



BUNDESGESELLSCHAFT
FÜR ENDLAGERUNG

Teilgebiete und Anwendung
**Geowissenschaftliche Abwägungskriterien
gemäß § 24 StandAG**

(Untersetzende Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete)

Stand 28.09.2020

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	2
Abbildungsverzeichnis	4
Abbildungsverzeichnis der Anhänge	5
Tabellenverzeichnis	5
Tabellenverzeichnis der Anhänge	6
Anhangsverzeichnis	10
Anlagenverzeichnis	14
Abkürzungsverzeichnis	15
Glossar	16
1 Einleitung	17
1.1 Veranlassung	17
1.2 Gegenstand und Zielstellung	17
1.3 Abgrenzung	19
2 Zusammenfassung	20
3 Gesetzliche Grundlagen für die Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien	22
4 Datengrundlage	27
5 Vorgehensweise bei der Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien gemäß § 24	30
5.1 Benennung der Gebiete	30
5.2 Entwicklung der Vorgehensweise	31
5.3 Grundlegende Vorgehensweise	34
5.4 Anwendungsprinzipien	36
5.5 Bewertungsmodul	37
5.6 Vorgehensweise zur Bewertung	38
5.6.1 Vorgehensweise zur Bewertung der Indikatoren	38
5.6.1.1 Anlage 2 (zu § 24 Abs. 3) StandAG	41
5.6.1.2 Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG	47
5.6.1.3 Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG	49
5.6.1.4 Anlage 11 (zu § 24 Abs. 5) StandAG	49
5.6.2 Vorgehensweise zur Bewertung der Kriterien	55
5.6.2.1 Anlage 2 (zu § 24 Abs. 3) StandAG	56
5.6.2.2 Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG	57
5.6.2.3 Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG	57

5.6.2.4	Anlage 11 (zu § 24 Abs. 5) StandAG	58
5.6.3	Vorgehensweise bei der zusammenfassenden Bewertung	58
5.7	Qualitätssicherung	59
6	Darstellung der Ergebnisse	59
6.1	Ergebnisse aus den Referenzdatensätzen	61
6.1.1	Ergebnisse aus dem Referenzdatensatz für Tongestein	61
6.1.2	Ergebnisse aus dem Referenzdatensatz für kristallines Wirtsgestein	63
6.1.3	Ergebnisse aus dem Referenzdatensatz für Steinsalz	66
6.2	Ergebnisse der Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien nach § 24 StandAG	69
7	Literaturverzeichnis	196
	Anzahl der Blätter dieses Dokumentes	213

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Schematischer Ablauf des Standortauswahlverfahrens	18
Abbildung 2:	Generelles Vorgehen für die Ermittlung der Teilgebiete	18
Abbildung 3:	Übersichtskarte aller im Rahmen von § 13 StandAG ermittelten Teilgebiete.	21
Abbildung 4:	Vorgehensweise in der Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien (§ 24 StandAG) für die Ermittlung der Teilgebiete auf Grundlage der identifizierten Gebiete (§ 13 StandAG)	35
Abbildung 5:	Schematische Darstellung der Indikatoren „Barrierenmächtigkeit“, „Teufe der oberen Begrenzung des erforderlichen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ und „flächenhafte Ausdehnung“ nach Anlage 2 (zu § 24 Abs. 3) StandAG.	42
Abbildung 6:	Schematische Visualisierung der Anwendung des Indikators „Teufe der oberen Begrenzung des erforderlichen einschlusswirksamen Gebirgsbereiches [m unter Geländeoberfläche]“ (Anlage 2 (zu § 24) StandAG), welche zu einer „günstigen“ Bewertung führt	45
Abbildung 7:	Schematische Visualisierung der Anwendung des Indikators „Teufe der oberen Begrenzung des erforderlichen einschlusswirksamen Gebirgsbereiches [m unter Geländeoberfläche]“ (Anlage 2 (zu § 24) StandAG), welche zu einer „bedingt günstigen“ Bewertung führt	45
Abbildung 8:	Klassifizierung der Doppelsalinare nach verschiedenen Internbau- typen, die Oberrotliegendesalinare werden in Rot und die Zechsteinsalinare in Blau und Grün dargestellt (Fleig & Röhling 2019)	48
Abbildung 9:	Anwendungsbeispiele zur Bewertung identifizierter Gebiete nach Anlage 11 (zu § 24) StandAG.	52
Abbildung 10:	Übersichtskarte der Teilgebiete im Wirtsgestein Tongestein.	73
Abbildung 11:	Übersichtskarte der Teilgebiete im kristallinen Wirtsgestein auf dem Gebiet der Bundesrepublik Deutschland	74
Abbildung 12:	Übersichtskarte der Teilgebiete im Wirtsgestein Steinsalz.	75

Abbildungsverzeichnis der Anhänge

Abbildung A. 1:	Auszug aus Anlage 11 (zu § 24 Abs. 5) StandAG – keine Ausprägung struktureller Komplikationen (zum Beispiel Störungen, Scheitelgräben, Karststrukturen) im Deckgebirge, aus denen sich subrosive, hydraulische oder mechanische Beeinträchtigungen für den einschlusswirksamen Gebirgsbereich ergeben könnten	189
Abbildung A. 2:	Interpretierte Seismikprofile durch den nördlichen ORG: CS 1 aus der 3D Seismik (Rhein Petroleum GmbH), CS 2 ist das Profil DEKORP 9N.	191
Abbildung A. 3:	Aus Meschede (2018): „Vorkommen von Erdbeben in Deutschland und angrenzenden Gebieten mit einer Auswahl von Erdbebenlokationen der letzten 100 Jahre sowie einigen älteren historischen Erdbeben.“	193

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Erklärung der Kürzel für die Benennung identifizierter Gebiete und Teilgebiete	31
Tabelle 2:	Übersicht der Vorgehensweise je Kriterium einschließlich der zugehörigen Indikatoren (Anlage zu § 24 StandAG) und je Wirtsgesteinskonfiguration	39
Tabelle 3:	Barrieregesteinsmächtigkeiten, welche für die Anwendung des Indikators „Barrierenmächtigkeit“ (verdoppelte Barrierenmächtigkeit aus Anlage 2 (zu § 24 Abs. 3) StandAG) verwendet wurden	43
Tabelle 4:	Flächenbedarfe entsprechend der Begründung des Gesetzentwurfes vom 07.03.2017 (BT-Drs. 18/11398).	44
Tabelle 5:	Werte der vielfachen flächenhaften Ausdehnungen für die verschiedenen Wirtsgesteine, welche für die Anwendung des Indikators „flächenhafte Ausdehnung bei gegebener Mächtigkeit (Vielfaches des Mindestflächenbedarfs)“ (Auszug aus Anlage 2 (zu § 24) StandAG)	46
Tabelle 6:	Überblick über die Verortung der Ergebnisse, die aus der Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien hervorgehen, zu jedem Kriterium nach den Anlagen 1 bis 10 (zu §24 Abs. 3 bis 5) StandAG.	60
Tabelle 7:	Übersicht der Bewertung der Kriterien (Anlagen nach § 24 Abs. 3 bis 5 StandAG) und der zugehörigen Indikatoren nach Referenzdatensatz für das Wirtsgestein Tongestein	62
Tabelle 8:	Übersicht der Bewertung der Kriterien (Anlagen nach § 24 Abs. 3 bis 5 StandAG) und der zugehörigen Indikatoren nach Referenzdatensatz für kristallines Wirtsgestein	64
Tabelle 9:	Übersicht der Bewertung der Kriterien (Anlagen nach § 24 Abs. 3 bis 5 StandAG) und der zugehörigen Indikatoren nach Referenzdatensatz für das Wirtsgestein Steinsalz	67

Tabelle 10:	Tabellarische Übersicht aller Teilgebiete mit Nummern der Teilgebiete (TG-Nummern), Nummern der Identifizierte Gebiete (IG-Nummern) und Wirtsgestein des entsprechenden Teilgebiets	69
-------------	---	----

Tabellenverzeichnis der Anhänge

Tabelle A. 1:	Bewertung der Indikatoren für das Kriterium nach Anlage 1 (zu § 24 Abs. 3) StandAG nach Referenzdatensatz für Tongestein	76
Tabelle A. 2:	Bewertung der Indikatoren für das Kriterium nach Anlage 5 (zu § 24 Abs. 4) StandAG nach Referenzdatensatz für Tongestein	77
Tabelle A. 3:	Bewertung der Indikatoren für das Kriterium nach Anlage 6 (zu § 24 Abs. 4) StandAG nach Referenzdatensatz für Tongestein	78
Tabelle A. 4:	Bewertung des Indikators für das Kriterium nach Anlage 7 (zu § 24 Abs. 5) StandAG nach Referenzdatensatz für Tongestein	79
Tabelle A. 5:	Bewertung der Indikatoren für das Kriterium nach Anlage 8 (zu § 24 Abs. 5) StandAG nach Referenzdatensatz für Tongestein	80
Tabelle A. 6:	Bewertung der Indikatoren für das Kriterium nach Anlage 9 (zu § 24 Abs. 5) StandAG nach Referenzdatensatz für Tongestein	80
Tabelle A. 7:	Bewertung der Indikatoren für das Kriterium nach Anlage 10 (zu § 24 Abs. 5) StandAG nach Referenzdatensatz für Tongestein	81
Tabelle A. 8:	Bewertung der Indikatoren für das Kriterium nach Anlage 1 (zu § 24 Abs. 3) StandAG nach Referenzdatensatz für kristallines Wirtsgestein	82
Tabelle A. 9:	Bewertung der Indikatoren für das Kriterium nach Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG nach Referenzdatensatz für kristallines Wirtsgestein	83
Tabelle A. 10:	Bewertung der Indikatoren für das Kriterium nach Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG nach Referenzdatensatz für kristallines Wirtsgestein	85
Tabelle A. 11:	Bewertung der Indikatoren für das Kriterium nach Anlage 5 (zu § 24 Abs. 4) StandAG nach Referenzdatensatz für kristallines Wirtsgestein	85
Tabelle A. 12:	Bewertung der Indikatoren für das Kriterium nach Anlage 6 (zu § 24 Abs. 4) StandAG nach Referenzdatensatz für kristallines Wirtsgestein	87
Tabelle A. 13:	Bewertung des Indikators für das Kriterium nach Anlage 7 (zu § 24 Abs. 5) StandAG nach Referenzdatensatz für kristallines Wirtsgestein	87

Tabelle A. 14:	Bewertung der Indikatoren für das Kriterium nach Anlage 8 (zu § 24 Abs. 5) StandAG nach Referenzdatensatz für kristallines Wirtsgestein	88
Tabelle A. 15:	Bewertung der Indikatoren für das Kriterium nach Anlage 9 (zu § 24 Abs. 5) StandAG nach Referenzdatensatz für kristallines Wirtsgestein	88
Tabelle A. 16:	Bewertung der Indikatoren für das Kriterium nach Anlage 10 (zu § 24 Abs. 5) StandAG nach Referenzdatensatz für kristallines Wirtsgestein	89
Tabelle A. 17:	Bewertung der Indikatoren für das Kriterium nach Anlage 1 (zu § 24 Abs. 3) StandAG nach Referenzdatensatz für Steinsalz	90
Tabelle A. 18:	Bewertung der Indikatoren für das Kriterium nach Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG nach Referenzdatensatz für Steinsalz	91
Tabelle A. 19:	Bewertung der Indikatoren für das Kriterium nach Anlage 5 (zu § 24 Abs. 4) StandAG nach Referenzdatensatz für Steinsalz	92
Tabelle A. 20:	Bewertung der Indikatoren für das Kriterium nach Anlage 6 (zu § 24 Abs. 4) StandAG nach Referenzdatensatz für Steinsalz	92
Tabelle A. 21:	Bewertung der Indikatoren für das Kriterium nach Anlage 7 (zu § 24 Abs. 5) StandAG nach Referenzdatensatz für Steinsalz	93
Tabelle A. 22:	Bewertung der Indikatoren für das Kriterium nach Anlage 8 (zu § 24 Abs. 5) StandAG nach Referenzdatensatz für Steinsalz	94
Tabelle A. 23:	Bewertung der Indikatoren für das Kriterium nach Anlage 9 (zu § 24 Abs. 5) StandAG nach Referenzdatensatz für Steinsalz	94
Tabelle A. 24:	Bewertung der Indikatoren für das Kriterium nach Anlage 10 (zu § 24 Abs. 5) StandAG nach Referenzdatensatz für Steinsalz	95
Tabelle A. 25:	Bewertung des Kriteriums „Transport radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich“ aus Anlage 1 (zu § 24 Abs. 3) StandAG nach Referenzdatensatz für Tongestein	97
Tabelle A. 26:	Bewertung des Kriteriums „günstige gebirgsmechanische Eigenschaften“ aus Anlage 5 (zu § 24 Abs. 4) StandAG nach Referenzdatensatz für Tongestein	97
Tabelle A. 27:	Bewertung des Kriteriums „Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten“ aus Anlage 6 (zu § 24 Abs. 4) StandAG nach Referenzdatensatz für Tongestein	98
Tabelle A. 28:	Bewertung des Kriteriums „Gasbildung“ aus Anlage 7 (zu § 24 Abs. 5) StandAG nach Referenzdatensatz für Tongestein	98
Tabelle A. 29:	Bewertung des Kriteriums „Temperaturverträglichkeit“ aus Anlage 8 (zu § 24 Abs. 5) StandAG nach Referenzdatensatz für Tongestein	98
Tabelle A. 30:	Bewertung des Kriteriums „Rückhaltevermögen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich“ aus Anlage 9 (zu § 24 Abs. 5) StandAG nach Referenzdatensatz für Tongestein	99

Tabelle A. 31:	Bewertung des Kriteriums „hydrochemische Verhältnisse“ aus Anlage 10 (zu § 24 Abs. 5) StandAG nach Referenzdatensatz für Tongestein	99
Tabelle A. 32:	Bewertung des Kriteriums „Transport radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich“ aus Anlage 1 (zu § 24 Abs. 3) StandAG nach Referenzdatensatz für kristallines Wirtsgestein	100
Tabelle A. 33:	Bewertung des Kriteriums „Bewertung der räumlichen Charakterisierbarkeit“ aus Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG nach Referenzdatensatz für kristallines Wirtsgestein	100
Tabelle A. 34:	Bewertung des Kriteriums „Langfristige Stabilität der günstigen Verhältnisse“ aus Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG nach Referenzdatensatz für kristallines Wirtsgestein	101
Tabelle A. 35:	Bewertung des Kriteriums „günstige gebirgsmechanische Eigenschaften“ aus Anlage 5 (zu § 24 Abs. 4) StandAG nach Referenzdatensatz für kristallines Wirtsgestein	101
Tabelle A. 36:	Bewertung des Kriteriums „Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten“ aus Anlage 6 (zu § 24 Abs. 4) StandAG nach Referenzdatensatz für kristallines Wirtsgestein	102
Tabelle A. 37:	Bewertung des Kriteriums „Gasbildung“ aus Anlage 7 (zu § 24 Abs. 5) StandAG nach Referenzdatensatz für kristallines Wirtsgestein	102
Tabelle A. 38:	Bewertung des Kriteriums „Temperaturverträglichkeit“ aus Anlage 8 (zu § 24 Abs. 5) StandAG nach Referenzdatensatz für kristallines Wirtsgestein	102
Tabelle A. 39:	Bewertung des Kriteriums „Rückhaltevermögen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich“ aus Anlage 9 (zu § 24 Abs. 5) StandAG nach Referenzdatensatz für kristallines Wirtsgestein	103
Tabelle A. 40:	Bewertung des Kriteriums „hydrochemische Verhältnisse“ aus Anlage 10 (zu § 24 Abs. 5) StandAG nach Referenzdatensatz für kristallines Wirtsgestein	103
Tabelle A. 41:	Bewertung des Kriteriums „Transport radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich“ aus Anlage 1 (zu § 24 Abs. 3) StandAG nach Referenzdatensatz für Steinsalz	104
Tabelle A. 42:	Bewertung des Kriteriums „Langfristige Stabilität der günstigen Verhältnisse“ aus Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG nach Referenzdatensatz für Steinsalz	104
Tabelle A. 43:	Bewertung des Kriteriums „günstige gebirgsmechanische Eigenschaften“ aus Anlage 5 (zu § 24 Abs. 4) StandAG nach Referenzdatensatz für Steinsalz	105
Tabelle A. 44:	Bewertung des Kriteriums „Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten“ aus Anlage 6 (zu § 24 Abs. 4) StandAG nach Referenzdatensatz für Steinsalz	105
Tabelle A. 45:	Bewertung des Kriteriums „Gasbildung“ aus Anlage 7 (zu § 24 Abs. 5) StandAG nach Referenzdatensatz für Steinsalz	105

Tabelle A. 46:	Bewertung des Kriteriums „Temperaturverträglichkeit“ aus Anlage 8 (zu § 24 Abs. 5) StandAG nach Referenzdatensatz für Steinsalz	106
Tabelle A. 47:	Bewertung des Kriteriums „Rückhaltevermögen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich“ aus Anlage 9 (zu § 24 Abs. 5) StandAG nach Referenzdatensatz für Steinsalz	106
Tabelle A. 48:	Bewertung des Kriteriums „hydrochemische Verhältnisse“ aus Anlage 10 (zu § 24 Abs. 5) StandAG nach für Referenzdatensatz Steinsalz	107
Tabelle A. 49:	Wertungsgruppen und Mächtigkeitbereiche nach Anlage 2 (zu § 24 Abs. 3) StandAG. Die Werte wurden hier verdoppelt, da die gesamte Mächtigkeit betrachtet wurde, siehe Kapitel 5.6.1.1.	108
Tabelle A. 50:	Wertungsgruppen und Mächtigkeitbereiche für den Indikator "Teufe der oberen Begrenzung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs" aus Anlage 2 (zu § 24 Abs. 3) StandAG	110
Tabelle A. 51:	Wertungsgruppen und Größen für den Indikator "Flächenhafte Ausdehnung" aus Anlage 2 (zu § 24) StandAG, beispielhaft für Tongestein	112
Tabelle A. 52:	Auszug aus Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG – Kriterium zur Bewertung der räumlichen Charakterisierbarkeit	186
Tabelle A. 53:	Auszug aus Anlage 11 (zu § 24 Abs. 5) StandAG – keine Ausprägung struktureller Komplikationen (zum Beispiel Störungen, Scheitelgräben, Karststrukturen) im Deckgebirge, aus denen sich subrosive, hydraulische oder mechanische Beeinträchtigungen für den einschlusswirksamen Gebirgsbereich ergeben könnten	188

Anhangsverzeichnis

Anhang 1	Bewertungen der Indikatoren nach den Referenzdatensätzen (BGE 2020b)	76
Anhang 1.1	Bewertung der Indikatoren nach Referenzdatensatz für Tongestein	76
Anhang 1.2	Bewertung der Indikatoren nach Referenzdatensatz für kristallines Wirtsgestein	82
Anhang 1.3	Bewertung der Indikatoren nach Referenzdatensatz für Steinsalz	90
Anhang 2	Bewertung der Kriterien nach Referenzdatensätzen (BGE 2020b)	97
Anhang 2.1	Bewertung der Kriterien nach Referenzdatensatz für Tongestein	97
Anhang 2.2	Bewertung der Kriterien nach dem Referenzdatensatz für kristallines Wirtsgestein	99
Anhang 2.3	Bewertung der Kriterien nach dem Referenzdatensatz Steinsalz	104
Anhang 3	Ergänzungen zur Vorgehensweise der Bewertung von Anlage 2 (zu § 24 Abs. 3) StandAG (ArcGIS-Workflow für die Wirtsgesteine Tongestein, stratiformes Steinsalz sowie das kristalline Wirtsgestein)	108
Anhang 3.1	Indikator „Barrierenmächtigkeit [m]“	108
Anhang 3.2	Indikator „Teufe der oberen Begrenzung des erforderlichen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs [m unter Geländeoberfläche]“	110
Anhang 3.3	Indikator „Flächenhafte Ausdehnung bei gegebener Mächtigkeit (Vielfaches des Mindestflächenbedarfs)“	111
Anhang 4	Ergänzungen zur Vorgehensweise der Bewertung von Anlage 3 und 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG im Tongestein	113
Anhang 4.1	Tertiär	113
Anhang 4.1.1	Miozän (Jüngere Untere Meeresmolasse – Voralpines Molassebecken)	113
Anhang 4.1.1.1	Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG	113
Anhang 4.1.1.2	Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG	115
Anhang 4.1.2	Miozän (Ältere Untere Meeresmolasse - Voralpines Molassebecken)	115
Anhang 4.1.2.1	Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG	115
Anhang 4.1.2.2	Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG	117
Anhang 4.1.3	Eozän (Oberrheingraben – Landau Formation)	117
Anhang 4.1.3.1	Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG	117
Anhang 4.1.3.2	Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG	118
Anhang 4.1.4	Paläogen (Tertiär Norddeutsches Becken)	119

Anhang 4.1.4.1	Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG	119
Anhang 4.1.4.2	Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG	120
Anhang 4.2	Jura	121
Anhang 4.2.1	Mittlerer Jura (Dogger Norddeutsches Becken)	121
Anhang 4.2.1.1	Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG	121
Anhang 4.2.1.2	Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG	123
Anhang 4.2.2	Mittlerer Jura Opalinuston-Formation Süddeutschland)	123
Anhang 4.2.2.1	Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG	124
Anhang 4.2.2.2	Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG	125
Anhang 4.2.3	Mittlerer Jura (Opalinuston-Formation Süddeutschland)	125
Anhang 4.2.3.1	Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG	125
Anhang 4.2.3.2	Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG	127
Anhang 4.2.4	Unterjura (Lias-Norddeutsches Becken)	127
Anhang 4.2.4.1	Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG	127
Anhang 4.2.4.2	Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG	129
Anhang 4.3	Kreide	129
Anhang 4.3.1	Oberkreiden (Ostbrandenburg-Senke und Nordsudetische Senke)	129
Anhang 4.3.1.1	Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG	130
Anhang 4.3.1.2	Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG	131
Anhang 4.3.2	Oberkreide (Münsterländer Kreidebecken)	132
Anhang 4.3.2.1	Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG	132
Anhang 4.3.2.2	Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG	133
Anhang 4.3.3	Unterkreide (Norddeutschland)	133
Anhang 4.3.3.1	Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG	133
Anhang 4.3.3.2	Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG	135
Anhang 4.3.4	Unterkreide (Norddeutschland)	135
Anhang 4.3.4.1	Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG	136
Anhang 4.3.4.2	Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG	137
Anhang 5	Ergänzungen zur Vorgehensweise der Bewertung von Anlage 3 und 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG in stratiformen Salzformationen	139
Anhang 5.1	Tertiär	139
Anhang 5.1.1	Tertiär (Oberrheingraben)	139
Anhang 5.1.1.1	Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG	139
Anhang 5.1.1.2	Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG	140
Anhang 5.2	Malm	141
Anhang 5.2.1	Malm (Nordost Deutschland)	141
Anhang 5.2.1.1	Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG	141
Anhang 5.2.1.2	Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG	142
Anhang 5.3	Keuper	143

