, A. R. J., Jones, E., Kern, R., Larson, E., Carey, C. J., Polat, I., Feng, Y., Moore, E. W., VanDerPlas, J., Laxalde, D., Perktold, J., Cimrman, R., Henriksen, I., Quintero, E. A., Harris, C. R., Archibald, A. M., Ribeiro, A. H., Pedregosa, F. & van Mulbregt, P. (2020): *SciPy 1.0: fundamental algorithms for scientific computing in Python*. Nature methods, Bd. 17, S. 261-272. DOI: 10.1038/s41592-019-0686-2

Völkner, E., Kühnlenz, T., Hammer, J. & Gast, S. (2017): *Entwicklung generischer Modelle für flach lagernde Salze: Ergebnisse aus dem Vorhaben KOSINA*. Ergebnisbericht. Hannover: BGR

von Goerne, G., Fleig, S., Rokahr, R. & Donadei, S. (2016): *Informationssystem Salzstrukturen: Planungsgrundlagen, Auswahlkriterien und Potentialabschätzung für die Errichtung von Salzkavernen zur Speicherung von Erneuerbaren Energien (InSpEE) (Wasserstoff und Druckluft)*. Archivstück Sachbericht 03ESP323B. BGR - Institut für Geotechnik (LUH) - KBB Underground Technologies. Hannover / Julich

von Hodenberg, R., Fischbeck, R. & Kuhn, R. (1987): *Beitrag zur Kenntnis der Salzminerale, Salzgesteine und Salzlagerstätten, insbesondere im deutschen Zechstein - Teil II: Salzgesteine*. Der Aufschluss, Bd. 38, S. 77-92

Wagner, H. (2019): *Deep Mining: A Rock Engineering Challenge*. Rock Mechanics and Rock Engineering, Bd. 52, S. 1417-1446. DOI: 10.1007/s00603-019-01799-4

Wallrauch, E. (1969): *Verwitterung und Entspannung bei überkonsolidierten tonig-schluffigen Gesteinen in Südwestdeutschland*. Dissertation, Eberhard-Karls-Universität Tübingen, S. 184, Tübingen,

Warsitzka, M., Jähne-Klingberg, F., Kley, J. & Kukowski, N. (2019): *The timing of salt structure growth in the Southern Permian Basin (Central Europe) and implications for basin dynamics*. Basin Research, Bd. 31, S. 337-360. ISSN 0950091X. DOI: https://doi.org/10.1111/bre.12323

Weinlich, F. H. (2014): *Carbon dioxide controlled earthquake distribution pattern in the NW Bohemian swarm earthquake region, western Eger Rift, Czech Republic–gas migration in the crystalline basement*. Geofluids, Bd. 14, S. 143-159. ISSN 14688115. DOI: 10.1111/gfl.12058

Weinlich, F. H., Bräuer, K., Kämpf, H., Strauch, G., Tesař, J. & Weise, S. M. (1999): *An active subcontinental mantle volatile system in the western Eger rift, Central Europe: Gas flux, isotopic (He, C, and N) and compositional fingerprints*. Geochimica et Cosmochimica Acta,

Bd. 63, S. 3653-3671. ISSN 00167037. DOI: https://doi.org/10.1016/S0016-7037(99)00187-8

Weiskirchner, W. (1972): *Einführung zur Exkursion in den Hegau*. Fortschritte der Mineralogie, Bd. 50, S. 70-84

Weiskirchner, W. (1975): *Vulkanismus und Magmenentwicklung im Hegau*. Jahresberichte und Mitteilungen des oberrheinischen geologischen Vereins, Bd. 57, S. 117-134. DOI: 10.1127/jmogv/57/1975/117

Weissberg, H. L. (1963): *Effective Diffusion Coefficient in Porous Media*. Journal of Applied Physics, Bd. 34, S. 2636-2639. DOI: 10.1063/1.1729783

Wellmann, F. & Caumon, G. (2018): *3-D Structural geological models: Concepts, methods, and uncertainties*. In: C. Schmelzbach (Hrsg.): Advances in Geophysics. Bd. 59, S. 1-121, Cambridge, USA: Elsevier. ISBN 9780128152089