Anhang 5.3.1	Keuper (Glückstadt-Graben und nördliches Norddeutsches Becken)	144
Anhang 5.3.1.1	Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG	144
Anhang 5.3.1.2	Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG	145
Anhang 5.3.2	Keuper (Östliches Niedersächsisches Becken)	145
Anhang 5.3.2.1	Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG	146
Anhang 5.3.2.2	Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG	146
Anhang 5.3.3	Keuper (Westschleswig-Block)	147
Anhang 5.3.3.1	Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG	147
Anhang 5.3.3.2	Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG	148
Anhang 5.4	Muschelkalk	149
Anhang 5.4.1	Muschelkalk (Südliches Norddeutsches Becken)	151
Anhang 5.4.1.1	Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG	151
Anhang 5.4.1.2	Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG	151
Anhang 5.4.2	Muschelkalk (Münsterländer Tieflandsbucht)	152
Anhang 5.4.2.1	Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG	152
Anhang 5.4.2.2	Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG	153
Anhang 5.4.3	Muschelkalk (Harzvorland)	154
Anhang 5.4.3.1	Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG	154
Anhang 5.4.3.2	Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG	154
Anhang 5.4.4	Muschelkalk – Identifiziertes Gebiet 4 (Nordöstliches Niedersächsisches Becken)	155
Anhang 5.4.4.1	Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG	155
Anhang 5.4.4.2	Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG	156
Anhang 5.4.5	Muschelkalk (Glückstadt-Graben)	157
Anhang 5.4.5.1	Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG	157
Anhang 5.4.5.2	Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG	158
Anhang 5.5	Buntsandstein	159
Anhang 5.5.1	Buntsandstein (Südliches Norddeutsches-Becken)	160
Anhang 5.5.1.1	Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG	160
Anhang 5.5.1.2	Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG	161
Anhang 5.5.2	Buntsandstein (Ostholstein-Westmecklenburg-Block und nordöstliches Niedersächsisches Becken)	161
Anhang 5.5.2.1	Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG	162
Anhang 5.5.2.2	Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG	162
Anhang 5.5.3	Buntsandstein (Schleswig-Holstein)	163
Anhang 5.5.3.1	Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG	163
Anhang 5.5.3.2	Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG	164
Anhang 5.5.4	Buntsandstein (Harzvorland)	165
Anhang 5.5.4.1	Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG	165
Anhang 5.5.4.2	Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG	166
Anhang 5.5.5	Buntsandstein (Münsterländer Tieflandsbucht)	166
Anhang 5.5.5.1	Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG	167

Anhang 5.5.5.2	Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG	167
Anhang 5.6	Zechstein	168
Anhang 5.6.1	Zechstein (Niederlausitzer Becken)	168
Anhang 5.6.1.1	Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG	168
Anhang 5.6.1.2	Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG	170
Anhang 5.6.2	Zechstein (Thüringer Becken)	170
Anhang 5.6.2.1	Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG	171
Anhang 5.6.2.2	Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG	172
Anhang 5.6.3	Zechstein (Werra-Fulda-Becken, inkl. Fränkisches Becken)	172
Anhang 5.6.3.1	Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG	172
Anhang 5.6.3.2	Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG	174
Anhang 5.6.4	Zechstein (Solling Becken)	174
Anhang 5.6.4.1	Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG	175
Anhang 5.6.4.2	Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG	175
Anhang 5.6.5	Zechstein (Subherzyn-Mulde und Calvörde-Scholle)	176
Anhang 5.6.5.1	Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG	176
Anhang 5.6.5.2	Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG	178
Anhang 5.6.6	Zechstein (Niederrhein-Ems-Gebiet)	178
Anhang 5.6.6.1	Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG	179
Anhang 5.6.6.2	Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG	180
Anhang 5.6.7	Zechstein - Identifiziertes Gebiet 7 (Helgoland)	180
Anhang 5.6.7.1	Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG	180
Anhang 5.6.7.2	Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG	181
Anhang 5.6.8	Zechstein (Nordöstliches Norddeutsches Becken)	182
Anhang 5.6.8.1	Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG	182
Anhang 5.6.8.2	Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG	183
Anhang 6	Ergänzung der Vorgehensweise der Bewertung von identifizierten Gebieten im Oberrheingraben	185
Anhang 6.1	Gesetzliche Grundlage	185
Anhang 6.1.1	Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG	185
Anhang 6.1.2	Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG	186
Anhang 6.1.3	Anlage 11 (zu § 24 Abs. 5) StandAG	187
Anhang 6.2	Zur Genese des Oberrheingrabens	188
Anhang 6.3	Tektonik des Oberrheingrabens	189
Anhang 6.4	Bewertung	193
Anhang 6.4.1	Regionalgeologische Bewertung der Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG: Kriterium zur Bewertung der räumlichen Charakterisierbarkeit	193
Anhang 6.4.2	Regionalgeologische Bewertung der Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG: Kriterium zur Bewertung der langfristigen Stabilität der günstigen Verhältnisse	194

Anhang 6.4.3	Regionalgeologische Bewertung der Anlage 11 (zu § 24 Abs. 5) StandAG: Kriterium zur Bewertung des Schutzes des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durch das Deckgebirge	195
Anhang 6.5	Fazit	195

Anlagenverzeichnis

Anlage 1A	Anlage 1A (zum Fachbericht Teilgebiete und Anwendung Geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG) – Ergebnisse der Bewertung: Teil A (Teilgebiete)
Anlage 1B	Anlage 1B (zum Fachbericht Teilgebiete und Anwendung Geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG) – Ergebnisse der Bewertung: Teil B (Keine Teilgebiete)
Anlage 2A	Anlage 2A (zum Fachbericht Teilgebiete und Anwendung Geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG) – Literaturreferenzen: Teil A (Teilgebiete)
Anlage 2B	Anlage 2B (zum Fachbericht Teilgebiete und Anwendung Geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG) – Literaturreferenzen: Teil B (Keine Teilgebiete)

Abkürzungsverzeichnis

AK	Ausschlusskriterien
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
ArbeitsDB	Arbeitsdatenbank
AtG	Atomgesetz
BGBI	Bundesgesetzblatt
BGE	Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
DXF	Drawing Interchange Format
ewG	Einschlusswirksamer Gebirgsbereich
geoWK	Geowissenschaftliche Abwägungskriterien
GOK	Geländeoberkante
GW	Grundwasser
ID	Identifikator
IG	Identifiziertes Gebiet
InSpEE	Informationssystem Salzstrukturen: Planungsgrundlagen, Auswahlkriterien und Potenzialabschätzungen für die Errichtung von Salzkavernen zur Speicherung von Erneuerbaren Energien (Wasserstoff und Druckluft)
InSpEE-DS	Informationssystem Salz: Planungsgrundlagen, Auswahlkriterien und Potenzialabschätzung für die Errichtung von Salzkavernen zur Speicherung von Erneuerbaren Energien (Wasserstoff und Druckluft) – Doppelsalinare und flach lagernde Salzsichten
MA	Mindestanforderungen
MK	Muschelkalk
MMK	Mittlerer Muschelkalk
OBM	Obere Brackwassermolasse
OMK	Oberer Muschelkalk
OMM	Obere Meeresmolasse
ORG	Ober rheingraben
OSM	Obere Süßwassermolasse

RESUS	Grundlagenentwicklung für repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen und zur sicherheitsgerichteten Abwägung von Teilgebieten mit besonders günstigen geologischen Voraussetzungen für die sichere Endlagerung hochradioaktiver Abfälle
SGD	Staatlich Geologische Dienste
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
TG	Teilgebiet
UBM	Untere Brackwassermolasse
UMK	Unterer Muschelkalk
UMM	Untere Meeresmolasse
USM	Untere Süßwassermolasse
VBA	Visual Basic for Application

Glossar

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

1 Einleitung

1.1 Veranlassung

Am 21. September 2016 wurde die Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) auf Basis des Gesetzes zur Neuordnung der Organisationsstruktur im Bereich der Endlagerung aus dem Juli 2016 gegründet.

Die Durchführung des Standortauswahlverfahrens richtet sich nach dem Standortauswahlgesetz (StandAG). Die ursprüngliche Fassung des Gesetzes zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle (StandAG 2013) vom 23. Juli 2013 (Bundesgesetzblatt (BGBl.) I S. 2553) trat nach Evaluierung durch den Bundestag am 16. Mai 2017 außer Kraft. Zeitgleich trat die Neufassung, das Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle, Art. 1 des Gesetzes vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), überwiegend zum 16. Mai 2017 in Kraft. Letzte Änderungen des Standortauswahlgesetzes erfolgten durch Artikel 247 der Verordnung vom 19. Juni 2020 (BGBl. I S. 1328) und traten am 27. Juni 2020 in Kraft.

Die Übertragung der Wahrnehmung der Aufgaben des Bundes nach § 9a Abs. 3 S. 1 des Atomgesetzes (AtG) auf die Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) erfolgte gemäß § 9a Abs. 3 S. 2 AtG am 25.04.2017. Damit ist die BGE Vorhabenträgerin für das Standortauswahlverfahren nach § 3 Abs. 1 StandAG. Am 5. September 2017 erfolgte der offizielle Start des Standortauswahlverfahrens in Berlin. Nach § 13 StandAG ist die Vorhabenträgerin zur Veröffentlichung ihrer ersten Zwischenergebnisse im Zwischenbericht Teilgebiete verpflichtet.

1.2 Gegenstand und Zielstellung

Der vorliegende Fachbericht „Teilgebiete und Anwendung Geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“ bezieht sich einzig auf die erstmalige Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien im Rahmen der Arbeiten zur Ermittlung von Teilgebieten nach § 13 Abs. 2 S. 1 und 2 StandAG in Phase I des Standortauswahlverfahrens. Der vorliegende Bericht wird im Folgenden „Fachbericht der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien“ genannt. Der Fachbericht der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien stellt eine untersetzende Unterlage des Zwischenberichts Teilgebiete (BGE 2020g) dar. Der Zwischenbericht Teilgebiete (§ 13 Abs. 2 StandAG) fasst die Ergebnisse aus der Anwendung der Ausschlusskriterien (AK) gemäß § 22 StandAG, der Anwendung der Mindestanforderungen (MA) gemäß § 23 StandAG und der Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG zur Ermittlung von Teilgebieten (TG) zusammen. In Abbildung 1 ist der Verlauf des Standortauswahlverfahrens und der Zeitpunkt der Veröffentlichung des Zwischenberichts Teilgebiete innerhalb des Ablaufs dargestellt. Weitere Informationen zum Ablauf des Standortauswahlverfahrens sind dem Zwischenbericht Teilgebiete (BGE 2020g) zu entnehmen.

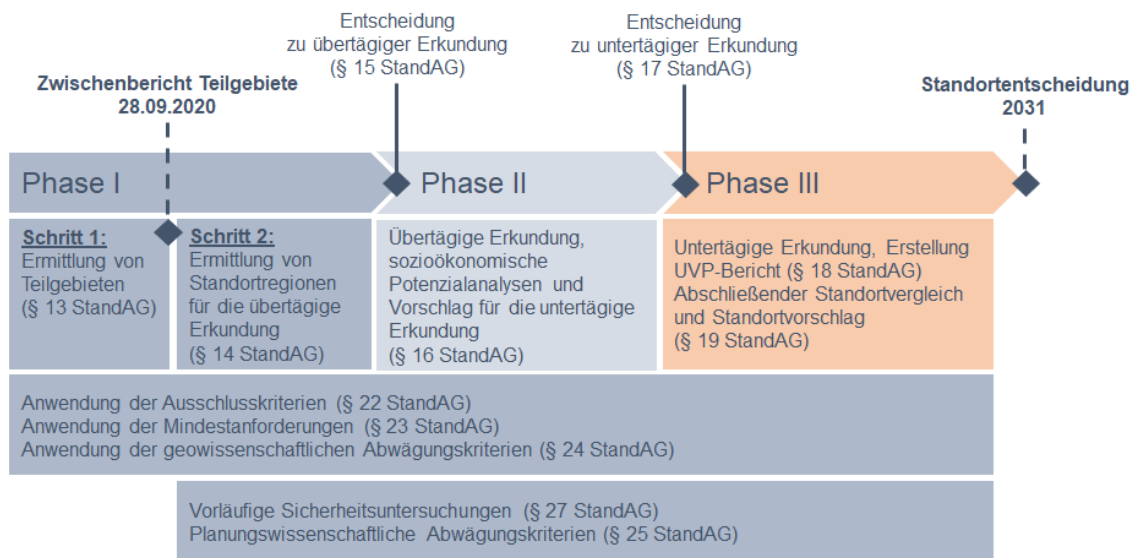


Abbildung 1: Schematischer Ablauf des Standortauswahlverfahrens

Durch die Anwendung der Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen wurden „identifizierte Gebiete“ (IG) ausgewiesen. Dies sind nach § 13 StandAG jene Gebiete, welche außerhalb der Flächen liegen, die durch die Anwendung der Ausschlusskriterien ausgeschlossen werden, und außerdem alle Mindestanforderungen erfüllen. Auf die identifizierten Gebiete wurden die geowissenschaftlichen Abwägungskriterien angewendet, mit dem Ziel Teilgebiete zu ermitteln (Abbildung 2).



Abbildung 2: Generelles Vorgehen für die Ermittlung der Teilgebiete

Gegenstand des vorliegenden Fachberichts der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien sind die Methoden und die Ergebnisse der Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien. Ebenfalls wird die Entwicklung der Vorgehensweise der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien dargestellt und die Datengrundlage zusammengefasst.

Eine ausführliche Beschreibung der Datengrundlage ist im „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“ (BGE 2020i) dargestellt. Die Ergebnisse der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien, die ermittelten Teilgebiete, erhalten eine zusätzliche Darstellung in Form von sogenannten Steckbriefen. Diese Steckbriefe enthalten eine Kartendarstellung und die wichtigsten Informationen des jeweiligen Teilgebiets (siehe BGE 2020g). Darüber hinaus werden die detaillierten Ergebnisse der Bewertungen, welche aus dem Bewertungsmodul resultieren, in den vier Anlagen zu diesem Bericht dokumentiert (siehe BGE 2020ag, 2020ah, 2020ai, 2020aj).

Weitere wichtige zitierte Dokumente des Fachberichts der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien stellen die „Arbeitshilfe zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien im Rahmen von § 13 StandAG“ (BGE 2020a) und die „Referenzdatensätze zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien im Rahmen von § 13 StandAG“ (BGE 2020b) dar. Die „Arbeitshilfe zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien im Rahmen von § 13 StandAG“ und „Referenzdatensätze zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien im Rahmen von § 13 StandAG“ werden im Folgenden jeweils als Arbeitshilfe (BGE 2020a) und Referenzdatensätze (BGE 2020b) bezeichnet. Die Modalität in der Anwendung der Arbeitshilfe und der Referenzdatensätze innerhalb der Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien wird in Kapitel 5.3 näher erläutert.

1.3 Abgrenzung

Aus den, durch die Anwendung der Ausschlusskriterien nach § 22 StandAG und den Mindestanforderungen nach § 23 StandAG, identifizierten Gebieten, werden, durch die Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien nach § 24 StandAG, die Teilgebiete ermittelt, welche, auf Basis der Abwägung, eine günstige geologische Gesamtsituation erwarten lassen. Die Teilgebiete werden nach dem StandAG nur innerhalb Deutschlands ermittelt. Teilgebiete enden an den Grenzen zu Deutschlands Nachbarstaaten. Grenzüberschreitende Aussagen für Nachbarstaaten erfolgen nicht.

Die Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien gemäß der §§ 14, 16 und 18 StandAG ist nicht Gegenstand dieses Berichtes.

2 Zusammenfassung

Der vorliegende Bericht beschreibt die erstmalige Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG in Phase I Schritt 1 des Standortauswahlverfahrens und stellt die Vorgehensweise sowie Ergebnisse dar. Es wurden Teilgebiete ermittelt, die eine günstige geologische Gesamtsituation erwarten lassen und die aufgrund dessen im weiteren Verlauf des Standortauswahlverfahrens bei der Ermittlung von Standortregionen (§ 14 StandAG) weiter betrachtet werden. Gemäß § 24 Abs. 1 S. 2 StandAG ergibt sich die günstige geologische Gesamtsituation „nach einer sicherheitsgerichteten Abwägung der Ergebnisse zu allen Abwägungskriterien“. Als Bewertungsmaßstab dienen die in § 24 Abs. 3 bis 5 StandAG aufgeführten elf Kriterien, welche in den Anlagen 1 bis 11 (zu § 24) StandAG beschrieben sind.

Die Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien erfolgte auf die identifizierten Gebiete, die im Rahmen der Anwendung der Ausschlusskriterien (§ 22 StandAG) und Mindestanforderungen (§ 23 StandAG) ausgewiesen wurden. Als Datengrundlage dienen die von den zuständigen Behörden des Bundes und der Länder auf Grundlage von § 12 Abs. 3 StandAG zur Verfügung gestellten geowissenschaftliche Daten, von der BGE prozessierte Daten, auf Fachliteratur basierende Referenzdatensätze sowie weitere Fachliteratur. Durch die Verwendung von Referenzdatensätzen wird eine Anwendung aller Abwägungskriterien nach § 24 Abs. 1 S. 2 StandAG gewährleistet.

Zunächst wurden für jedes identifizierte Gebiet sämtliche Indikatoren und, basierend darauf, alle Abwägungskriterien nach den Anlagen 1 bis 11 (zu § 24) StandAG bewertet. Im Zuge der zusammenfassenden Bewertung wurde jedes identifizierte Gebiet auf Basis aller einzelnen Bewertungen bewertet. Für alle Bewertungen wurde verbalargumentativ in einer geowissenschaftlichen Argumentation eine Begründung ausgearbeitet. Der Bewertungsvorgang jedes identifizierten Gebietes erfolgte mit Hilfe des eigens dafür entwickelten Bewertungsmoduls. Diejenigen Gebiete, welche eine „günstige geologische Gesamtsituation“ (§ 24 Abs. 1 StandAG) erwarten lassen, wurden als Teilgebiete ermittelt.

Im Ergebnis resultierten aus der Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien im Rahmen von § 13 StandAG aus den 181 identifizierten Gebieten insgesamt 90 Teilgebiete, die in Summe über eine Fläche von ca. 240 874 km² verfügen. Diese identifizierten Gebiete erstrecken sich über die gesamte Bundesrepublik Deutschland, siehe Abbildung 3. Für das Wirtsgestein Tongestein wurden neun Teilgebiete ermittelt. Mit Blick auf das Wirtsgestein Steinsalz wurden insgesamt 74 Teilgebiete ermittelt. Für die verschiedenen Konfigurationen im Wirtsgestein Steinsalz ergaben sich insgesamt 60 Teilgebiete in steilstehenden Steinsalzformationen und 14 Teilgebiete im stratiformen Steinsalz. Für das kristalline Wirtsgestein wurden insgesamt sieben Teilgebiete ermittelt.

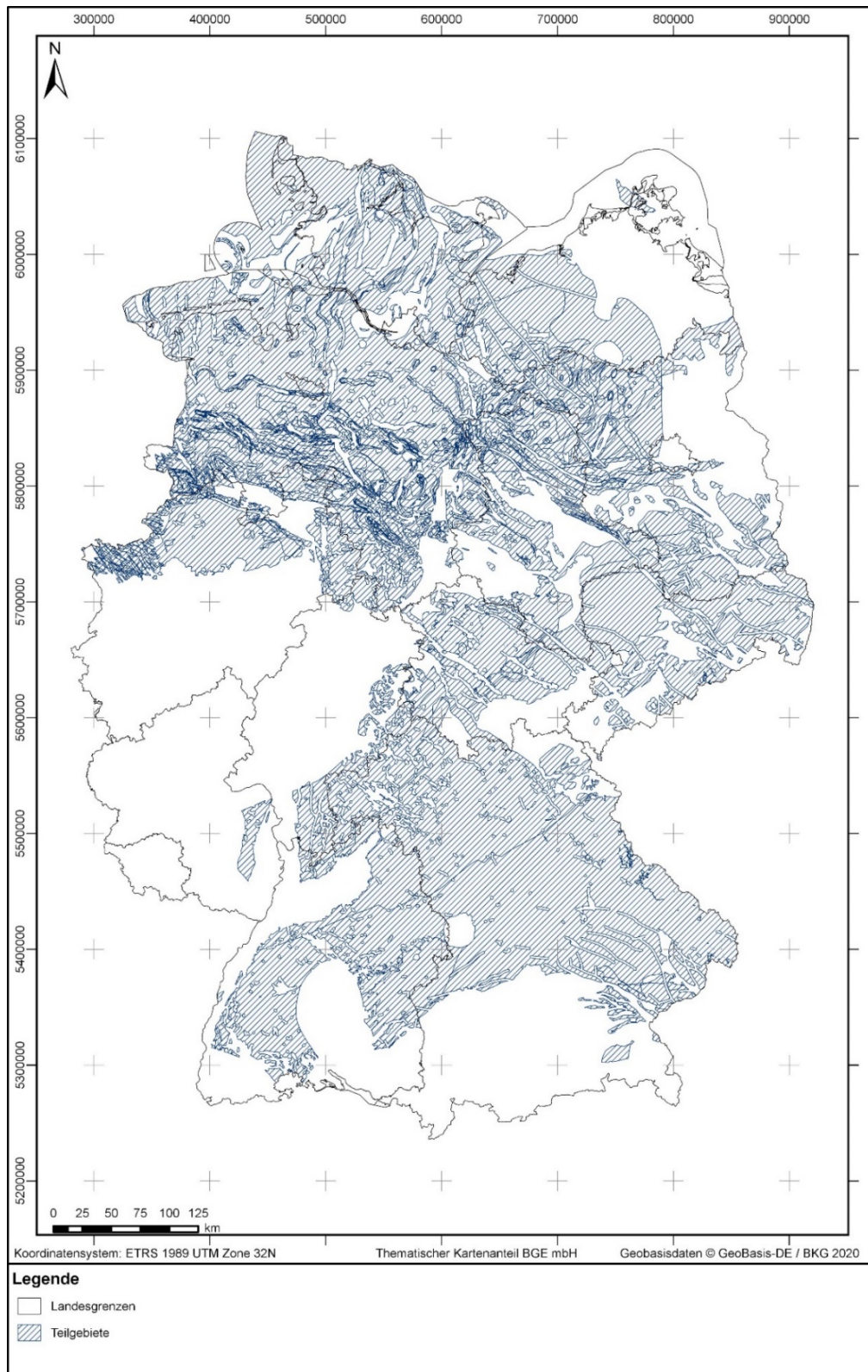


Abbildung 3: *Übersichtskarte aller im Rahmen von § 13 StandAG ermittelten Teilgebiete. Die Teilgebiete wurden nach stratigraphischen Einheiten ermittelt, daher kommt es in dieser Kartendarstellung zur teilweisen Überlagerung mehrerer Teilgebiete.*

3 Gesetzliche Grundlagen für die Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien

Im Standortauswahlverfahren sind für die Ermittlung von Teilgebieten gemäß § 13 StandAG auf das gesamte Bundesgebiet zunächst die Ausschlusskriterien nach § 22 StandAG anzuwenden. Auf die verbleibenden Gebiete sind die Mindestanforderungen nach § 23 StandAG anzuwenden. Dies setzt die Existenz von geeigneten Wirtschaftsformationen im Untergrund voraus.

Aus den daraus resultierenden „identifizierten Gebieten (IG)“ (§ 13 StandAG) sind durch die Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien nach § 24 StandAG die Teilgebiete zu ermitteln, die sich auf Basis der Abwägung als günstig erweisen (§ 13 Abs. 2 S. 2 StandAG). Nach § 24 Abs. 1 S. 1 und 2 StandAG wird anhand der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien jeweils bewertet, ob in einem Gebiet eine günstige geologische Gesamtsituation vorliegt. Diese ergibt sich nach einer sicherheitsgerichteten Abwägung der Ergebnisse aller Abwägungskriterien. In der Begründung zu § 24 StandAG heißt es:

„Die Festlegung von geowissenschaftlichen Abwägungskriterien dient dazu, die nach der Anwendung von Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen verbleibenden Gebiete hinsichtlich ihrer Eignung als Endlagerstandort vergleichend bewerten zu können. Dabei ist ein einzelnes Abwägungskriterium nicht hinreichend, um die günstige geologische Gesamtsituation nachzuweisen oder auszuschließen. Wie von der Endlagerkommission empfohlen soll dazu im Rahmen einer verbalargumentativen Abwägung ermittelt werden, in welchen Gebieten eine für die Sicherheit des Endlagers günstige geologische Gesamtsituation vorliegt“ (BT-Drs. 18/11398, S. 71).

Der Begriff der „sicherheitsgerichteten Abwägung“ wird seitens der Vorhabenträgerin derart verstanden, dass bei der Abwägung der Aspekt der Sicherheit im Sinne der sicheren Endlagerung hochradioaktiver Abfälle für einen Zeitraum von mindestens einer Million Jahren wesentlich ist. Das bedeutet auch, dass andere Aspekte, z. B. ökonomische, bei der Anwendung nicht berücksichtigt werden. Unter dieser Prämisse wird im Folgenden nur noch von Abwägung gesprochen, welche den Aspekt der Ausrichtung auf Sicherheit als entscheidenden Aspekt beinhaltet.

Die geowissenschaftlichen Abwägungskriterien werden durch bewertungsrelevante Eigenschaften charakterisiert, für die das StandAG in den meisten Fällen eine oder mehrere Bewertungsgrößen bzw. Indikatoren des Kriteriums definiert. In den Anlagen 1 bis 11 (zu § 24) StandAG sind die Kriterien sowie die dazugehörigen bewertungsrelevanten Eigenschaften der Kriterien, die Bewertungsgrößen beziehungsweise Indikatoren des Kriteriums sowie die Wertungsgruppen dargelegt. Im Folgenden wird für die in den Anlagen 1 bis 11 (zu § 24) StandAG genannten Begriffe „bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums“ und „Bewertungsgröße beziehungsweise Indikator des Kriteriums“ der einheitliche Begriff „Indikator“ verwendet. Die Einordnung der Indikatoren erfolgt anhand von Wertungsgruppen. Diese sind zumeist in die Gruppen „günstig“, „bedingt güns-

„tig“ oder „weniger günstig“ eingeteilt, mit Ausnahme von drei Kriterien, welche als „ungünstig“ anstelle von „weniger günstig“ eingeteilt werden sowie Indikatoren, welche nur zwei Wertungsgruppen aufweisen oder eine rein textliche Beschreibung erwarten lassen (vgl. Anlage 8 (zu § 24 Abs. 5) StandAG). Für die Wertungsgruppen sind zur Einordnung des jeweiligen Indikators qualitative Beschreibungen oder numerische Zahlenwerte angegeben. Das StandAG lässt es für die Vorhabenträgerin offen, wie aus der Einordnung der Indikatoren in die jeweiligen Wertungsgruppen Bewertungen der Kriterien für jedes identifizierte Gebiet zustande kommen. Die zusammenfassende Bewertung für jedes identifizierte Gebiet erfolgt im Zuge einer Abwägung der Ergebnisse zu allen Abwägungskriterien (§ 24 Abs. 1 S. 2 StandAG).

Der Salzstock Gorleben wurde wie alle anderen identifizierten Gebiete behandelt (vgl. § 36 StandAG). Erkenntnisse aus dem Salzstock Gorleben wurden bei der Erstellung des Referenzdatensatz Steinsalz (siehe BGE 2020b) gemäß § 36 StandAG nicht berücksichtigt.

Untenstehend werden die jeweiligen Kriterien und Indikatoren aus den Anlagen 1 bis 11 (zu § 24) StandAG aufgeführt.

1. Kriterium zur Bewertung des Transportes radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich

- Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers [mm/a]
- Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit des Gesteinstyps [m/s]
- Charakteristischer effektiver Diffusionskoeffizient des Gesteinstyps für tritiiertes Wasser (HTO) bei 25 °C [m²/s]
- Absolute Porosität¹
- Verfestigungsgrad¹

2. Kriterium zur Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper

- Barrierenmächtigkeit [m]
- Grad der Umschließung des Einlagerungsbereichs durch einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich
- Teufe der oberen Begrenzung des erforderlichen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs [m unter Geländeoberfläche]

¹ Anhand des Textes aus Anlage 1 (zu § 24 Abs. 3) StandAG ist nicht eindeutig ersichtlich, ob der Indikator „Charakteristischer effektiver Diffusionskoeffizient“ oder die Indikatoren „Absolute Porosität“ und „Verfestigungsgrad“ bei Tongestein angewendet werden sollen. Die Vorhabenträgerin interpretiert diesen Teil im Gesetz so, dass die Indikatoren „Absolute Porosität“ und „Verfestigungsgrad“ nur angewendet werden, wenn der Indikator „Charakteristischer effektiver Diffusionskoeffizient“ nicht ermittelbar ist (vgl. BGE 2020a). Des Weiteren sind laut Anlage 1 (zu § 24 Abs. 3) StandAG die Indikatoren „Absolute Porosität“ und „Verfestigungsgrad“ auf Tonstein bezogen. Es wird davon ausgegangen, dass die Indikatoren für das gesamte Wirtsgestein Tongestein, welches sowohl verfestigten Tonstein sowie unverfestigte Tone einschließt, zu betrachten sind.

- Flächenhafte Ausdehnung bei gegebener Mächtigkeit (Vielfaches des Mindestflächenbedarfs)
 - Für Tongestein²: Vorhandensein von Gesteinsschichten mit hydraulischen Eigenschaften und hydraulischem Potenzialgradienten, die Grundwasserbewegung im einschlusswirksamen Gebirgsbereich ermöglichen können.
3. Kriterium zur Bewertung der räumlichen Charakterisierbarkeit
- 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)
4. Kriterium zur Bewertung der langfristigen Stabilität der günstigen Verhältnisse
- Zeitspanne, über die sich die Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht wesentlich verändert hat
 - Zeitspanne, über die sich die Ausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht wesentlich verändert hat
 - Zeitspanne, über die sich die Gebirgsdurchlässigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht wesentlich verändert hat
5. Kriterium zur Bewertung der günstigen gebirgsmechanischen Eigenschaften
- Das Gebirge kann als geomechanisches Haupttragelement die Beanspruchung aus Auffahrung und Betrieb ohne planmäßigen tragenden Ausbau, abgesehen von einer Kontursicherung, bei verträglichen Deformationen aufnehmen
 - Um Endlagerhohlräume sind keine mechanisch bedingten Sekundärpermeabilitäten außerhalb einer unvermeidbaren konturnah entfestigten Auflockerungszone zu erwarten
6. Kriterium zur Bewertung der Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten
- Verhältnis repräsentative Gebirgsdurchlässigkeit zu repräsentative Gesteinsdurchlässigkeit
 - Erfahrungen über die Barrierewirksamkeit der Gebirgsformationen in folgenden Erfahrungsbereichen:

² Laut Anlage 2 (zu § 24 Abs. 3) StandAG bezieht sich der Indikator „Vorhandensein von Gesteinsschichten mit hydraulischen Eigenschaften und hydraulischem Potenzialgradienten, die Grundwasserbewegung im einschlusswirksamen Gebirgsbereich ermöglichen können.“ auf Tonstein. Es wird davon ausgegangen, dass der Indikatoren für das gesamte Wirtsgestein Tongestein, welches sowohl verfestigten Tonstein sowie unverfestigte Tone einschließt, zu betrachten ist.

- Rezente Existenz als wasserlösliches Gestein,
 - fossile Fluideinschlüsse,
 - unterlagernde wasserlösliche Gesteine,
 - unterlagernde Vorkommen flüssiger oder gasförmiger Kohlenwasserstoffe,
 - Heranziehung als hydrogeologische Schutzschicht bei Gewinnungsbergwerken,
 - Aufrechterhaltung der Abdichtungsfunktion auch bei dynamischer Beanspruchung,
 - Nutzung von Hohlräumen zur behälterlosen Speicherung von gasförmigen und flüssigen Medien
- Duktilität des Gesteins (da es keine festgelegten Grenzen gibt, ab welche Bruchverformung ein Gestein duktil oder spröde ist, soll dieses Kriterium nur bei einem Vergleich von Standorten angewandt werden)³
 - Rückbildung der Sekundärpermeabilität durch Risssschließung
 - Rückbildung der mechanischen Eigenschaften durch Rissverheilung
 - Zusammenfassende Beurteilung der Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten aufgrund der Bewertung der einzelnen Indikatoren
7. Kriterium zur Bewertung der Gasbildung
- Wasserangebot im Einlagerungsbereich
8. Kriterium zur Bewertung der Temperaturverträglichkeit
- Neigung zur Bildung wärmeinduzierter Sekundärpermeabilitäten und ihre Ausdehnung
 - Temperaturstabilität des Wirtsgesteins hinsichtlich Mineralumwandlungen
9. Kriterium zur Bewertung des Rückhaltevermögens im einschlusswirksamen Gebirgsbereich
- K_d -Wert für definierte langzeitrelevante Radionuklide, deren Gleichgewichtssorptionskoeffizient nach der Henry-Isotherme einen Schwellenwert von $10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$ überschreitet

³ Laut Anlage 6 (zu §24 Abs. 4) StandAG ist für den Indikator „Duktilität des Gesteins [...]“ zu beachten, dass „[...] dieses Kriterium nur bei einem Vergleich von Standorten angewandt werden [soll]“. Es wird davon ausgegangen, dass sich dieser Zusatz auf die Anwendung des Indikators, nicht die des gesamten Kriteriums, bezieht. Dementsprechend erfolgte eine Anwendung aller weiteren Indikatoren des „Kriteriums zur Bewertung der Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten“.

- Gehalt der Gesteine des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs an Mineralphasen mit großer reaktiver Oberfläche wie Tonminerale sowie Eisen- und Mangan-Hydroxide und -Oxihydrate
- Ionenstärke des Grundwassers in der geologischen Barriere
- Öffnungsweiten der Gesteinsporen

10. Kriterium zur Bewertung der hydrochemischen Verhältnisse

- Chemisches Gleichgewicht zwischen dem Wirtsgestein im Bereich des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und dem darin enthaltenen tiefen Grundwasser
- Neutrale bis leicht alkalische Bedingungen (pH-Wert 7 bis 8) im Bereich des Tiefenwassers
- Anoxisch-reduzierendes Milieu im Bereich des Tiefenwassers
- Möglichst geringer Gehalt an Kolloiden und Komplexbildnern im Tiefenwasser
- Geringe Karbonatkonzentration im Tiefenwasser

11. Kriterium zur Bewertung des Schutzes des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durch das Deckgebirge

- Überdeckung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs mit grundwasserhemmenden Gesteinen, Verbreitung und Mächtigkeit grundwasserhemmender Gesteine im Deckgebirge
- Verbreitung und Mächtigkeit erosionshemmender Gesteine im Deckgebirge des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs
- Keine Ausprägung struktureller Komplikationen (zum Beispiel Störungen, Scheitelgräben, Karststrukturen) im Deckgebirge, aus denen sich subrosive, hydraulische oder mechanische Beeinträchtigungen für den einschlusswirksamen Gebirgsbereich ergeben könnten

4 Datengrundlage

Die Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien (§ 24 StandAG) im Schritt 1 der Phase I (§ 13 StandAG) des Standortauswahlverfahrens erfolgte, wie bei den §§ 22 und 23 StandAG, auf Basis der von den Bundes- und Landesbehörden (SGD) zur Verfügung gestellten Daten gemäß § 12 Abs. 3 StandAG. Für die Bewertung der elf Kriterien (Anlagen 1 bis 11 (zu § 24) StandAG) können die Indikatoren entweder direkt oder müssen indirekt aus Geodaten abgeleitet werden. Hierfür wurden die Zusammenhänge zwischen potentiell verfügbaren Daten bei den Bundes- und Landesbehörden und den Indikatoren ausgearbeitet. Aus diesen Beziehungen ergibt sich die Menge notwendiger Daten für die geowissenschaftlichen Abwägungskriterien für die Abfrage bei den SGD. Für Daten, welche für die Bewertung eines Indikators herangezogen werden, wird der Begriff „Parameter“ eingeführt.

Seit 2019 hat die BGE für die Anwendung der der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien mehrere Datenabfragen an die zuständigen Behörden übermittelt:

- 08/2019: 1. Datenabfrage zu den geowissenschaftlichen Abwägungskriterien bei den staatlichen geologischen Diensten, betreffend
 - Störungen
 - Geomechanische Eigenschaften der Wirtsgesteine
 - Thermische Parameter der Wirtsgesteine
 - Hydrochemische Eigenschaften der Tiefenwässer
- 2020: Abfrage diverser Daten
 - Nachfrage zu hydrochemischen Eigenschaften der Tiefenwässer
 - Nachfrage zu geomechanischen Eigenschaften der Wirtsgesteine
 - Nachfrage zum Internbau von Doppelsalinenen
 - Nachfrage zu Erosionsstrukturen in Süddeutschland

Im Rahmen dieser Datenabfragen wurden verschiedene Daten in unterschiedlichen Formaten von den Bundes- und Landesbehörden zur Verfügung gestellt. Diese wurden dokumentiert, gesichtet, teilweise ausgewertet und nach Sachlage für die Bearbeitung aufbereitet. Äquivalent zu den Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen wurden die bereitgestellten Daten in die ArbeitsDB⁴ überführt. Daten, die im Zuge der Abfrage zu

⁴ Die sogenannte ArbeitsDB ist eine von der BGE entwickeltes Datenbank- und Dokumentationssystem. In der ArbeitsDB werden alle Datenlieferungen verwaltet und alle Angaben zu den liefernden Behörden und den Datenlieferungen selbst hinterlegt. Darüber hinaus gibt es eine Schnittstelle zur GIS-Plattform „ArcGIS Enterprise“ in der entsprechende GIS-Daten gesichtet werden können. Weitere Erläuterungen zur ArbeitsDB sind dem „Datenbericht Ausschlusskriterien gemäß § 22 StandAG. Untersetzende Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete.“ (BGE 2020i) zu entnehmen.

den geowissenschaftlichen Abwägungskriterien eingegangen sind, werden in der ArbeitsDB sowie der zugehörigen ArcGIS Sichtungsumgebung entsprechend gekennzeichnet.

Im Zuge der Sichtung der eingegangenen Daten zu den durchgeführten Datenabfragen stellte sich heraus, dass diese sich für die Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien nur eingeschränkt eignen. Dies begründet sich u. a. daraus, dass es sich bei den zur Verfügung gestellten Daten größtenteils um punktuell vorliegende Einzelwerte handelt, welche zum Teil auch außerhalb von identifizierten Gebieten liegen. Des Weiteren hat ein Großteil dieser Daten ihren Ursprung nicht in endlagerelevanten Tiefen von 300 m bis 1500 m unter Geländeoberkante. Dies bestätigt die vielfach geäußerte Erwartung, dass in der frühen Phase des Verfahrens entsprechende Daten für die Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien zum Großteil nicht vorliegen werden.

Das Ergebnis der Datensichtung ergab, dass für die Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien in dieser frühen Phase des Standortauswahlverfahrens wenig erforderliche Daten vorliegen. Von den im Rahmen der Datenabfrage zu den geowissenschaftlichen Abwägungskriterien zur Verfügung gestellten Daten kann ein großer Teil nicht für die derzeitige Anwendung herangezogen werden. Ausnahmen bilden hier die Datenlieferungen aus der Abfrage im Jahr 2019 zu den Störungen und die zur Verfügung gestellten Informationen zu den Nachfragen im Jahr 2020.

Daher wurden nur teilweise Daten aus der 1. Abfrage zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien herangezogen (wie z. B. Störungen). Daten, welche letztendlich für die Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien herangezogen wurden, werden in dem Bewertungsmodul (erläutert in Kapitel 5.5) dokumentiert (BGE 2020a, 2020ak, 2020al). Die Daten, die zu den Abfragen der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien zur Verfügung gestellt wurden, wurden dementsprechend bislang zum Großteil nicht in die EnterpriseDB⁵ importiert.

Eine Übersicht der Datenabfragen, welche durch die BGE an die verschiedenen Behörden gestellt wurden, wie auch eine Darstellung der zur Verfügung gestellten Datentypen, sind in der untersetzenden Unterlage „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“ (BGE 2020l) zusammengestellt. Wesentlich für die Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien sind außerdem Daten, die für die Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen erhoben und in der Anwendung der Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen prozessiert wurden. Eine Übersicht der Datenabfragen und Datenlieferungen der Ausschlusskriterien ist BGE (2020i) zu entnehmen. In BGE (2020l) sind die Datenabfragen und Datenlieferungen der Mindestanforderungen zusammengefasst.

⁵ Heterogen vorliegende GIS- oder 3D-Daten wurden im Zuge der Datenaufbereitung homogenisiert. Dies erfordert die Überführung der Daten in ein einheitliches Datenmodell, der sogenannten Enterprise DB. Weitere Erläuterungen zur Datenaufbereitung sind BGE (2020l) und BGE (2020i) zu entnehmen.

Im Zuge der Übergabe der identifizierten Gebiete an die Bearbeiter/-innen der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien, nach Anwendung der Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen, werden die Flächen der Gebiete in Form von 2D-Polygon-Features in ArcGIS übergeben. Ein weiterer Teil der Übergabe ist ein ASCII-Export⁶ aus der 3D-Geomodellierung mit Informationen zu Mächtigkeit und Tiefenlage, soweit das Gebiet vollständig oder teilweise von einem oder mehreren Geomodellen abgedeckt ist. Des Weiteren stehen bundeslandspezifische und länderübergreifende Modellierprotokolle zu den identifizierten Gebieten zur Verfügung, welche die Vorgehensweise der Bearbeitung der Mindestanforderungen dokumentieren und einen geologischen Überblick/Zusammenfassung enthalten (siehe BGE 2020j, 2020l).

Die im StandAG aufgeführten geowissenschaftlichen Abwägungskriterien sind für das gesamte Standortauswahlverfahren gültig und werden insgesamt viermal im Laufe des Verfahrens angewendet (§§ 13, 14, 16, 18 StandAG). Es ist zu erwarten, dass die Datenquantität und -qualität der Daten, die für die Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien zu Grunde gelegt werden, im Laufe des Verfahrens ansteigt (z. B. durch Erkundungen). Die Anlagen 1 bis 11 (zu § 24) StandAG sind dementsprechend detailliert verfasst, so dass die geowissenschaftlichen Abwägungskriterien im Laufe des Verfahrens deutlich in der Aussagekraft zunehmen können.

Sind zum jetzigen Zeitpunkt für die Bewertung der Indikatoren nicht ausreichend Daten vorhanden, werden, wie in Anlage 1 (zu § 24 Abs. 3) StandAG vermerkt, begründete Annahmen für das jeweilige Wirtsgestein genutzt. Diese Annahmen werden in Form von Referenzdatensätzen (BGE 2020b) für die Wirtsgesteinsinformationen zusammengefasst (siehe Kapitel 5.3). Auf diese Weise wird die in § 24 Abs. 1 S. 2 StandAG vorgegebene Abwägung auf Basis der Ergebnisse aller elf Kriterien gewährleistet.

⁶ Die hier genannten ASCII Daten entsprechen aus den 3D-Modellen exportierten Punktsätzen, die für die 2D-Bearbeitung in ArcGIS verwendet wurden. Die Daten enthalten Informationen zur Teufe, Mächtigkeit und Raumlage (x-, y- und z-Werte) der bearbeiteten Gebiete.

5 Vorgehensweise bei der Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien gemäß § 24

5.1 Benennung der Gebiete

Gegenstand des vorliegenden Kapitels 5.1 ist eine Nomenklatur für die Bezeichnung von

- Teilgebieten (TG) und
- identifizierte Gebieten (IG)

wie sie in Kapitel 6 zur Anwendung kommt.