Wenzel, T. (2012): *The plutonic rocks of the Meissen Massif (Germany): evidence for subduction-modified mantle components in a strike-slip related Variscan intrusion*. In: R. L. Romer, H.-J. Förster, U. Kroner, A. Müller, R. Rößler, J. Rötzler, R. Seltmann & T. Wenzel (Hrsg.): Granites of the Erzgebirge: relation of magmatism to the metamorphic and tectonic evolution of the Variscan Orogen. S. 37-52, Scientific Technical Report 12/15, Potsdam: GFZ German Research Centre for Geosciences. ISBN 16100956. DOI: 10.2312/GFZ.b103-12158

Whiterspoon, P. A. & Bodvarsson, G. S. (2001): *Introduction to Geological Challenges in Radioactive Waste Isolation: Third Worldwide Review*. In:°P. A. Whiterspoon & G. S. Bodvarsson (Hrsg.): *Geological challenges in radioactive waste isolation: Third worldwide review*, Berkeley, CA (US), 27/28 -04 - 2001. U.S.A.: Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory - University of California Berkeley , California 94720 U.S.A.

Wieser, U., Burger, M. & Beyerle, P. (2014): *Sicherheitstechnische Betrachtungen zu Zahnradbahnen für den Zugang zu einem zukünftigen geologischen Tiefenlager*. NAB 14-76. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle. Wettingen, Schweiz

Wild, H. (1951): *Zur Bildungsgeschichte der Braunjura-ß-Flöze und ihrer Begleitgesteine in Nordost-Württemberg*. Geologisches Jahrbuch, Bd. 65, S. 271-298

Winkler, G. & Reichl, P. (2014): *Scale dependent hydraulic investigations of faulted crystalline rocks—Examples from the Eastern Alps, Austria*. In: J. M. Sharp (Hrsg.): Fractured Rock Hydrogeology. Bd. 20, S. 181-196, London, UK: CRC Press, Taylor & Francis Group. ISBN 9781138001596

Wolf, J. (2012): *FEP-Katalog für die VSG*. Konzept und Aufbau ; Berichte zum Arbeitspaket 7. Bericht GRS 282/283. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS). Köln, Garching b. München, Berlin, Braunschweig

Wolf, J., Behlau, J., Beuth, T., Bracke, G., Bube, C., Buhmann, D., Dresbach, C., Hammer, J., Keller, S., Kienzler, B., Klinge, H., Krone, J., Lommerzheim, A., Metz, V., Mönig, J., Mrugalla, S., Popp, T., Rübel, A. & Weber, J. R. (2012): *FEP-Katalog für die VSG Dokumentation*. Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-283. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), DBE Technology GmbH, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Institut für Gebirgsmechanik (IfG), Karlsruher Institut für Technologie. Köln, Garching b. München, Berlin, Braunschweig

Wolf, J., Lommerzheim, A., Bertrams, N., Buhmann, D., Filbert, W., Förster, B., Herold, P., Leonhard, J., Noseck, U. & Prignitz, S. (2020): *Bewertung der Abhängigkeiten zwischen dem sicheren Bau und Betrieb eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle und der Langzeitsicherheit*.

Synthese der Ergebnisse aus dem Vorhaben BASEL. GRS - 617. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH. Braunschweig. ISBN 9783949088032

Worden, R. H. & Burley, S. D. (2003): *Sandstone Diagenesis: The Evolution of Sand to Stone*. In: R. H. Worden & S. D. Burley (Hrsg.): Sandstone Diagenesis: Recent and Ancient. S. 1-44, 4, Malden, USA: Blackwell Publishing Ltd. ISBN 9781444304459. DOI: 10.1002/9781444304459.ch

Xiang, Y., Al, T., Scott, L. & Loomer, D. (2013): *Diffusive anisotropy in low-permeability Ordovician sedimentary rocks from the Michigan Basin in southwest Ontario*. Journal of Contaminant Hydrology, Bd. 155, S. 31-45. DOI: 10.1016/j.jconhyd.2013.09.002

Zentrales Geologisches Institut (1963): *Kalisalzprognose Teil I – DDR-Südteil: Isopachenkarte des Staßfurtsteinsalzes (Na2)*. 1:200000. Berlin: Zentrales Geologisches Institut

Ziegler, P. A. (1990): *Geological Atlas of Western and Central Europe*. 2. Aufl., Den Haag: Shell Internationale Petroleum Maatschappij. ISBN 9789066441255

Zimmermann, H.-J. (2001): *Fuzzy Set Theory and Its Applications*. 4. Aufl., Dordrecht, Netherlands: Springer. ISBN 9780792374350. DOI: 10.1007/978-94-010-0646-0

Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
Eschenstraße 55
31224 Peine
T +49 05171 43-0
poststelle@bge.de
www.bge.de