Mit vorliegender Nomenklatur wurden nachfolgende Aspekte berücksichtigt:

- Wesentlich ist, dass neben einer eindeutigen Bezeichnung, die Genese ablesbar ist.
- Die BGE nimmt ihre Zusagen ernst und wird der Bitte aus dem öffentlichen Raum entsprechen, in dem anhand der Bezeichnung kein Rückschluss auf die Lage z. B. eines Teilgebietes in Deutschland möglich sein wird.
- Zur Unterstützung der BGE- Mitarbeiter bei der Information der Öffentlichkeit oder Beteiligten des Standortauswahlverfahrens werden Informationen zum Wirtsgestein, dessen Lagerung und der Stratigraphie der Bezeichnung beigefügt.
- Aufgrund unserer Leserichtung von links nach rechts, wird der jeweilige jüngere Entwicklungsschritt eines Gebietes an den Anfang der Bezeichnung gestellt. Die zusätzlichen Angaben zum Wirtsgestein, dessen Lagerung und der Stratigraphie der Bezeichnung erfolgt am Ende des Namens.
- Eine Kopplung der IDs zwischen einem identifizierten Gebiet und einem daraus ermittelten Teilgebiet ist aus Gründen erhöhter Flexibilität nicht erforderlich. Gleiches gilt für Teile eines Gebietes in Bezug zu dem daraus resultierenden Gebiet.

Die gewählte Nomenklatur weist in Reihenfolge ausgehend von einem identifizierten Gebiet (IG) die Weiterentwicklung bis maximal zu einem Teilgebiet hin aus.

Die konkrete Benennung für das jeweilige Wirtsgestein, dessen Lagerung, der Einheit und Zähler ist der Tabelle 1 zu entnehmen.

Ausgehend von einem identifizierten Gebiet:

- <ID.Teile>IG_<Wirtsgestein>_<Lagerung>_<Einheit> oder
- <ID.Teile>TG_<ID.Teile>IG_<Wirtsgestein>_<Lagerung>_<Einheit>

Beispiel: 002_01TG_002_01IG_S_f_ro-z

Hierbei bilden die ersten acht Zeichen die Zeichenfolge, die ein identifiziertes Gebiet bzw. Teilgebiet eindeutig bezeichnen. Die ersten 3 Zeichen (für sich alleine) ergaben sich aus der Bearbeitungsreihenfolge und haben darüber hinaus keine weitere Bedeutung.

Tabelle 1: Erklärung der Kürzel für die Benennung identifizierter Gebiete und Teilgebiete

Kürzel/ Identifikator	Erläuterung
ID.Teile	Eindeutige dreistellige ID im Format 001, 002, 003, ... Eindeutige zweistellige für ein Teil des Gebietes im Format 00, 01, 02 ... (00: Vorgänger \triangleq Nachfolger)
IG TG	Identifiziertes Gebiet Teilgebiet
Wirtsgestein	k. A. \triangleq keine Angabe S \triangleq Steinsalz T \triangleq Tonstein/Tongestein K \triangleq Kristallines Wirtsgestein
Lagerung	k. A. \triangleq keine Angabe s \triangleq steiler Lagerung f \triangleq flache Lagerung g \triangleq Grundgebirge i \triangleq Intrusionskörper
Einheit	k. A. \triangleq keine Angabe sonst Abkürzungen u. a. nach Symbolschlüssel Geologie. Z. B. z \triangleq Zechstein, ro \triangleq Rotliegend, ST \triangleq Steinwaldpluton (Landesamt für Geologie Rohstoffe und Bergbau 2016)

5.2 Entwicklung der Vorgehensweise

Für die Entwicklung der Grundlagen zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien wurde im Juli 2019 das Arbeitspaket „Konzept zur generellen Vorgehensweise zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien“ an die BGR vergeben. Im Zuge dieser Arbeit wurden unter anderem die erforderlichen Geodaten und Informationen zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien identifiziert sowie die Prozessierung der Eingangsdaten und mögliche Abwägungsmethoden skizziert. Das Arbeitspaket wurde Ende 2019 abgeschlossen. Im August 2020 wurden die Arbeitsergebnisse als „Abschlussbericht zum Konzept zur generellen Vorgehensweise zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien – Schritt 2“ (Beushausen et al. 2020) veröffentlicht. Dieser Bericht dient als Sekundärdokument für den vorliegenden Bericht.

Im Dezember 2019 erstellten Gaßner, Groth, Siederer & Coll. Partnerschaft von Rechtsanwälten mdB eine Handreichung im Auftrag der BGE mit dem Titel „Standortauswahl: Zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien, Teil 1“ (Gaßner & Buchholz 2019). Diese Handreichung beinhaltet Ausführungen zu den gesetzlichen Vorgaben bei der Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien.

Des Weiteren wurden im Vorhaben „Grundlagenentwicklung für repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen und zur sicherheitsgerichteten Abwägung von Teilgebieten mit besonders günstigen geologischen Voraussetzungen für die sichere Endlagerung Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle (RESUS)“ (Mönig et al. 2020) generische Sicherheitsuntersuchungen für die in Deutschland grundsätzlich in Frage kommenden Wirtsgesteine in ihren jeweiligen typischen geologischen Situationen durchgeführt, um die Signifikanz der jeweiligen geowissenschaftlichen Abwägungskriterien abzuschätzen. Das Vorhaben endete (nach Verlängerung) zum 30. August 2020. Dokumente des Vorhabens fließen als Sekundärdokumente in den vorliegenden Bericht mit ein. Nach aktuellem Diskussionsstand seitens der Vorhabenträgerin wird diese Unterlage erst für den Vorschlag zu den Standortregionen nach § 14 Abs. 2 StandAG wesentlich.

Im Rahmen von Workshops wurden die Anwendungsmethoden sowohl mit Wissenschaftler/-innen und Mitarbeiter/-innen der zuständigen Behörden des Bundes und der Länder, als auch mit der Öffentlichkeit im Sinne des transparenten Verfahrens nach StandAG diskutiert. Dies erfolgte beispielsweise im Austausch mit den SGD in Goslar am 7. und 8. November 2019 und bei den *Tagen der Standortauswahl* („Endlagerung im Dialog mit Wissenschaft und Öffentlichkeit“, 3. Fachworkshop der BGE in Braunschweig vom 12. bis 14. Dezember 2019). In einem von der BGE eingerichteten Onlineforum wurde die Vorgehensweise zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien öffentlich zur Diskussion gestellt (siehe BGE 2020d). Diese Konsultation ermöglichte im Rahmen eines Onlineforums vom 12. Mai. 2020 bis zum 23. Juni 2020 den Austausch und die Diskussion mit interessierten Bürgern. Im Rahmen der Online Konsultation gab es eine Rückmeldung aus der Öffentlichkeit (BGE 2020ae). Dieser Beitrag umfasst vor allem Anregungen darüber in welche Bereiche der Arbeiten der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien mehr Einblicke gewünscht sind und Vorschläge für eine anschaulichere Darstellung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien. Die Anregungen des Beitrags wurden für die weitere Bearbeitung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien mitaufgenommen. Verbesserungsvorschläge oder Kritik an der Vorgehensweise der Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien wurden nicht geäußert. Anfang September 2020 wurden die Arbeitshilfe und die Dokumentation zu den Referenzdatensätzen veröffentlicht (BGE 2020a, 2020b).

Bevor die geowissenschaftlichen Abwägungskriterien zur Anwendung kamen, wurde die Vorgehensweise im Zuge einer Pilotanwendung erprobt. Für jedes Wirtsgestein wurde die Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien (inkl. Bewertungsmodul) in sogenannten „Pilotregionen“ zunächst tentativ durchgeführt. Ziel war es, am praktischen Beispiel Verbesserungsmöglichkeiten für die Vorgehensweise und für das Bewertungsmodul zu erkennen und ggf. Anpassungen vorzunehmen. Als Datenbasis für die

Pilotregionen wurde auf Realdaten (konkrete Vorortinformationen, (Wirts-)Gesteinskenngrößen oder allg. Literaturwerte) von drei Gebieten, auf welche vorläufig die Ausschlusskriterien angewendet wurden und welche vorläufig die Mindestanforderungen erfüllen, zurückgegriffen. Der wichtigste Erkenntnisgewinn aus der Pilotanwendung lag in der Aufteilung, welche Anlagen mit Referenzdaten belegt und welche Anlagen mit flächendifferenzierten Daten bearbeitet werden (siehe Tabelle 2).

Anhand der durch die Pilotanwendungen, der Onlinediskussion (BGE 2020ae) sowie aus dem Dialog mit Wissenschaftler/-innen und Mitarbeiter/-innen gewonnenen Erkenntnissen erfolgte gegebenenfalls eine Optimierung. Ebenfalls erfolgte eine Weiterentwicklung der Anwendungsmethoden im Zuge der Sichtung der eingegangenen Daten sowie durch Erkenntnisgewinne bei der praktischen Anwendung.

Die folgenden Punkte wurden seit der Veröffentlichung der Vorgehensweise zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien (BGE 2020ae) weiterentwickelt:

- Im Rahmen der Erarbeitung der zusammenfassenden Bewertungen für jedes identifizierte Gebiet wurden mehrere interne Workshops mit zahlreichen Fachexpert/-innen abgehalten. Im Zuge dieser Arbeiten wurde das Prädikat einer „günstigen geologischen Gesamtsituation“ vergeben, so dass eine nachfolgende, separate Priorisierung elidiert wurde.
- Zusammenstellungen der wichtigsten geologischen Fakten sind in den „IG Steckbriefen“ (BGE 2020j) und „TG Steckbriefen“ (BGE 2020g) zu finden. Dementsprechend erfolgt keine weitere Erstellung einer Geosynthese. Ausführliche Informationen zur Geologie eines jeden Gebiets sind ebenfalls in den entsprechenden Modellierprotokollen aufgeführt (BGE 2020i, 2020j). Dies stellt auch eine Weiterentwicklung in Bezug auf die Arbeitshilfe (BGE 2020a) dar.
- Die Bewertung der identifizierten Gebiete nach einer bestimmten Anzahl von Indikatoren erfolgt jeweils für sämtliche identifizierten Gebiete eines Wirtsgesteins durch denselben bzw. dieselbe Fachexpert/-in. Die Bewertung erfolgt nicht für sämtliche identifizierten Gebiete jedes Wirtsgesteins durch denselben bzw. dieselbe Fachexpert/-in. Dies stellt auch eine Weiterentwicklung in Bezug auf die Arbeitshilfe (BGE 2020a) dar.
- Referenzdatensätze (BGE 2020b) finden Anwendung für Gebiete in denen Daten nicht oder nicht in ausreichender Quantität und Qualität vorliegen. Aufgrund der Tatsache, dass die Bewertung der auf Basis der mit Referenzdatensätzen (BGE 2020b) bearbeiteten Anlagen im oberen Bereich der physikalisch möglichen Bandbreite erfolgt, wird die Maxime zu Grunde gelegt, dass eine in der Phase I Schritt 1 des Standortauswahlverfahrens erfolgte Bewertung sich durch einen Informationsgewinn in späteren Phasen nicht verbessern kann. Die erfolgte Bewertung kann nur beibehalten oder schlechter werden.

- Aussagen über die Qualität und Quantität der Datengrundlage sind teilweise in den zusammenfassenden Bewertungen mitaufgeführt und fließen in diese indirekt mit ein. In den Referenzdatensätzen (BGE 2020b) werden keine konkreten Aussagen über die Quantität und Qualität der Datengrundlage aufgenommen. Dies stellt auch eine Weiterentwicklung in Bezug auf die Arbeitshilfe (BGE 2020a) dar.
- Zum jetzigen Zeitpunkt erfolgt die Bewertung der identifizierten Gebiete nach den Indikatoren anhand der jeweiligen endlagerrelevanten Gesteinsabfolge oder -formation, nicht ausschließlich anhand der Wirtsgesteinsformation.
- Bei der Bewertung der identifizierten Gebiete im kristallinen Wirtsgestein nach Anlage 2 (zu § 24 Abs. 3) StandAG wird, wie in § 24 Abs. 2 StandAG gefordert, grundsätzlich der Fall des § 23 Abs. 4 StandAG – ein wesentlich auf technischen oder geotechnischen Barrieren beruhendes Endlagersystem – berücksichtigt. Die geforderte „[...] rechnerische Ableitung, welches Einschlussvermögen die technischen und geotechnischen Barrieren voraussichtlich erreichen“ (§ 24 Abs. 2 S. 1 StandAG) muss spätestens in der Begründung für den Vorschlag nach § 18 Abs. 3 StandAG geführt werden (§ 23 Abs. 4 S. 2 StandAG).

5.3 Grundlegende Vorgehensweise

Für die Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien sind zumeist ortsspezifische, detaillierte Informationen notwendig. Solche geologischen Daten liegen in Schritt 1 der Phase I des Standortauswahlverfahrens nicht flächendeckend vor. Um dennoch eine Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien auf jedes identifizierte Gebiet zu gewährleisten, können für einige der Kriterien nach Anlage 1 bis 11 (zu § 24) StandAG wirtsgesteinsspezifische geologische Daten herangezogen werden. Diese auf Literatur basierenden Daten werden in den Referenzdatensätzen (BGE 2020b) zusammengestellt (vgl. Anwendungsprinzip (2) und (3) in Kapitel 5.4).

Abbildung 4 stellt schematisch die Vorgehensweise der Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien dar. Für jedes identifizierte Gebiet, welches aus der Anwendung der Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen hervorgeht, wird durch Fachexpert/-innen eine Bewertung nach den Indikatoren anhand der Wertungsgruppen nach den Anlagen 1 bis 11 (zu § 24) StandAG vorgenommen (siehe Kapitel 5.6.1). Anschließend erfolgt eine Bewertung der identifizierten Gebiete nach den in den Anlagen (zu § 24) StandAG aufgeführten Kriterien auf Grundlage der Bewertungen der Indikatoren. Daraufhin wird für jedes identifizierte Gebiet eine zusammenfassende Bewertung erarbeitet (siehe Kapitel 5.6.3). Auf Grundlage der zusammenfassenden Bewertung werden Teilgebiete als eine Teilmenge von identifizierten Gebieten ermittelt, die eine günstige geologische Gesamtsituation aufweisen.

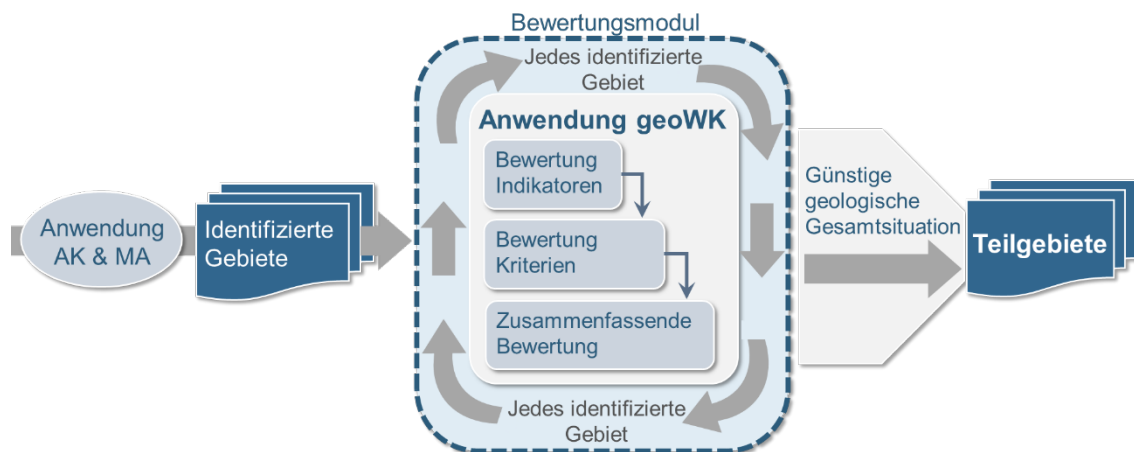


Abbildung 4: Vorgehensweise in der Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien (§ 24 StandAG) für die Ermittlung der Teilgebiete auf Grundlage der identifizierten Gebiete (§ 13 StandAG)

Der Bewertungsvorgang eines jeden identifizierten Gebietes wird in einem Bewertungsmodul (VBA Microsoft Access Datenbank) durchgeführt, in dem Fachexperten/-innen interaktiv durch den Prozess geleitet werden, so dass jede Gebietsbewertung nach demselben Schema erfolgt (siehe Kapitel 5.5). Dadurch wird die Objektivität und Vergleichbarkeit verbessert. Die Nachvollziehbarkeit wird im Sinne des transparenten Verfahrens (nach § 1 Abs. 2 StandAG) durch die Dokumentation und Veröffentlichung der Ergebnisse des Bewertungsmoduls sowie der Angabe aller verwendeter, eindeutig zuordenbarer Referenzen gewährleistet. In der Arbeitshilfe (BGE 2020a) ist die genaue Handhabung des Bewertungsmoduls, wie auch der Bewertungsvorgang zu jedem Indikator, jedem Kriterium und zur zusammenfassenden Bewertung erläutert. Darüber hinaus werden auch die zu bewertenden Parameter und die relevanten Grundlagen näher erklärt. Die Unterlage dient als Arbeitshilfe und führt den jeweiligen Bearbeitenden durch den gesamten Bewertungsvorgang.

Gemäß § 24 Absatz 1 StandAG ergibt sich eine günstige geologische Gesamtsituation nach einer sicherheitsgerichteten Abwägung der Ergebnisse zu allen Abwägungskriterien. Die abschließende zusammenfassende Bewertung für jedes identifizierte Gebiet erfolgt durch eine interne Arbeitsgruppe, welche aus mehreren Fachexperten/-innen besteht, unter Berücksichtigung der im Bewertungsmodul hinterlegten Bewertungen, Begründungen und Referenzen. Im Ergebnis ist das jeweilige identifizierte Gebiet entweder „günstig“ oder „nicht günstig“ mit Blick auf die geologische Gesamtsituation. Als Teilgebiete wurden gemäß § 13 StandAG jene Gebiete ausgewiesen, welche im Ergebnis mit einer günstigen geologischen Gesamtsituation aus der abschließenden zusammenfassenden Bewertung der geowissenschaftlichen Abwägung hervorgingen. Die Ermittlung der Teilgebiete beinhaltet keine Rangfolge.

Das generelle Vorgehen soll konsistent auch für die weiteren Anwendungen der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien im Laufe des Verfahrens angewendet werden. Die Datengrundlage wird sich in Hinblick auf Quantität und Qualität erhöhen, sodass die Be-

wertungsmethoden im Laufe des Verfahrens weiterentwickelt werden und sich die Aussagekraft der Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien erhöhen kann. Die BGE betrachtet dieses Vorgehen als Teil des lernenden Verfahrens (§ 1 Abs. 2 StandAG).

Im Zuge der Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien kommt es im Schritt 1 der Phase I zu keiner Flächenänderung der identifizierten Gebiete, da die Datengrundlage (Existenz, räumliche Auflösung) entsprechende Grenzziehungen nicht präzise genug ermöglicht. Prinzipiell sind die geowissenschaftlichen Abwägungskriterien – wie der Name bereits aussagt – für den bewertenden Vergleich der durch die Mindestanforderungen identifizierten Gebieten geeignet (BT-Drs. 18/11398, S. 71).

Die wichtigsten Grundsätze, welche in der Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien zu berücksichtigen sind, wurden in sogenannten Anwendungsprinzipien zusammengefasst (siehe Kapitel 5.4).

5.4 Anwendungsprinzipien

- (1) Für eine einheitliche Vorgehensweise bei der Bewertung erfolgt diese für eine bestimmte Anzahl von Indikatoren jeweils für sämtliche identifizierten Gebiete eines Wirtsgesteins durch denselben bzw. dieselbe Fachexpert/-in.
- (2) Als Bewertungsgrundlage für die identifizierten Gebiete dienen die von den zuständigen Behörden des Bundes und der Länder auf Grundlage von § 13 Abs. 2 StandAG zur Verfügung gestellten geowissenschaftliche Daten (zu allen durchgeführten Abfragen), von der BGE prozessierte Daten, auf Literatur basierende Referenzdatensätze (BGE 2020b) sowie Literatur.
- (3) Flächendeckende Daten mit einem hohen Detaillierungsgrad, welche für die Bewertung aller identifizierten Gebiete durch die geowissenschaftlichen Abwägungskriterien benötigt werden, liegen erst in einer späteren Phase des Standortauswahlverfahrens vor bzw. können dann erhoben werden. Daher erfolgt die Bewertung einiger der Anlagen 1 bis 11 (zu § 24) StandAG zum jetzigen Zeitpunkt generisch, anhand von wirtsgesteinspezifischen Referenzdatensätzen (BGE 2020b). Auf diese Weise wird gewährleistet, dass die Bewertung im oberen Bereich⁷ der physikalisch möglichen Bandbreite des Wirtsgesteins erfolgt. Auf diese Weise wird die Maxime zu Grunde gelegt, dass eine in der Phase I Schritt 1 des Standortauswahlverfahrens erfolgte Bewertung sich durch einen Informationsgewinn in späteren Phasen nicht verbessert, sondern nur beibehalten wird oder schlechter werden kann⁸.

⁷ Mit oberen Bereich ist hier kein Maximalwert gemeint, sondern mit Blick auf die Bandbreite der physikalischen Größe ein Wert im Bereich des 75er bis 90er Perzentils.

⁸ Im Rahmen des Vorhabens RESUS (Mönig et al. 2020) wurde auf Grundlage des vorhandenen Wissensstandes angegeben, welche Einordnungen der einzelnen Indikatoren in die vom StandAG vorgegebenen Wertungsgruppen für die in Frage kommenden Wirtsgesteine erwartet wird. Diese Hinweise wurden bei der Erstellung der Referenzdatensätze (BGE 2020b) diskutiert und gegebenenfalls berücksichtigt.

- (4) Sämtliche getroffenen Bewertungen werden verbalargumentativ begründet. Diese Begründung muss alle verwendeten Quellen enthalten.
- (5) Für die Indikatoren der Anlagen 5, 8 und 10 sowie teilweise Anlage 9 (zu § 24) StandAG existiert nur die Wertungsgruppe „günstig“. Diese Indikatoren werden mit den Wertungsgruppen „günstig“ oder „nicht günstig“ bewertet⁹.
- (6) Die Wertungsgruppe „ungünstig“ wird als solche bei der Bewertung ausgewiesen, semantisch im Zuge der Bewertung der Kriterien jedoch mit der Wertungsgruppe „weniger günstig“ gleichgesetzt.
- (7) Die Indikatoren der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien beziehen sich zu meist auf den einschlusswirksamen Gebirgsbereich oder den Einlagerungsbereich. Die räumliche Ausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs wird erst mittels Modellrechnungen im Zuge der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen und als Ergebnis der Erkundungen abgeleitet werden (siehe auch BGE 2020am). Bis zur Festlegung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und des Einlagerungsbereichs wird daher der Gebirgsbereich bewertet, der diese aufnehmen könnte. Dementsprechend erfolgt zum jetzigen Zeitpunkt im Verfahren die Bewertung der Indikatoren für die identifizierten Gebiete anhand der jeweiligen endlagerrelevanten Gesteinsabfolge oder -formation, welche im Rahmen der Anwendung der Mindestanforderungen ausgewiesen wird¹⁰.

5.5 Bewertungsmodul

Das Bewertungsmodul ist die Umsetzung der Vorgehensweise in Form einer in „Microsoft Access“ mit VBA umgesetzten Datenbankanwendung mit graphischer Benutzeroberfläche. Ziel ist es, sämtliche Vorgänge, die im Rahmen der Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien durchlaufen werden, nachvollziehbar zu vereinheitlichen und einfach abrufbar zu machen. Die wesentlichen Funktionen des Bewertungsmoduls sind im Folgenden aufgeführt.

⁹ „Günstig“ bedeutet, dass die in der entsprechenden Anlage 9 (zu § 24) StandAG aufgestellte Bedingung erfüllt wird. „Nicht günstig“ bedeutet, dass diese Bedingung nicht erbracht wird, es ist nicht mit „ungünstig“ zu verwechseln.

¹⁰ Im Zuge der Anwendung der Mindestanforderungen werden nach § 23 Abs. 5 Nr. 2 StandAG Gebirgsbereiche ausgewiesen, welche einen mindestens 100 Meter mächtigen einschlusswirksamen Gebirgsbereich aufnehmen können. Im Hinblick auf die Aufgabe der den einschlusswirksamen Gebirgsbereich bildenden Gesteinstypen, eine Ausbreitung der Radionuklide möglichst effektiv zu verhindern, sucht die Vorhabenträgerin in Phase I Gesteinsabfolgen, die aufgrund ihrer Eigenschaften die Funktion einer Barriere (für die Radionuklide) voraussichtlich erfüllen können. Dementsprechend wird im Rahmen der Anwendung der Anforderungen und Kriterien nach §§ 22 bis 24 StandAG in Phase I nach Gesteinsabfolgen gesucht, die (weitgehend) homogen ausgeprägt sind, d. h. aus einem Gesteinstyp gebildet werden und die jeweils zu berücksichtigenden Gesteinstypen wiederum denen entsprechen, die gemäß § 1 Abs. 3 StandAG auch als Wirtsgesteine zu betrachten sind.

- Erarbeitung und Speicherung der Bewertungen: Für jedes identifizierte Gebiet werden die Bewertungen für sämtliche Indikatoren, Kriterien sowie die zusammenfassende Gebietsbewertung inklusive Referenzen und verbalargumentative Begründungen erstellt.
- Hilfestellungen für die Fachexperten/-innen: Für jeden Indikator werden Hinweise in Form einer Arbeitshilfe (BGE 2020a) gegeben. Die im Rahmen der Bewertung gemachten Angaben werden Vollständigkeits- und Plausibilitätsprüfungen unterzogen. Die (Teil-)Ergebnisse werden übersichtlich im Modul visualisiert und entsprechend im vorliegenden Bericht präsentiert.
- Zugang zu den Ergebnissen: Sämtliche Ergebnisse aus der Anwendung des Bewertungsmoduls werden der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt und gehen in den Zwischenbericht Teilgebiete ein.
- Archivierung: Systematische Ablage im Rahmen der Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien. Im Laufe des Verfahrens werden die Ergebnisse aus allen Phasen separat gespeichert.

Detaillierte Informationen zur Umsetzung und Bedienung des Bewertungsmoduls befinden sich in der Arbeitshilfe (BGE 2020a).

5.6 Vorgehensweise zur Bewertung

In den folgenden Unterkapiteln wird jeweils die Vorgehensweise zu den Bewertungen der identifizierten Gebiete nach den einzelnen Indikatoren und Kriterien näher erläutert. Ebenfalls wird das Vorgehen der zusammenfassenden Bewertungen beschrieben. Weitere Informationen zur Anwendung und zum Hintergrund der Bewertung der Indikatoren und Kriterien sind in der Arbeitshilfe (BGE 2020a) beschrieben.

5.6.1 Vorgehensweise zur Bewertung der Indikatoren

Wie bereits in Kapitel 4 beschrieben, stützt sich die Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien auf verschiedene Daten. Die für die Bewertung der identifizierten Gebiete nach den Indikatoren benötigten Parameter wurden zunächst definiert. Je nach vorherrschender Datenlage wurde eine Bewertung der identifizierten Gebiete eines Wirtsgesteins nach einem Indikator basierend auf den Referenzdatensätzen (BGE 2020b) oder eine individuelle Bewertung des identifizierten Gebiets durchgeführt. Im Falle, dass für den zu betrachtenden Indikator keine ortsspezifischen Daten bzw. die Daten nicht in ausreichender Quantität und Qualität vorhanden sind, wurde der jeweilige Referenzdatensatz (siehe BGE 2020b) für die Bewertung verwendet. Liegen ausreichend ortsspezifische Informationen vor, so wurde jedes identifizierte Gebiet individuell auf Basis der vorliegenden Daten oder Literatur bewertet. Diese Bewertungen werden im Folgenden „individuelle Bewertungen“ genannt. In Tabelle 2 ist für jedes Wirtsgestein dargestellt, bei welcher Anlage zu § 24 StandAG die Bewertung der identifizierten Gebiete basierend auf Referenzdatensätzen (BGE 2020b) oder basierend auf individuellen Bewertungen durchgeführt wurde.

Tabelle 2: Übersicht der Vorgehensweise je Kriterium einschließlich der zugehörigen Indikatoren (Anlage zu § 24 StandAG) und je Wirtsgesteinskonfiguration

Kriterium	Vorgehensweise Wirtsgestein Steinsalz in steiler Lagerung	Vorgehensweise kristallines Wirtsgestein	Vorgehensweise Wirtsgestein Tongestein und stratiformes Steinsalz
Anlage 1 (zu § 24 Abs. 3) StandAG: Kriterium zur Bewertung des Transportes radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich	Referenzdatensatz Wirtsgestein Steinsalz	Referenzdatensatz kristallines Wirtsgestein	Referenzdatensätze Wirtsgestein Tongestein und Wirtsgestein Steinsalz
Anlage 2 (zu § 24 Abs. 3) StandAG: Kriterium zur Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper	individuelle Bewertung anhand gebietsspezifischer Daten	individuelle Bewertung anhand gebietsspezifischer Daten	individuelle Bewertung anhand gebietsspezifischer Daten
Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG: Kriterium zur Bewertung der räumlichen Charakterisierbarkeit	individuelle Bewertung anhand gebietsspezifischer Daten	Referenzdatensatz kristallines Wirtsgestein	individuelle Bewertung anhand gebietsspezifischer Daten
Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG: Kriterium zur Bewertung der langfristigen Stabilität der günstigen Verhältnisse	Referenzdatensatz Wirtsgestein Steinsalz	Referenzdatensatz kristallines Wirtsgestein	individuelle Bewertung anhand gebietsspezifischer Daten
Anlage 5 (zu § 24 Abs. 4) StandAG: Kriterium zur Bewertung der günstigen gebirgsmechanischen Eigenschaften	Referenzdatensatz Wirtsgestein Steinsalz	Referenzdatensatz kristallines Wirtsgestein	Referenzdatensätze Wirtsgestein Tongestein und Wirtsgestein Steinsalz
Anlage 6 (zu § 24 Abs. 4) StandAG: Kriterium zur Bewertung der Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten	Referenzdatensatz Wirtsgestein Steinsalz	Referenzdatensatz kristallines Wirtsgestein	Referenzdatensätze Wirtsgestein Tongestein und Wirtsgestein Steinsalz

Kriterium	Vorgehensweise Wirtsgestein Steinsalz in steiler Lagerung	Vorgehensweise kristallines Wirtsgestein	Vorgehensweise Wirtsgestein Tonge- stein und stratifor- mes Steinsalz
Anlage 7 (zu § 24 Abs. 5) StandAG: Kriterium zur Bewertung der Gasbildung	Referenzdatensatz Wirtsgestein Steinsalz	Referenzdatensatz kristallines Wirtsgestein	Referenzdatensätze Wirtsgestein Tonge- stein und Wirtsgestein Steinsalz
Anlage 8 (zu § 24 Abs. 5) StandAG: Kriterium zur Bewertung der Temperaturverträglich- keit	Referenzdatensatz Wirtsgestein Steinsalz	Referenzdatensatz kristallines Wirtsgestein	Referenzdatensätze Wirtsgestein Tonge- stein und Wirtsgestein Steinsalz
Anlage 9 (zu § 24 Abs. 5) StandAG: Kriterium zur Bewertung des Rückhaltevermögens im einschlusswirksamen Gebirgsbereich	Referenzdatensatz Wirtsgestein Steinsalz	Referenzdatensatz kristallines Wirtsgestein	Referenzdatensätze Wirtsgestein Tonge- stein und Wirtsgestein Steinsalz
Anlage 10 (zu § 24 Abs. 5) StandAG: Kriterium zur Bewertung der hydrochemischen Ver- hältnisse	Referenzdatensatz Wirtsgestein Steinsalz	Referenzdatensatz kristallines Wirtsgestein	Referenzdatensätze Wirtsgestein Tonge- stein und Wirtsgestein Steinsalz
Anlage 11 (zu § 24 Abs. 5) StandAG: Kriterium zur Bewertung des Schutzes des ein- schlusswirksamen Gebirgsbereichs durch das Deckgebirge	individuelle Bewer- tung anhand ge- bietsspezifischer Da- ten	individuelle Bewer- tung anhand ge- bietsspezifischer Da- ten	individuelle Bewer- tung anhand ge- bietsspezifischer Da- ten

Wie Tabelle 2 darstellt, wurden, abhängig vom Wirtsgestein, die identifizierten Gebiete nach Anlage 2, 3, 4 und 11 (zu § 24) StandAG individuell bewertet. Zu allen anderen Anlagen liegen derzeit nicht ausreichend ortsspezifische Informationen vor. Ihre Bewertung erfolgt nach den Referenzdatensätzen (BGE 2020b). Für nähere Informationen zu diesen Kriterien ist die Arbeitshilfe heranzuziehen (BGE 2020a) sowie zu den Bewertungsgrundlagen die Referenzdatensätze (BGE 2020b). Die Bewertungen zu den Indikatoren, welche auf Grundlage der Referenzdatensätze erstellt wurden, sind in Anhang 1 und Anhang 2 dargestellt. Die Vorgehensweise zur Bewertung der identifizierten Gebiete nach individuell bewerteten Indikatoren wird in den folgenden Unterkapiteln näher beschrieben.

5.6.1.1 Anlage 2 (zu § 24 Abs. 3) StandAG

Anlage 2 (zu § 24 Abs. 3) StandAG umfasst die Indikatoren „Barrierenmächtigkeit [m]“, „Grad der Umschließung des Einlagerungsbereiches durch einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich“, „Teufe der oberen Begrenzung des erforderlichen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs [m unter Geländeoberfläche]“ und „flächenhafte Ausdehnung bei gegebener Mächtigkeit (Vielfaches des Mindestflächenbedarfes)“. Für identifizierte Gebiete im Tongestein erfolgte zusätzlich eine Bewertung nach dem Indikator „Vorhandensein von Gesteinsschichten mit hydraulischen Eigenschaften und hydraulischem Potenzial, die die Induzierung beziehungsweise Verstärkung der Grundwasserbewegung im einschlusswirksamen Gebirgsbereich ermöglichen können“. Die identifizierten Gebiete aller Wirtsgesteine wurden für diese Indikatoren individuell bewertet.

Für das kristalline Wirtsgestein kann der sichere Einschluss entweder über ein Endlagersystem, welches wesentlich auf technischen oder geotechnischen Barrieren (§ 23 Abs. 4 StandAG), oder durch Einlagerung im einschlusswirksamen Gebirgsbereich erfolgen (weiterführende Informationen sind der Unterlage „Endlagerkonzepte“ (BGE 2020am) zu entnehmen). Zum jetzigen Zeitpunkt werden beide Möglichkeiten betrachtet. Nach § 24 Abs. 2 StandAG tritt im Falle des § 23 Abs. 4 StandAG an die Stelle des Kriteriums der Anlage 2 (zu § 24 Abs. 3) StandAG die rechnerische Ableitung, welches Einschlussvermögen die technischen und geotechnischen Barrieren voraussichtlich erreichen. Nach § 23 Abs. 4 StandAG ist der rechnerische Nachweis spätestens in der Begründung für den Vorschlag nach § 18 Abs. 3 StandAG zu führen. Weiterhin wird in der Begründung zu § 24 Abs. 2 StandAG darauf hingewiesen, dass der Nachweis nur standortbezogen abgeleitet werden kann (BT-Drs. 18/11398, S. 71). Der rechnerische Nachweis wird dementsprechend zu einem späteren Zeitpunkt im Verfahren erbracht werden. Um den Fall zu berücksichtigen, dass die Einlagerung in einem einschlusswirksamen Gebirgsbereich erfolgt, wurde die Anwendung der Anlage 2 für alle identifizierten Gebiete des kristallinen Wirtsgesteins durchgeführt.

Die identifizierten Gebiete wurden für die Indikatoren „Barrierenmächtigkeit [m]“, „Teufe der oberen Begrenzung des erforderlichen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs [m unter Geländeoberfläche]“ und „flächenhafte Ausdehnung bei gegebener Mächtigkeit (Vielfaches des Mindestflächenbedarfes)“ basierend auf den Daten bewertet, die aus der Anwendung der Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen hervorgingen. Hierfür wurden für die Bewertung der identifizierten Gebiete in Salzformationen in steiler Lagerung Modellierprotokolle, Daten aus den entsprechenden ArcGIS-Projekten und Geomodelle verwendet, die mit SKUA-GOCAD im Zuge der Anwendung der Mindestanforderungen erstellt wurden. Für die Bewertung von identifizierten Gebieten in kristallinen Wirtsgesteinen, Tongesteinen und stratiformen Salzformationen wurden Modellierprotokolle und unterschiedliche Daten aus den entsprechenden ArcGIS-Projekten herangezogen. Für einige identifizierte Gebiete in den Wirtsgesteinen Tongestein, stratiformes Steinsalz und kristallines Wirtsgestein lag nur eine unvollständige Abdeckung mit „ASCII-Daten“ aus der Geomodellierung vor. In diesen Fällen konnte nur die Fläche mit

Modellabdeckung bewertet werden. Die nicht abgedeckten Flächen wurden als „günstig“ betrachtet. Dies kann ggf. eine Überschätzung der Bewertung zur Folge haben.

In Abbildung 5 sind die Indikatoren „Barrierenmächtigkeit [m]“, „Tiefe der oberen Begrenzung des erforderlichen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs [m unter Geländeoberfläche]“ und „flächenhafte Ausdehnung bei gegebener Mächtigkeit (Vielfaches des Mindestflächenbedarfes)“ grafisch dargestellt.

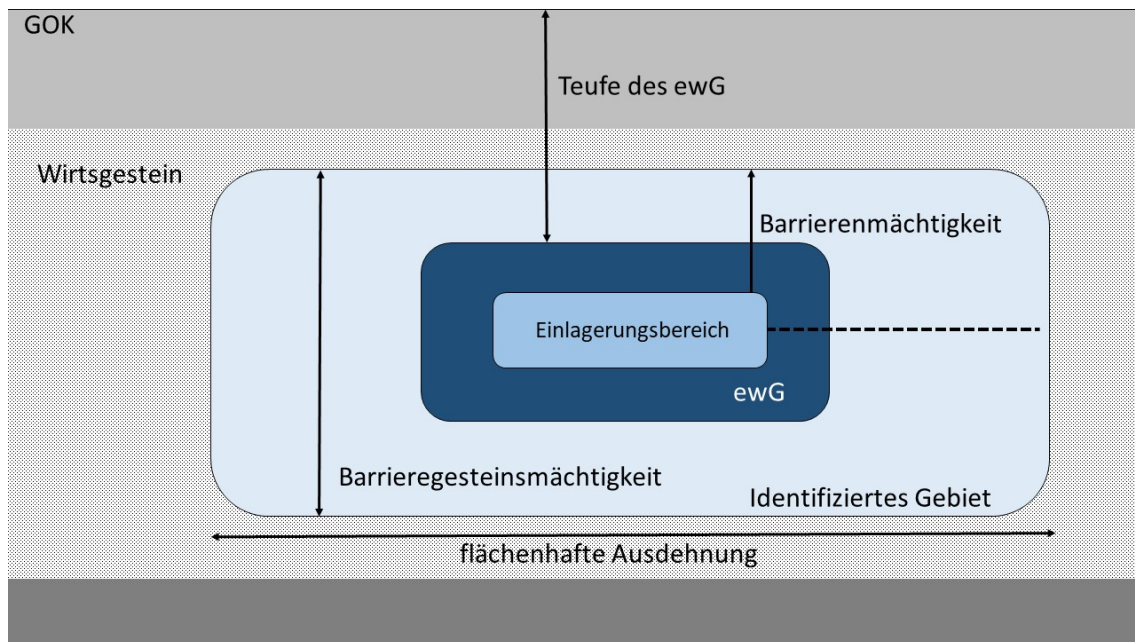


Abbildung 5: Schematische Darstellung der Indikatoren „Barrierenmächtigkeit“, „Tiefe der oberen Begrenzung des erforderlichen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ und „flächenhafte Ausdehnung“ nach Anlage 2 (zu § 24 Abs. 3) StandAG.
Die flächenhafte Ausdehnung ist hier zur Darstellung in 1D über eine Seite des identifizierten Gebietes nur angedeutet und spiegelt nicht die reelle Ausdehnung in 2D wieder. Des Weiteren ist die Barrieregesteinsmächtigkeit visualisiert, die für die Bewertung des Indikators „Barrierenmächtigkeit“ herangezogen wird. Die Abbildung ist modifiziert nach Alfara et al. (2020b, S. 143).

Unter „Barrierenmächtigkeit“ wird nach Alfara et al. (2020a) der kleinste Abstand zwischen der mittleren Teufenlage des Einlagerungsbereiches und dem Rand des Barrieregesteins verstanden (siehe Abbildung 5). Aufgrund der Datenlage wird zum jetzigen Zeitpunkt die Barrierenmächtigkeit ausschließlich in ihrer vertikalen Ausdehnung betrachtet. Für die Anwendung des Indikators wurde die Barrieregesteinsmächtigkeit verwendet (für weitere Informationen siehe BGE 2020a, Kapitel 7.2.3). Diese entspricht der doppelten Barrierenmächtigkeit (siehe Tabelle 3).

Tabelle 3: *Barrieregesteinsmächtigkeiten, welche für die Anwendung des Indikators „Barrierenmächtigkeit“ (verdoppelte Barrierenmächtigkeit aus Anlage 2 (zu § 24 Abs. 3) StandAG) verwendet wurden*

Indikator der Anlage 2 (zu § 24) StandAG	Wertungsgruppe		
	günstig	bedingt günstig	weniger günstig
Barrieregesteinsmächtigkeit (doppelte Barrierenmächtigkeit) [m]	> 300	200 – 300	100 – 200

Die Informationen zur Barrieregesteinsmächtigkeit jedes identifizierten Gebiets wurden den Modellierprotokollen, den Geomodellen oder den ASCII-Daten des entsprechenden identifizierten Gebiets entnommen. Da sich die Barrieregesteinsmächtigkeit über das gesamte identifizierte Gebiet hinweg ändern kann, wurde die Variation der Barrieregesteinsmächtigkeit überprüft. Hierfür wurde für die jeweilige minimale Barrieregesteinsmächtigkeit der Wertungsgruppen kontrolliert, ob der einfache Flächenbedarf¹¹ für ein Endlager für wärmeentwickelnde, hoch radioaktive Abfälle (siehe Tabelle 4) erfüllt ist. Bei Erfüllung des Flächenbedarfs für mehrere Wertungsgruppen wurde stets die günstigere Wertungsgruppe gewählt.

Die Überprüfung des einfachen Flächenbedarfs für die Flächen, die in eine Wertungsgruppe der Barrierenmächtigkeit fallen, erfolgte für identifizierte Gebiete in Steinsalz in steiler Lagerung mittels GOCAD wie in BGE (2020a, Kapitel 7.2.3.2) dargestellt. Im Zuge der Anwendung der Mindestanforderungen wurden die 3D-Modelle der identifizierten Gebiete bundeslandweise in GOCAD bearbeitet. Für identifizierte Gebiete, welche sich über mehrere Bundesländer erstrecken, wurde in GOCAD jeweils eine Konturlinie bei gleicher Mächtigkeit in den Teilbereichen des identifizierten Gebietes erstellt. Diese Konturlinien wurden jeweils mit der entsprechenden Bundeslandgrenze zu einer in sich geschlossenen Kurve verbunden. Die so ermittelten Flächen wurden addiert und mit dem einfachen Flächenbedarf, wie oben beschrieben, abgeglichen.

Die Überprüfung des einfachen Flächenbedarfs für die Flächen, die in eine Wertungsgruppe der Barrierenmächtigkeit fallen, erfolgte für identifizierte Gebiete in stratiformem Steinsalz, Tongestein sowie kristallinem Wirtsgestein für alle Teilflächen der jeweiligen Gebiete mittels ArcGIS (für weitere Informationen siehe BGE 2020a, Kapitel 7.2.3.2). Eine detaillierte Auflistung der Arbeitsschritte ist Anhang 3 zu entnehmen.

¹¹ Bezeichnung des „einfachen Flächenbedarfs“ ist angelehnt an das Vielfache des Flächenbedarfs, wie beispielsweise beim „zweifachen Flächenbedarf“. Der „einfache Flächenbedarf“ wird bei der Bearbeitung der Indikatoren „Barrierenmächtigkeit [m]“ und „Tiefe der oberen Begrenzung des erforderlichen einschlusswirksamen Gebirgsbereiches [m unter Geländeoberfläche]“ genutzt. Letzterer findet beim Indikator „flächenhafte Ausdehnung bei gegebener Mächtigkeit (Vielfaches des Mindestflächenbedarfs)“ aus Anlage 2 (zu § 24 Abs. 3) StandAG Anwendung.

Tabelle 4: *Flächenbedarfe entsprechend der Begründung des Gesetzentwurfes vom 07.03.2017 (BT-Drs. 18/11398). Die in der zugrundeliegenden Studie (DBE TEC 2016) berechneten Flächenbedarfe beziehen sich auf eine Teufe von 600 m. Der Flächenbedarf in geringerer bzw. größerer Teufe ist entsprechend davon abweichend kleiner bzw. größer.*

Wirtsgestein	Flächenbedarf in km ²
Tongestein	10
kristallines Wirtsgestein	6
Steinsalz	3

Zum jetzigen Zeitpunkt wird davon ausgegangen, dass Wirtsgestein und einschlusswirksamer Gebirgsbereich Teil ein und desselben Gesteinskörpers sind (siehe Fußnote 10). Dieser Gesteinskörper weist zum einen die funktionalen Eigenschaften des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches auf und erlaubt zum anderen die Anlage eines Endlagerbergwerks. Daher wird für den Indikator „Grad der Umschließung des Einlagerungsbereichs durch einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich“ zum jetzigen Zeitpunkt des Verfahrens davon ausgegangen, dass dieser vollständig ist. Die Bewertung des Indikators erfolgte dementsprechend für alle identifizierten Gebiete aller Wirtsgesteine mit „günstig“.

Für die Bewertung der identifizierten Gebiete nach dem Indikator „Teufe der oberen Begrenzung des erforderlichen einschlusswirksamen Gebirgsbereiches [m unter Geländeoberfläche]“ wurde der Abstand zwischen dem äußeren oberen Rand eines identifizierten Gebiets und der Geländeoberkante betrachtet (für weitere Informationen siehe BGE 2020a, Kapitel 7.2.4). Die Information zu diesem Abstand eines identifizierten Gebiets geht aus den entsprechenden Modellierprotokollen und Geomodelldaten (ASCII-Daten) hervor.

Bei identifizierten Gebieten der Wirtsgesteine stratiformes Steinsalz und Tongestein wurde im Zuge der Übergabe der identifizierten Gebiete an die Bearbeiter/-innen der Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien die Teufenlage der Basisfläche der Gebiete übermittelt. Die Überprüfung der Teufe erfolgte dementsprechend ausgehend von der Basisfläche. So wurde beispielsweise die günstige Teufe (tiefer 500 m unter Geländeoberkante nach Anlage 2 (zu § 24 Abs. 3) StandAG) anhand der Teufe der Basisfläche von 600 m unter Geländeoberkante überprüft (Abbildung 6 und Abbildung 7). So wird gewährleistet, dass ein mindestens 100 m mächtiger einschlusswirksamer Gebirgsbereich (§ 23 Abs. 5 Nr. 2 StandAG) realisiert werden kann.

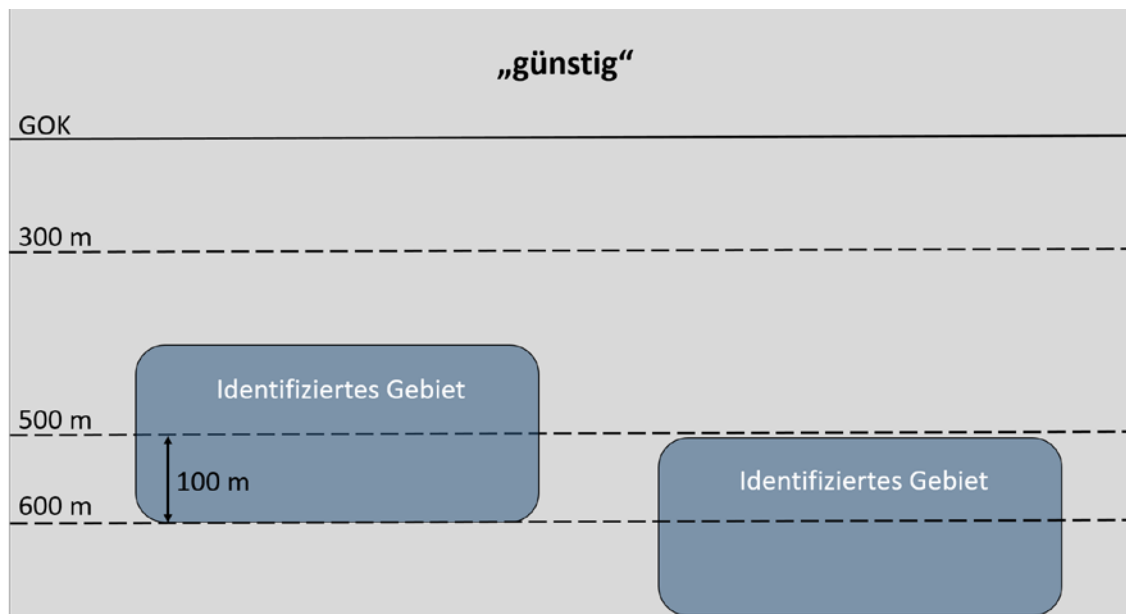


Abbildung 6: Schematische Visualisierung der Anwendung des Indikators „Teufe der oberen Begrenzung des erforderlichen einschlusswirksamen Gebirgsbereiches [m unter Geländeoberfläche]“ (Anlage 2 (zu § 24) StandAG), welche zu einer „günstigen“ Bewertung führt

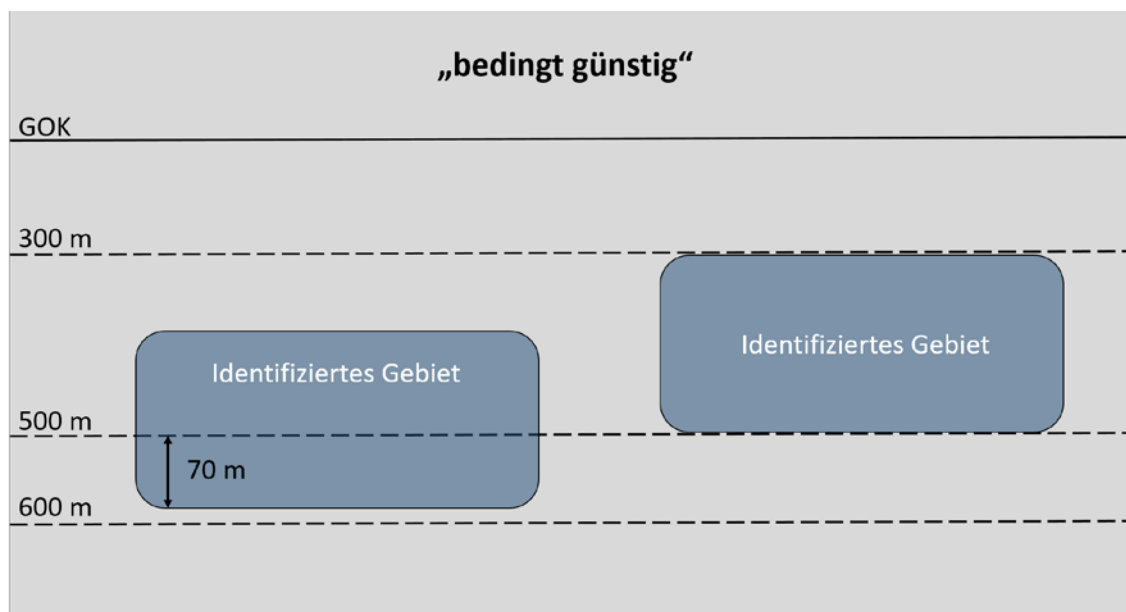


Abbildung 7: Schematische Visualisierung der Anwendung des Indikators „Teufe der oberen Begrenzung des erforderlichen einschlusswirksamen Gebirgsbereiches [m unter Geländeoberfläche]“ (Anlage 2 (zu § 24) StandAG), welche zu einer „bedingt günstigen“ Bewertung führt

Da die Tiefenlage der Basisfläche eines Gebiets lokal variieren kann, wurde auch bei diesem Indikator kontrolliert, ob der einfache Flächenbedarf nach Tabelle 4 für die Teufen der jeweiligen Wertungsgruppen erfüllt ist. Diese Überprüfung erfolgte im Rahmen der Bewertung des Kriteriums (siehe Kapitel 5.6.2.1).

Bei Sichtung der Daten der identifizierten Gebiete des Wirtsgesteins Steinsalz in steiler Lagerung wurde deutlich, dass ein einschlusswirksamer Gebirgsbereich innerhalb jedes identifizierten Gebietes in einer günstigen Teufe (tiefer 500 m unter Geländeoberkante nach Anlage 2 (zu § 24 Abs. 3) StandAG) realisiert werden kann. Die Überprüfung des Flächenbedarfs entfiel dementsprechend. Die Bewertung erfolgte für alle diese identifizierten Gebiete mit „günstig“.

Die Bewertung der identifizierten Gebiete nach dem Indikator „flächenhafte Ausdehnung bei gegebener Mächtigkeit (Vielfaches der Mindestfläche)“ erfolgte nach der jeweiligen Gesamtfläche des identifizierten Gebiets ohne eine etwaige Teilflächenprüfung (für weitere Informationen siehe BGE 2020a, Kapitel 7.2.5). Angaben der Flächen gehen aus den entsprechenden Modellierprotokollen hervor. Die Bewertung soll für das Vielfache der Mindestfläche erfolgen („viel größer als 2-fach, etwa 2-fach, viel kleiner als 2-fach“ nach Anlage 2 (zu § 24 Abs. 3) StandAG). In Tabelle 5 sind die Werte der vielfachen flächenhaften Ausdehnung gelistet, welche für die Bewertung verwendet wurden.

Tabelle 5: Werte der vielfachen flächenhaften Ausdehnungen für die verschiedenen Wirtsgesteine, welche für die Anwendung des Indikators „flächenhafte Ausdehnung bei gegebener Mächtigkeit (Vielfaches des Mindestflächenbedarfs)“ (Auszug aus Anlage 2 (zu § 24) StandAG)

Wirtsgestein	Wertungsgruppe (jeweils in km ²)		
	günstig	bedingt günstig	weniger günstig
Steinsalz	größer 9	6 bis 9	3 bis 6
Kristallines Wirtsgestein	größer 18	12 bis 18	6 bis 12
Tongestein	größer 30	20 bis 30	10 bis 20

Die Bewertung der identifizierten Gebiete nach dem Indikator „Vorhandensein von Gesteinsschichten mit hydraulischen Eigenschaften und hydraulischem Potenzial, die die Induzierung beziehungsweise Verstärkung der Grundwasserbewegung im einschlusswirksamen Gebirgsbereich ermöglichen können“, wird ausschließlich bei identifizierten Gebieten, die sich in Tongesteinen befinden, angewendet. Eine abschließende Bewertung der identifizierten Gebiete im Tongestein nach dem Indikator „Anschluss von wasserleitenden Schichten in unmittelbarer Nähe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs/Wirtsgesteinkörpers an ein hohes hydraulisches Potenzial verursachendes Gebiet“ ist zum jetzigen Zeitpunkt aufgrund fehlender Detailinformationen nicht sinnvoll möglich. Aus diesem Grund erfolgt die Bewertung für alle identifizierten Gebiete zum jetzigen Zeitpunkt mit „günstig“ (für weitere Informationen siehe BGE 2020a, Kapitel 7.2.3.2).

5.6.1.2 Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG

Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG umfasst die Indikatoren „Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich“, „Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften“ und „Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)“. Identifizierte Gebiete der Wirtsgesteine Steinsalz in steiler Lagerung, stratiforme Steinsalzformationen und Tongestein wurden für diese Indikatoren individuell bewertet. Identifizierte Gebiete des kristallinen Wirtsgesteins wurden nach dem Referenzdatensatz bewertet.

a. Anwendung für identifizierte Gebiete in Tongesteinen und stratiformen Steinsalzformationen

Die identifizierten Gebiete wurden für die Indikatoren „Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich“, „Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften“, „Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit“ und „Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)“ basierend auf den geologischen Übersichten und Zusammenfassungen aus den bundeslandspezifischen und länderübergreifenden Modellierungsprotokollen (siehe BGE 2020j, 2020l) und ergänzenden Informationen aus Fachliteratur in Zusammenarbeit mit den Bearbeiter/-innen der Mindestanforderungen bewertet.

Die Bewertung für die Indikatoren erfolgte auf derselben Datengrundlage, was im Ergebnis meistens zu einer gleichen Bewertung dieser drei Indikatoren führte. Die Bewertung des Indikators „Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit“ wurde ebenfalls auf Basis der Modellierprotokolle durchgeführt, jedoch unabhängig von den anderen Indikatoren.

Im Bewertungsmodul wurden für die jeweiligen identifizierten Gebiete und einzelnen Indikatoren der Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG jeweils Zusammenfassungen der Begründungstexte dokumentiert. Zudem wurden verwendete Literaturreferenzen eingetragen. Die dazugehörigen detaillierten literaturgestützten Begründungstexte mit generellem geologischen Überblick sind Anhang 4 und Anhang 5 zu entnehmen.

Darüber hinaus wird die Bewertung von identifizierten Gebieten im Grabeninneren des Oberrheingrabens nach Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG in Anhang 6 detailliert ausgeführt. Ebenso wird hier die entsprechende Begründung zur Bewertung erläutert.

b. Anwendung für identifizierte Gebiete in Steinsalzformationen in steiler Lagerung

Identifizierte Gebiete in steilstehenden Salzstrukturen wurden nach den Indikatoren „Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich“, „Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften“ und „Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)“ basierend auf den unterschiedlichen Lithologien von Oberrotliegendsalinaren und Zechsteinsalinaren bewertet. Ausschlaggebend hierfür ist ein hoher Tonanteil in den Salz-Ton-Gemischen des Oberrotliegend und der hohe Anteil

an Halit speziell in der Staßfurtformation der Zechsteinsalinare. Für die Bewertung wurden daher die Salzstöcke zunächst danach eingeordnet, ob es sich um ein Zechsteinsalinare ohne Anteil an Rotliegend handelt oder um ein Doppelsalinare, welches sowohl Zechsteinsalinare als auch Oberrotliegendsalinare miteinschließt. Im zweiten Arbeitsschritt wurde der Internbautyp der Doppelsalinare bestimmt. Die verschiedenen Internbautypen, wie sie im „InSpEE-DS“ Projekt definiert wurden, sind in Abbildung 8 dargestellt. Die Information über die Internbautypen der Doppelsalinare beruht auf der Datenlieferung der BGR vom 17. Juli 2020 (Geschäftszeichen: SG02101/17-3/15-2020#20). Die Internbautypen differenzieren u. a. die Doppelsalinare, bei welchen die Oberrotliegendsalinare die überliegenden Zechsteinsalinare am Top der Salzstockstruktur durchspießen und Doppelsalinare, bei denen dies nicht der Fall ist und einen großen Bereich an überliegendem Zechstein vorweisen.

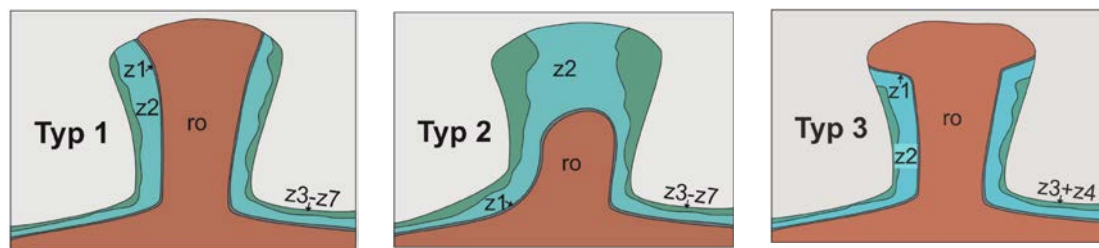


Abbildung 8: Klassifizierung der Doppelsalinare nach verschiedenen Internbautypen, die Oberrotliegendsalinare werden in Rot und die Zechsteinsalinare in Blau und Grün dargestellt (Fleig & Röhling 2019)

Der Internbau wurde bestimmt, um den Anteil an Zechstein im Doppelsalinare abzuschätzen. Doppelsalinare, welche einen Internbautyp 2 aufweisen, zeigen einen großen Bereich an Zechstein über dem unterliegenden Oberrotliegend. Sie unterliegen daher derselben Bewertung wie Zechsteinsalinare ohne Rotliegendanteil und wurden nach den Eigenschaften der Zechsteinsalinare bewertet. Identifizierte Gebiete bestehend aus Zechsteinsalinaren ohne Rotliegendanteil oder Doppelsalinaren mit Internbautyp 2 wurden für alle der drei Indikatoren mit „günstig“ bewertet. Identifizierte Gebiete, welche Doppelsalinare mit Internbautyp 1 oder 3 entsprechen, wurden dem hingegen nach den Eigenschaften der Oberrotliegendsalinare für alle der drei Indikatoren mit „bedingt günstig“ bewertet (für weitere Informationen siehe BGE 2020a, Kapitel 7.3).

Für den Indikator „Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit“ erfolgte für die identifizierten Gebiete in steilstehenden Salzformationen keine unterschiedliche Bewertung. Basierend darauf, dass Salzstöcke im Zuge ihrer Entstehung tektonische Prozesse erfahren haben, welche z. B. zur Verfaltung der beteiligten Gesteine geführt hat (Kockel & Krull 1995, S. 11, 14; Pollok et al. 2016, S. 110), wurden alle identifizierten Gebiete in steilstehenden Salzformationen für diesen Indikator mit „bedingt günstig“ bewertet (für weitere Informationen siehe BGE 2020a, Kapitel 7.3).

5.6.1.3 Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG

Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG umfasst die Indikatoren „Zeitspanne, über die sich die Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht wesentlich verändert hat“, „Zeitspanne, über die sich die Ausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht wesentlich verändert hat“ und „Zeitspanne, über die sich die Gebirgsdurchlässigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht wesentlich verändert hat“. Für diese Indikatoren wurden identifizierte Gebiete in stratiformen Steinsalzformationen und Tongestein individuell bewertet. Identifizierte Gebiete des kristallinen Wirtsgesteins und Salzformationen in steiler Lagerung wurden nach den Referenzdatensätzen (BGE 2020b) bewertet.

Die Bewertung der drei Indikatoren erfolgte auf Basis der geologischen Übersichten und Zusammenfassungen aus den bundeslandspezifischen und länderübergreifenden Modellierprotokollen (siehe BGE 2020j, 2020l), die ggf. mit weiteren Informationen aus der Fachliteratur ergänzt wurden. Aufgrund derselben Datengrundlage und der innewohnenden Kopplung der einzelnen Indikatoren untereinander, fiel die Bewertung je identifiziertem Gebiet nach allen Indikatoren des Kriteriums meistens gleich aus.

Im Bewertungsmodul wurden für die jeweiligen identifizierten Gebiete und einzelnen Indikatoren der Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG jeweils Zusammenfassungen der Begründungstexte dokumentiert. Zudem wurden verwendete Literaturreferenzen eingetragen. Die dazugehörigen detaillierten literaturgestützten Begründungstexte mit generellem geologischen Überblick sind für Tongestein Anhang 4 und für stratiformes Steinsalz Anhang 5 zu entnehmen.

Darüber hinaus finden sich für den Indikator „Zeitspanne, über die sich die Gebirgsdurchlässigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht wesentlich verändert hat“ im Anhang 6 die Bewertung von identifizierten Gebieten im Grabeninneren des Oberrheingrabens. Ebenso wird hier die entsprechende Begründung zur Bewertung erläutert.

5.6.1.4 Anlage 11 (zu § 24 Abs. 5) StandAG

Anlage 11 (zu § 24 Abs. 5) StandAG umfasst die Indikatoren „Überdeckung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs mit grundwasserhemmenden Gesteinen, Verbreitung und Mächtigkeit grundwasserhemmender Gesteine im Deckgebirge“, „Verbreitung und Mächtigkeit erosionshemmender Gesteine im Deckgebirge des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ und „keine Ausprägung struktureller Komplikationen im Deckgebirge, aus denen sich subrosive, hydraulische oder mechanische Beeinträchtigungen für den einschlusswirksamen Gebirgsbereich ergeben könnten“. Die identifizierten Gebiete aller Wirtsgesteine wurden nach diesen Indikatoren individuell bewertet.

a. Anwendung 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“

Aufgrund der Tatsache, dass zum jetzigen Stand des Standortauswahlverfahrens keine flächendeckenden Informationen zum Deckgebirgsaufbau vorliegen, erfolgten die Bewertungen im Rahmen von § 13 StandAG anhand der im Deckgebirge vorhandenen stratigrafischen Horizonte.

Zum jetzigen Zeitpunkt des Verfahrens wurde für die Bewertung des Indikators „Verbreitung und Mächtigkeit erosionshemmender Gesteine im Deckgebirge des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ äquivalent zu dem Indikator „Überdeckung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs mit grundwasserhemmenden Gesteinen, Verbreitung und Mächtigkeit grundwasserhemmender Gesteine im Deckgebirge“ vorgegangen.

Es ist zu beachten, dass unter Überdeckung die das Wirtsgestein überlagernden Gesteine verstanden werden, während das Deckgebirge per Definition (§ 2 Nr. 13 StandAG) alle Gesteine oberhalb des Einlagerungsbereichs bzw. einschlusswirksamen Gebirgsbereichs beinhaltet, also auch Teile des Wirtsgesteins (für weitere Informationen siehe BGE 2020a).

Die Auswertung wurde mit Hilfe der Software ArcGIS durchgeführt. Datengrundlage sind die Ergebnisse der Anwendung der Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG, welche die Gebietsinformationen bezüglich der Lage der identifizierten Gebiete (2D-Polygon-Features), Punktdatensätze zur Lage der Oberfläche („Top“) der Formation, Basisflächen und Mächtigkeiten enthalten. Des Weiteren wurden die im Zuge der Bearbeitung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien erstellten Karten zur Tiefenlage der Quartärbasis und die Modell- und InSpEE-Datensätze (von Goerne et al. 2016) zur Lage von Salzstockoberflächen verwendet. Das Modellierprotokoll zur Erstellung der Quartärbasis sowie eine Darstellung der Quartärbasis sind im „Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“ (BGE 2020I) aufgeführt. Für alle Wirtsgesteine gelten die folgenden Prinzipien zur Anwendung (für weitere Informationen siehe BGE 2020a):

- Die ersten 100 m des Deckgebirges werden vom Gesetzgeber als nicht schützenswert angesehen (§ 21 Abs. 2 StandAG). Daher werden identifizierte Gebiete mit einer minimalen Teufe der Wirtsgesteinsoberfläche kleiner als 100 m unter Geländeoberkante als „ungünstig“ bewertet (Abbildung 9 a und b). Bei diesem Auswertungsschritt wurden innerhalb von ArcGIS die Punktdaten der Topflächen der Wirtsgesteine innerhalb der identifizierten Gebiete mittels des Geoverarbeitungstools „Inverse Distance Weighted Interpolation“ interpoliert.
- Das Quartär, welches erdgeschichtlich die jüngste Einheit darstellt, wird grundsätzlich als weder grundwasser- noch erosionshemmend angesehen. Aufgrund dessen werden alle identifizierten Gebiete, deren Wirtsgesteinsoberfläche das

Quartär schneiden, ebenfalls mit „ungünstig“ bewertet (Abbildung 9 d und e). Die Bewertung der Überdeckung auf Basis der stratigrafischen Horizonte stellt eine vereinfachte Vorgehensweise in diesem Schritt des Verfahrens dar. Aufgrund des geringen Alters und Tiefenlage, fehlender Diagenese sowie der überwiegend sandig und kiesigen Ausprägung eiszeitlicher Sedimente besitzt das Quartär die geringste Schutzwirkung aller im Deckgebirge vorkommenden stratigrafischen Horizonte. Obwohl tonige grundwasserhemmende Lagen in größeren Mächtigkeiten vorkommen können, sind für diese aufgrund der eiszeitlichen Entstehungsweise, mit wechselnden Ablagerungsbedingungen, lokal begrenzte und lückenhafte Ausprägungen zu erwarten. Außerdem kommt es durch die glazial bedingte Erosion tertiärer Sedimente zu einer heterogenen Schichtenabfolge. Das Quartär wird daher als ungünstigste stratigrafische Einheit in Bezug auf grundwasser- und erosionhemmende Gesteine angesehen und eignet sich somit für eine erste vergleichende Einschätzung des Deckgebirges. In der Anwendung wurde für Bereiche, in denen keine Daten zur Lage der Quartärbasis vorlagen, der Wert „0“ angenommen (also „kein Quartär vorhanden“), welches zu einer Überschätzung, jedoch nicht zu einer fälschlich schlechten Bewertung führen kann. Bei diesem Auswertungsschritt wurden in ArcGIS die interpolierte Topfläche des Wirtsgesteins mittels des Geoverarbeitungstools „Minus“ von der Oberfläche der Quartärbasis subtrahiert. An Grenzbereichen zwischen Flächen, für die Werte zur Lage der Quartärbasis vorlagen und solchen, die im Zuge der Bearbeitung auf den Wert „0“ gesetzt wurden, kam es durch die Lage der Maske vereinzelt zu unplausiblen Werten. Diese wurden als Artefakte gewertet und sind nicht in der Bewertung eingeflossen. Die resultierende Fläche zeigt den Abstand zwischen der Oberfläche des Wirtsgesteins und der Quartärbasis an.

- Bei den als nicht „ungünstig“ bewerteten identifizierten Gebieten wurde weiterhin ermittelt, ob eine potentiell *mächtige* Überdeckung gegeben ist (siehe Anlage 11 (zu § 24 Abs. 5) StandAG). In Anlehnung an das „Kriterium zur Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper“ (Anlage 2 (zu § 24 Abs. 3) StandAG) wird als eine *mächtige* grundwasser- oder erosionshemmende Überdeckung eine Mächtigkeit von mindestens 150 m festgelegt. Insofern der Abstand zwischen Oberfläche des Wirtsgesteins und der Quartärbasis kleiner als 150 m ist, wurde das entsprechende identifizierte Gebiet der Wertungsgruppe „bedingt günstig“ zugeordnet (Abbildung 9 f). Bei einer Überdeckung größer/gleich 150 m, wurde das identifizierte Gebiet mit „günstig“ bewertet (Abbildung 9 g).

Aufgrund der Wasserlöslichkeit von Steinsalz erfolgte die Anwendung unterschiedlich für die verschiedenen Wirtsgesteine. Ausschlaggebend für die Bewertung von Steinsalz ist ein punktuell auftretendes „ungünstiger“ Verhältnis (Abbildung 9 b und d), während für kristalline Wirtsgesteine und Tongesteine ein flächiges Auftreten „ungünstiger“ Verhältnisse ausschlaggebend für die Bewertung ist (Abbildung 9 a, c und e).

Durch die Anwendung dieses Bewertungsschemas auf alle Wirtsgesteine kann es, wie oben dargelegt, im Falle einer nicht vorhandenen Überdeckung des Wirtsgesteines zu

einer „ungünstigen“ Bewertung kommen. Bei kristallinen Wirtsgesteinen ist dies jedoch im Vergleich mit anderen Wirtsgesteinen nicht realistisch. Kristalline Wirtsgesteine werden grundsätzlich als grundwasser- und erosionshemmend angesehen (Trask et al. 1986). Dies wird in der zusammenfassenden Bewertung entsprechend berücksichtigt.

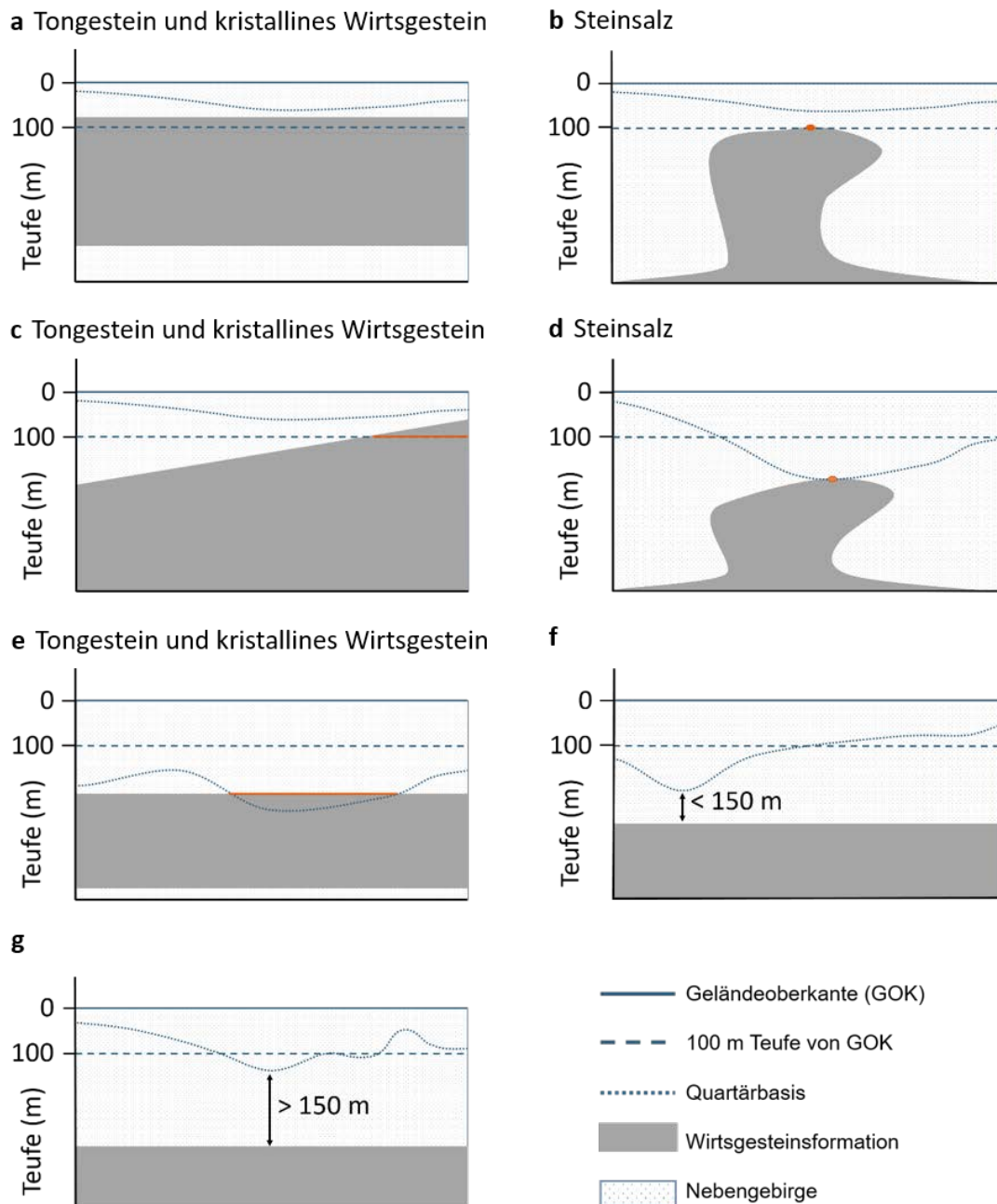


Abbildung 9: Anwendungsbeispiele zur Bewertung identifizierter Gebiete nach Anlage 11 (zu § 24) StandAG.

a Die minimale Wirtsgesteinsoberfläche ist flächig kleiner als 100 m. Das identifizierte Gebiet wird mit „ungünstig“ bewertet. **b** Die minimale Wirtsgesteinsoberfläche ist punktuell kleiner als 100 m. Das identifizierte Gebiet wird mit „ungünstig“ bewertet. **c** Die minimale Wirtsgesteinsoberfläche ist in einem bestimmten Bereich kleiner als 100 m

(orange). Identifizierte Gebiete, welche sich ausschließlich unter diesem Bereich befinden, werden mit „ungünstig“ bewertet. Alle anderen erhalten eine Bewertung nach f/g. d: Die minimale Wirtsgesteinsoberfläche schneidet die Quartärbasis punktuell. Das identifizierte Gebiet wird mit „ungünstig“ bewertet. e die minimale Wirtsgesteinsfläche schneidet die Quartärbasis in einem bestimmten Bereich (orange). Identifizierte Gebiete, welche sich ausschließlich unter diesem Bereich befinden, werden mit „ungünstig“ bewertet. Andere identifizierte Gebiete erhalten eine Bewertung nach f/g. f Der Abstand zwischen Oberfläche des Wirtsgesteins und der Quartärbasis ist kleiner als 150 m. Das identifizierte Gebiet wird mit „bedingt günstig“ bewertet. g Der Abstand zwischen Oberfläche des Wirtsgesteins und der Quartärbasis ist größer als 150 m. Das identifizierte Gebiet wird mit „günstig“ bewertet.

Nachfolgend werden Besonderheiten bei der Bearbeitung der einzelnen Wirtsgesteine beschrieben, die sich während der Bearbeitung und 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“ ergaben.

Steinsalz in steiler Lagerung

Durch die Interpolation der Punktdaten der Salzstockoberflächen aus den 3D-Geomodellen der Mindestanforderungsbearbeitung in ArcGIS mittels des Geoverarbeitungstools „Inverse Distance Weighted Interpolation“ kam es zu Abweichungen zwischen den ursprünglichen Daten und den interpolierten Daten. Daher sind Unterschiede zu den Ergebnissen der Anwendung der Mindestanforderungen nach § 23 StandAG möglich. Aufgrund der Abweichungen wird die Tiefenlage des Salzstockes ggf. überschätzt, was in diesen Fällen zu einer „günstigeren“ Bewertung führte.

Des Weiteren war es aufgrund der unterschiedlichen Datenlagen bei den Bundesländern Schleswig-Holstein und Brandenburg nicht möglich die Dachregionen (Top) der identifizierten Gebiete zu extrahieren. Stattdessen basieren die Daten, die für die Auswertung verwendet wurden, auf der kompletten Salzstockumhüllenden. Dies hatte zur Folge, dass in der Projektion die Daten der Top- und Basisflächen in den überhängenden Bereichen des Salzstockes nebeneinanderliegen. Dadurch konnte die flächige Interpolation und Auswertung nicht in überhängenden Dachbereichen durchgeführt werden. Aus diesem Grund wurden alle Salzstöcke, welche in Brandenburg und Schleswig-Holstein liegen, einer zusätzlichen Prüfung unterzogen, wenn sie nicht durch vorherige Schritte der Auswertung innerhalb der Anlage 11 (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“) bereits als „ungünstig“ bewertet wurden oder wenn der minimale Abstand zwischen Salzstock und Quartärbasis innerhalb des identifizierten Gebietes mehr als 150 m beträgt. Dabei wurde der Abstand aus der minimalen Teufe des Salzstockes und der maximalen Teufe der Quartärbasis berechnet, unabhängig von der Lage der Punkte.

Bei der zusätzlichen Prüfung wurden die Daten der Dachregionen bereinigt. Durch einen Abgleich mit benachbarten Datenpunkten wurde für jeden Datenpunkt die Tiefenlage überprüft und für quasi-übereinanderliegende Punkte die Untenliegenden nicht für die Topflächeninterpolation berücksichtigt.

Stratifomes Steinsalz, Tongestein und kristallines Wirtsgestein

Für die Wirtsgesteine stratiformes Steinsalz und Tongestein stehen zum jetzigen Zeitpunkt die Basisflächen der identifizierten Gebiete sowie Angaben zu Mächtigkeit und Tiefe zur Verfügung. Aus diesen lässt sich die Topfläche der identifizierten Gebiete (minimale Teufe von 300 m) ermitteln (BGE 2020j). Für das kristalline Wirtsgestein stehen Topflächen sowie Angaben zu Mächtigkeit und Tiefe zur Verfügung (siehe BGE 2020j). Die Topfläche der identifizierten Gebiete der Wirtsgesteine stratiformes Steinsalz, Tongestein und kristallines Wirtsgestein entspricht jedoch nicht zwangsläufig der Wirtsgesteinsoberfläche.

Aus diesem Grund kann es zu einer Überschätzung der Mächtigkeit der Überdeckung kommen und dementsprechend zu einer Überschätzung der Bewertung für diese Indikatoren. Dies ist insbesondere bei der punktuellen Bewertung von stratiformem Steinsalz der Fall.

Für einige identifizierten Gebiete in den Wirtsgesteinen Tongestein, stratiformes Steinsalz und kristallines Wirtsgestein lag nur eine unvollständige Abdeckung mit ASCII-Daten aus der Geomodellierung vor. In diesen Fällen wurden nur die Flächen mit Modellabdeckung bewertet, die nicht abgedeckten Flächen wurden als „günstig“ betrachtet, so dass sie zum jetzigen Zeitpunkt im Verfahren keinen weiteren Einfluss auf die Bewertung hatten.

Bei der Auswertung von identifizierten Gebieten, die sich über die Grenze der einzelnen Quartärbasisflächen erstreckten, wurden in einem Zwischenschritt die beiden Flächen mittels der ArcGIS Rasterfunktion „*Raster mosaikieren*“ zusammengefügt und die Berechnung mit der resultierenden Fläche durchgeführt.

b. Anwendung des Indikators „Keine Ausprägung struktureller Komplikationen (zum Beispiel Störungen, Scheitelgräben, Karststrukturen) im Deckgebirge, aus denen sich subrosive, hydraulische oder mechanische Beeinträchtigungen für den einschlusswirk-samen Gebirgsbereich ergeben könnten“

Im Rahmen von § 13 StandAG kann aufgrund der derzeitigen Datenlage eine erste Abschätzung zum Vorliegen von entsprechenden strukturellen Komplikationen des Deckgebirges erfolgen. Für die Bewertung erfolgte zunächst eine Prüfung äquivalent zu der oben beschriebenen Prüfung bei den Indikatoren „*Überdeckung [...] mit grundwasserhemmenden Gesteinen [...]*“ und „*Verbreitung und Mächtigkeit erosionshemmender Gesteine [...]*“: Liegt die minimale Teufe der Wirtsgesteinsoberfläche innerhalb der ersten 100 m unter Geländeoberkante, wurde das identifizierte Gebiet für diesen Indikator als „ungünstig“ bewertet. Ebenso wurde das identifizierte Gebiet für diesen Indikator mit „ungünstig“ bewertet, wenn die Wirtsgesteinsoberfläche die Quartärbasis schneidet. Hierbei

gilt ebenfalls für Steinsalz ein punktuelles Auftreten ungünstiger Bedingungen und für kristallines Wirtsgestein und Tongestein ein flächiges Auftreten ungünstiger Bedingungen als ausschlaggebend für die Bewertung. Für die identifizierten Gebiete, die durch diese Vorgehensweise nicht mit „ungünstig“ bewertet wurden, erfolgte eine weitere Prüfung auf Grundlage der zur Verfügung gestellten Daten hinsichtlich Störungen, Karststrukturen, Subrosion bzw. Erdfälle. Wurden im Rahmen dieser Prüfung strukturelle Komplikationen innerhalb des identifizierten Gebietes identifiziert, wurde das identifizierte Gebiet für diesen Indikator mit „bedingt günstig“ bewertet. Berücksichtigt wurden dabei die Datensätze zu Störungszonen, die durch die Ausschlusskriterien als relevant eingestuft wurden, sowie weitere Datensätze zu Scheitelstörungen und solche, die zur Datenabfrage der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien zur Verfügung gestellt wurden. Die Datensätze wurden mit Hilfe der Attributtabelle aufbereitet und nicht relevante Informationen wurden entfernt. Diese umfassen u.a. tiefliegende Störungen im Grundgebirge (Zechstein Basis oder Sockelstörungen) sowie Isolinien und Kartenrahmen. Für atektonische Vorgänge (Subrosion, Karst, etc.) wurden die gleichen Datensätze wie bei den Ausschlusskriterien betrachtet, nachdem sie mit Hilfe der Attributtabelle auf Relevanz gefiltert wurden. Liegen keine strukturellen Komplikationen innerhalb eines identifizierten Gebietes vor, folgt eine Bewertung mit „günstig“. Diese Bewertung ist eine erste Einschätzung der geologischen Situation und berücksichtigt nicht eine evtl. unvollständige Datenlage, dies wird in der zusammenfassenden Bewertung des entsprechenden identifizierten Gebietes berücksichtigt. Die Bewertung identifizierter Gebiete im Grabeninneren des Oberrheingrabens nach diesem Indikator ist in Anhang 6 beschrieben. Darüber hinaus wird hier auch die Begründung zur Bewertung erläutert.

5.6.2 Vorgehensweise zur Bewertung der Kriterien

Nach § 24 Abs. 1 StandAG ergibt sich die günstige geologische Gesamtsituation nach einer sicherheitsgerichteten Abwägung der Ergebnisse zu allen Abwägungskriterien. Dies bedeutet, dass zu jedem der elf Kriterien eine Bewertung vorliegen muss, bevor die Abwägung der Bewertungen der Kriterien zu einer zusammenfassenden Bewertung des jeweiligen identifizierten Gebietes erfolgt. Dabei wird ein verbalargumentatives Vorgehen angewendet (siehe BT-Drs. 18/11398, S. 71). Auf Grundlage der verschiedenen Bewertungen zu den Indikatoren wird in einer geowissenschaftlichen Argumentation zu jedem Kriterium eine Bewertung für jedes identifizierte Gebiet ausgearbeitet. Dabei werden auch die den einzelnen Indikatoren innewohnenden Kopplungen mit anderen Indikatoren des gleichen oder eines anderen Kriteriums berücksichtigt. Diese Kopplungen variieren je Kriterium und Wirtsgestein und werden auch durch die vorhandene Datengrundlage zur Bewertung des jeweiligen Indikators und Kriteriums beeinflusst. Grundlage für die Berücksichtigung dieser Kopplungen ist ein Verständnis der Relevanz der einzelnen Indikatoren für die Sicherheit eines Endlagers für wärmeentwickelnde, hochradioaktive Abfälle sowie eine hohe Gebietskenntnis. Der verbalargumentative Diskurs sowie die resultierende Bewertung der Kriterien erfolgen im Bewertungsmodul (siehe BGE 2020ag, 2020ah).

Die Bewertungen zu den Kriterien, welche auf den Referenzdatensätzen (BGE 2020b) basieren, sind Anhang 2 zu entnehmen. Die Vorgehensweise bei den individuellen Bewertungen der Kriterien der identifizierten Gebiete wird im Folgenden erläutert.

5.6.2.1 Anlage 2 (zu § 24 Abs. 3) StandAG

Anlage 2 (zu § 24 Abs. 3) StandAG umfasst das „Kriterium zur Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper“ und wird für die identifizierten Gebiete aller Wirtsgesteine individuell bewertet. Für die Bewertung der identifizierten Gebiete nach dem Kriterium ist die räumliche Konstellation der Indikatoren „Barrierenmächtigkeit“ und „Teufe der oberen Begrenzung des erforderlichen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ zueinander zu beachten. Da sich die für die beiden Indikatoren mit beispielsweise „günstig“ bewerteten Bereiche innerhalb eines identifizierten Gebiets nicht zwingend überschneiden, wurde für jedes identifizierte Gebiet geprüft inwieweit sich die am günstigsten bewerteten Bereiche räumlich überschneiden. Es wird weiterhin überprüft, inwieweit die überschrittene Fläche den einfachen Flächenbedarf (Tabelle 4) erfüllt. Dies wurde bei der Gesamtbewertung des Kriteriums und dementsprechend bei der zusammenfassenden Bewertung jedes identifizierten Gebiets berücksichtigt. Wie in Kapitel 5.6.1.1 dargelegt entfällt die Überprüfung für identifizierte Gebiete in Steinsalz in steiler Lagerung. Die genauen Arbeitsschritte der Überprüfung der Überschneidung für die identifizierten Gebiete der anderen Wirtsgesteine mittels ArcGIS ist Anhang 3 zu entnehmen.

Zum jetzigen Zeitpunkt wird stets davon ausgegangen, dass eine vollständige Umschließung des Einlagerungsbereichs durch einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich prinzipiell vorliegen kann (siehe Kapitel 5.6.1.1). Dementsprechend erfolgte die Bewertung des Indikators „Grad der Umschließung des Einlagerungsbereichs durch einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich“ für alle identifizierten Gebiete eines jeden Wirtsgesteins mit „günstig“. Dieser Indikator ist daher für die Bewertung des Kriteriums nicht ausschlaggebend. Dies gilt ebenfalls für die Bewertung des Indikators „Vorhandensein von Gesteinsschichten mit hydraulischen Eigenschaften und hydraulischem Potenzial, die die Induzierung beziehungsweise Verstärkung der Grundwasserbewegung im einschlusswirksamen Gebirgsbereich ermöglichen können“ für das Wirtsgestein Tongestein.

Diesem Kriterium kommt aufgrund der Datenlage zum jetzigen Zeitpunkt eine besondere Bedeutung zu. Die Parameter der meisten dieser Indikatoren sind einfacher zu ermitteln als beispielsweise spezifische Gesteinseigenschaften: Es liegen Daten für drei der vier (für Tongestein fünf) Indikatoren vor. Daher ist die Konfiguration der sicherheitsrelevanten Gesteinskörper ein früh erkennbares Merkmal einer günstigen geologischen Gesamtsituation und ist insbesondere zum jetzigen Zeitpunkt, zu Beginn des Auswahlverfahrens, von besonderer Bedeutung (BT-Drs. 18/11398). Daher erfolgt die Gesamtbewertung jedes identifizierten Gebiets für dieses Kriterium nach der jeweils schlechtesten Bewertung der Indikatoren „Barrierenmächtigkeit [m]“, „Teufe der oberen Begrenzung des erforderlichen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs [m unter Geländeoberfläche]“

und „flächenhafte Ausdehnung bei gegebener Mächtigkeit (Vielfaches des Mindestflächenbedarfes)“.

5.6.2.2 Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG

Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG umfasst das „Kriterium zur Bewertung der räumlichen Charakterisierbarkeit“. Identifizierte Gebiete der Wirtsgesteine Steinsalz in steiler Lagerung, stratiformes Steinsalz und Tongestein wurden für dieses Kriterium individuell bewertet. Identifizierte Gebiete des kristallinen Wirtsgesteins wurden nach dem Referenzdatensatz (BGE 2020b) bewertet.

Für die Bewertung von identifizierten Gebieten im Tongestein und stratiformen Steinsalz wurden zum jetzigen Zeitpunkt die Indikatoren „Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich“, „Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften“ und „Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)“ aufgrund der Datenlage gemeinsam betrachtet und dementsprechend meistens gleich bewertet (siehe Kapitel 5.6.1.2). Die Bewertung des Indikators „Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit“ erfolgte individuell (siehe Kapitel 5.6.1.2). Die Bewertung der identifizierten Gebiete der Wirtsgesteine stratiformes Steinsalz und Tongestein erfolgte für dieses Kriterium anhand der Bewertung des am schlechtesten bewerteten Indikators.

Für identifizierte Gebiete in Steinsalz in steiler Lagerung ergab sich bei dem Indikator „Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit“ keine Differenzierung in der Bewertung der verschiedenen identifizierten Gebiete (siehe Kapitel 5.6.1.2). Dieser Indikator ist daher für die Bewertung des Kriteriums nicht ausschlaggebend. Die Bewertung des Kriteriums orientiert sich daher an den Bewertungen der identifizierten Gebiete für die Indikatoren „Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich“, „Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften“ und „Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)“. Die identifizierten Gebiete wurden für diese Indikatoren jeweils auf der gleichen Datengrundlage bewertet. Daher ist die Bewertung je identifiziertes Gebiet für alle der drei Indikatoren identisch (siehe Kapitel 5.6.1.2). Die Bewertung der identifizierten Gebiete in Steinsalz in steiler Lagerung erfolgte für dieses Kriterium anhand der schlechtesten Bewertung dieser drei Indikatoren.

5.6.2.3 Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG

Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG umfasst das „Kriterium zur Bewertung der langfristigen Stabilität der günstigen Verhältnisse“. Für dieses Kriterium wurden identifizierte Gebiete in stratiformen Steinsalzformationen und Tongestein individuell bewertet. Identifizierte Gebiete im kristallinen Wirtsgestein sowie Salzformationen in steiler Lagerung wurden nach den Referenzdatensätzen (BGE 2020b) bewertet.

Für die Bewertung von identifizierten Gebieten im Tongestein und stratiformen Steinsalz wurden zum jetzigen Zeitpunkt die Indikatoren „Zeitspanne, über die sich die Mächtigkeit

des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht wesentlich verändert hat“, „Zeitspanne, über die sich die Ausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht wesentlich verändert hat“ und „Zeitspanne, über die sich die Gebirgsdurchlässigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht wesentlich verändert hat“ aufgrund der Datenlage gemeinsam betrachtet und dementsprechend meistens gleich bewertet (siehe Kapitel 5.6.1.3). Alle Indikatoren wurden mit gleichem Maßstab betrachtet, sodass die Bewertung des Kriteriums für identifizierten Gebiete der Wirtsgesteine stratiformes Steinsalz und Tongestein anhand der Bewertung des am schlechtesten bewerteten Indikators erfolgte.

5.6.2.4 Anlage 11 (zu § 24 Abs. 5) StandAG

Anlage 11 (zu § 24 Abs. 5) StandAG umfasst das „Kriterium zur Bewertung des Schutzes des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches durch das Deckgebirge“. Die identifizierten Gebiete aller Wirtsgesteine wurden für dieses Kriterium individuell bewertet.

Das Kriterium umfasst Indikatoren, welche unabhängig voneinander auf den Schutz des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durch das Deckgebirge abzielen. Auch auf Basis der Datenlage ist jeder der Indikatoren „Überdeckung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs mit grundwasserhemmenden Gesteinen, Verbreitung und Mächtigkeit grundwasserhemmender Gesteine im Deckgebirge“, „Verbreitung und Mächtigkeit erosionshemmender Gesteine im Deckgebirge des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ und „keine Ausprägung struktureller Komplikationen im Deckgebirge, aus denen sich subrosive, hydraulische oder mechanische Beeinträchtigungen für den einschlusswirksamen Gebirgsbereich ergeben könnten“ gleich zu betrachten und zu gewichten. Dementsprechend wurden alle Indikatoren mit gleichem Maßstab betrachtet, sodass im Ergebnis der am schlechtesten bewertete Indikator maßgebend für die Bewertung des Kriteriums war.

5.6.3 Vorgehensweise bei der zusammenfassenden Bewertung

Finales Resultat der Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien ist es, auf Basis einer geowissenschaftlichen Diskussion eine Reihe von Teilgebieten zu ermitteln, welche günstige geologische Voraussetzungen erwarten lassen.

Die sicherheitsgerichtete Abwägung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien ergibt eine Charakterisierung der geologischen Gesamtsituation eines jeden identifizierten Gebietes im Hinblick auf die Eignung als Endlagerstandort. Hierfür wird eine zusammenfassende Bewertung für jedes identifizierte Gebiet, auf Grundlage der jeweiligen Bewertungen nach den Indikatoren und Kriterien, erstellt. Dieser Arbeitsschritt erfolgte verbalargumentativ und wurde durch die Fachexpert/-innen im Bewertungsmodul erarbeitet (BGE 2020ag, 2020ah). Durch die verbalargumentative Bearbeitung erfolgt die zusammenfassende Bewertung nicht ausschließlich auf Basis des Kriteriums mit der schlechtesten Bewertung. Die zusammenfassende Bewertung kann beispielsweise mit „günstig“ erfolgen, auch wenn ein Kriterium mit „bedingt günstig“ bewertet wurde. In den identifizierten Gebieten, die eine zusammenfassende Bewertung mit „günstig“ erhalten, liegt

jeweils eine günstige geologische Gesamtsituation vor. Diese identifizierten Gebiete werden somit als Teilgebiete ermittelt.

5.7 Qualitätssicherung

Die Qualitätssicherung der Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien erfolgte über mehrere Stufen. Zunächst wurden die Arbeiten nach dem Mehraugen Prinzip durch mehrere BGE Mitarbeiter/-innen kontrolliert, wobei auch die jeweiligen Fachexperten/-innen des Bereichs für die jeweiligen Wirtsgesteine hinzugezogen wurden. Die nächste Stufe der Qualitätssicherung erfolgte bereichsübergreifend. Experten der BGE und außerhalb des Bereichs Standortauswahl prüften sowohl die Entwicklung der Methoden, Zwischenergebnisse wie auch Ergebnisse.

Neben einer formalen Qualitätssicherung der Berichte erfolgte darüber hinaus eine externe fachliche Qualitätssicherung, die für die Kapitel 1 bis 5 des vorliegenden Berichts durchgeführt wurde. Diese Qualitätssicherung umfasste eine Prüfung des Berichtes nach den Kriterien „Vollständigkeit“, „Objektivität“, „Überprüfbarkeit“ und „sachorientierter Sprachstil“. Ebenso wurde der Inhalt auf das Folgen eines Roten Fadens geprüft, wie auch die Methodenauswahl und Methodenanwendung. Darüber hinaus erfolgte eine Prüfung über die klare Definition einer Problemstellung und Zielsetzung und darüber, ob die dargestellten Inhalte dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik entsprechen und eine angemessene Themendurchdringung vorliegt. Zuletzt wurden sowohl die Zitierfähigkeit als auch die Zitierwürdigkeit aller Quellen überprüft. Die Anmerkungen dieses externen Reviews wurden in den Bericht mit aufgenommen. Alle Ergebnisse, die nicht in eine externe Prüfung gegeben wurden, wurden innerhalb verschiedener Workshops mit vielen BGE Fachexperten/-innen sowie auch der BGE Geschäftsführung geprüft.

6 Darstellung der Ergebnisse

Für die graphische Darstellung einer Bewertung werden Indikatoren und Kriterien basierend auf ihrer Bewertung mit unterschiedlichen Farben charakterisiert. Eine „günstige“ Bewertung eines Indikators oder eines Kriteriums wird mit grün symbolisiert, während eine „bedingt günstige“ Bewertung gelb und eine „weniger günstige“ oder „ungünstige“ Bewertung mit rot dargestellt wird. Eine „nicht günstige“ Bewertung ist mit grau hinterlegt und eine Bewertung, die nicht anwendbar war, weil ein bestimmter Indikator beispielsweise wirtsgesteinsspezifisch ist, wurde als helles blau dargestellt. Diese Form der Darstellung wird auch für die Ergebnisse aus den Referenzdatensätzen verwendet.

Die Bewertungen und Begründungen sind je nach Anwendung in verschiedenen Dokumenten oder an unterschiedlichen Stellen innerhalb des Fachberichtes verortet. Die folgende Tabelle 6 gibt eine Übersicht darüber, wo welche Ergebnisse, bzw. Bewertungen und Begründungen zu finden sind. Bewertungen für die identifizierten Gebiete aller Wirtsgesteine nach allen Kriterien und Indikatoren sind in den Anlagen 1A und 1B (BGE 2020ag, 2020ah) dargestellt. Zusätzliche Verortungen der Bewertungen sind Tabelle 6 zu entnehmen. Nachweise zu allen verwendeten Literaturreferenzen sind entsprechend

in den Anlagen 2A und 2B (BGE 2020ai, 2020aj) zu finden. Im Datenbericht, insbesondere in dessen Anlagen 46A und 46B (BGE 2020ak, 2020al), ist spezifiziert nach Gebiet, Kriterium und Indikator aufgelistet, welche Daten in die Bewertungen eingeflossen sind.

Tabelle 6: *Überblick über die Verortung der Ergebnisse, die aus der Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien hervorgehen, zu jedem Kriterium nach den Anlagen 1 bis 10 (zu §24 Abs. 3 bis 5) StandAG.
 Die Bewertungen und Begründungen für alle Wirtsgesteine sind ebenfalls in den Anlagen 1A und 1B (BGE 2020ag, 2020ah) zu finden.*

Kriterium	Tongestein	Kristallines Wirtsgestein	Stratiforme Steinsalzformationen	Steinsalzformationen in steiler Lagerung
Kriterium 1, 5 bis 10: Bewertung	Zusätzlich im Fachbericht Kapitel 6.1, Anhang 1 und Anhang 2	Zusätzlich im Fachbericht Kapitel 6.1, Anhang 1 und Anhang 2	Zusätzlich im Fachbericht Kapitel 6.1, Anhang 1 und Anhang 2	Zusätzlich im Fachbericht Kapitel 6.1, Anhang 1 und Anhang 2
Kriterium 1, 5 bis 10: Begründung	Referenzdatensätze (BGE 2020b)	Referenzdatensätze (BGE 2020b)	Referenzdatensätze (BGE 2020b)	Referenzdatensätze (BGE 2020b)
Kriterium 2: Bewertung und Begründung	Anlagen der geoWK Steckbriefe (BGE 2020ag, 2020ah)	Anlagen der geoWK Steckbriefe (BGE 2020ag, 2020ah)	Anlagen der geoWK Steckbriefe (BGE 2020ag, 2020ah)	Anlagen der geoWK Steckbriefe (BGE 2020ag, 2020ah)
Kriterium 3: Bewertung	Anlagen der geoWK Steckbriefe (BGE 2020ag, 2020ah)	Zusätzlich im Fachbericht Kapitel 6.1, Anhang 1 und Anhang 2	Anlagen der geoWK Steckbriefe (BGE 2020ag, 2020ah)	Anlagen der geoWK Steckbriefe (BGE 2020ag, 2020ah)
Kriterium 3: Begründung	Anlagen der geoWK Steckbriefe (BGE 2020ag, 2020ah), Anhang 6 und Anhang 4	Referenzdatensätze (BGE 2020b)	Anlagen der geoWK Steckbriefe (BGE 2020ag, 2020ah), Anhang 6 und Anhang 5	Anlagen der geoWK Steckbriefe (BGE 2020ag, 2020ah) und Arbeitshilfe (BGE 2020a)
Kriterium 4: Bewertung	Anlagen der geoWK Steckbriefe (BGE 2020ag, 2020ah)	Zusätzlich im Fachbericht Kapitel 6.1, Anhang 1 und Anhang 2	Anlagen der geoWK Steckbriefe (BGE 2020ag, 2020ah)	Zusätzlich im Fachbericht Kapitel 6.1, Anhang 1 und Anhang 2

Kriterium	Tongestein	Kristallines Wirtsgestein	Stratiforme Steinsalz- formationen	Steinsalz- formationen in steiler Lagerung
Kriterium 4: Begründung	Anlagen der geoWK Steckbriefe (BGE 2020ag, 2020ah), Anhang 6 und Anhang 4	Referenz- datensätze (BGE 2020b)	Anlagen der geoWK Steckbriefe (BGE 2020ag, 2020ah), Anhang 6 und Anhang 5	Referenz- datensätze (BGE 2020b)
Kriterium 11: Bewertung	Anlagen der geoWK Steckbriefe (BGE 2020ag, 2020ah)	Anlagen der geoWK Steckbriefe (BGE 2020ag, 2020ah)	Anlagen der geoWK Steckbriefe (BGE 2020ag, 2020ah)	Anlagen der geoWK Steckbriefe (BGE 2020ag, 2020ah)
Kriterium 11: Begründung	Anlagen der geoWK Steckbriefe (BGE 2020ag, 2020ah), Anhang 6 und Kapitel 5.6.1.4, Anhang 4	Anlagen der geoWK Steckbriefe (BGE 2020ag, 2020ah) und Kapitel 5.6.1.4	Anlagen der geoWK Steckbriefe (BGE 2020ag, 2020ah), Anhang 6 und Kapitel 5.6.1.4	Anlagen der geoWK Steckbriefe (BGE 2020ag, 2020ah) und Kapitel 5.6.1.4

6.1 Ergebnisse aus den Referenzdatensätzen

In den folgenden Unterkapiteln werden die Bewertungen zu den verschiedenen Wirtsgesteinen, die aus den Referenzdatensätzen hervorgehen, präsentiert und in Tabellen dargestellt.

Die zugehörigen ausführlichen Begründungen zu jeder Bewertung sind in der Unterlage „Referenzdatensätzen zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien im Rahmen von § 13 StandAG – Grundlagen“ (BGE 2020b) zu finden.

6.1.1 Ergebnisse aus dem Referenzdatensatz für Tongestein

Tabelle 7 stellt die Bewertungen der identifizierten Gebiete des Wirtsgesteins Tongestein für die Indikatoren und Kriterien der Anlage 1 sowie 5 bis 10 (zu § 24 Abs. 3 bis 5) StandAG dar, welche auf den Referenzdatensätzen basieren. Ausführlichere Beschreibungen zu jeder Bewertung für identifizierte Gebiete in Tongestein sind in Anhang 1.1 und Anhang 2.1 zu finden. Die entsprechenden Begründungen zu jeder Bewertung befinden sich in den Referenzdatensätzen (BGE 2020b). Nach dem Referenzdatensatz

Tongestein erhalten identifizierte Gebiete des Wirtsgesteins Tongestein für sechs Kriterien eine Bewertung mit „günstig“ und für ein Kriterium eine Bewertung mit „nicht günstig“.

Tabelle 7: Übersicht der Bewertung der Kriterien (Anlagen nach § 24 Abs. 3 bis 5 StandAG) und der zugehörigen Indikatoren nach Referenzdatensatz für das Wirtsgestein Tongestein

Kriterium	Indikator des Kriteriums	Bewertung nach Referenzdatensatz
1	Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit des Gesteinstyps [m/s]	günstig
	Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers [mm/a]	günstig
	Charakteristischer effektiver Diffusionskoeffizient des Gesteinstyps für tritiiertes Wasser (HTO) bei 25 °C [m ² /s]	günstig
	Absolute Porosität	günstig
	Verfestigungsgrad	günstig
	Gesamtbewertung Kriterium 1	günstig
5	Das Gebirge kann als geomechanisches Haupttragelement die Beanspruchung aus Auffahrung und Betrieb ohne planmäßigen tragenden Ausbau, abgesehen von einer Kontursicherung, bei verträglichen Deformationen aufnehmen.	nicht in Wertungsgruppe günstig
	Um Endlagerhohlräume sind keine mechanisch bedingten Sekundärpermeabilitäten außerhalb einer unvermeidbaren konturnah entfestigten Auflockerungszone zu erwarten.	günstig
	Gesamtbewertung Kriterium 5	nicht in Wertungsgruppe günstig
6	Verhältnis repräsentative Gebirgsdurchlässigkeit/repräsentative Gesteinsdurchlässigkeit	günstig
	Erfahrungen über die Barrierewirksamkeit der Gebirgsformationen in folgenden Erfahrungsbereichen	günstig
	Rückbildung der Sekundärpermeabilität durch Riss-schließung	günstig
	Rückbildung der mechanischen Eigenschaften durch Rissverheilung	günstig
	Gesamtbewertung Kriterium 6	günstig
7	Wasserangebot im Einlagerungsbereich	günstig

Kriterium	Indikator des Kriteriums	Bewertung nach Referenzdatensatz
	Gesamtbewertung Kriterium 7	günstig
8	Neigung zur Bildung wärmeinduzierter Sekundärpermeabilitäten und ihrer Ausdehnung	günstig
	Temperaturstabilität hinsichtlich Mineralumwandlungen	günstig
	Gesamtbewertung Kriterium 8	günstig
9	Kd-Wert für folgende Radionuklide $\geq 0,001 \text{ m}^3/\text{kg}$	günstig
	Gehalt an Mineralphasen mit großer reaktiver Oberfläche	günstig
	Ionenstärke des Grundwassers	günstig
	Öffnungsweite der Gesteinsporen	günstig
	Gesamtbewertung Kriterium 9	günstig
10	chemisches Gleichgewicht zwischen dem Wirtsgestein im Bereich des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und dem darin enthaltenen tiefen Grundwasser	günstig
	neutrale bis leicht alkalische Bedingungen (pH-Wert 7 bis 8) im Bereich des Tiefenwassers	günstig
	anoxisch-reduzierendes Milieu im Bereich des Tiefenwassers	günstig
	möglichst geringer Gehalt an Kolloiden und Komplexbildnern im Tiefenwasser	günstig
	geringe Karbonatkonzentration im Tiefenwasser	günstig
	Gesamtbewertung Kriterium 10	günstig

6.1.2 Ergebnisse aus dem Referenzdatensatz für kristallines Wirtsgestein

Tabelle 8 stellt die Bewertungen der identifizierten Gebiete für kristallines Wirtsgestein für die Indikatoren und Kriterien der Anlage 1 sowie 3 bis 10 (zu § 24 Abs. 3 bis 5) StandAG dar, welche auf den Referenzdatensätzen basieren. Ausführlichere Beschreibungen zu jeder Bewertung für identifizierte Gebiete in kristallinem Wirtsgestein sind in Anhang 1.2 und Anhang 2.2 zu finden. Die entsprechenden Begründungen zu jeder Bewertung befinden sich in den Referenzdatensätzen (BGE 2020b). Nach dem Referenzdatensatz Kristallin erhalten identifizierte Gebiete des Wirtsgesteins Kristallin für sieben Kriterien eine Bewertung mit „günstig“ und für jeweils ein Kriterium eine Bewertung mit „bedingt günstig“ und „nicht günstig“.

Tabelle 8: Übersicht der Bewertung der Kriterien (Anlagen nach § 24 Abs. 3 bis 5 StandAG) und der zugehörigen Indikatoren nach Referenzdatensatz für kristallines Wirtsgestein

Kriterium	Indikator des Kriteriums	Bewertung nach Referenzdatensatz
1	Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit des Gesteinstyps [m/s]	günstig
	Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers [mm/a]	günstig
	Charakteristischer effektiver Diffusionskoeffizient des Gesteinstyps für tritiiertes Wasser (HTO) bei 25 °C [m ² /s]	günstig
	Gesamtbewertung Kriterium 1	günstig
3	Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich	günstig
	Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften	günstig
	Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit	günstig
	Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)	günstig
	Gesamtbewertung Kriterium 3	günstig
4	Zeitspanne über die sich die Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht wesentlich verändert hat	günstig
	Zeitspanne über die sich die Ausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht wesentlich verändert hat	günstig
	Zeitspanne über die sich die Gebirgsdurchlässigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht wesentlich verändert hat	günstig
	Gesamtbewertung Kriterium 4	günstig
5	Das Gebirge kann als geomechanisches Haupttragelement die Beanspruchung aus Auffahrung und Betrieb ohne planmäßigen tragenden Ausbau, abgesehen von einer Kontursicherung, bei verträglichen Deformationen aufnehmen.	günstig
	Um Endlagerhohlräume sind keine mechanisch bedingten Sekundärpermeabilitäten außerhalb einer unvermeidbaren konturnah entfestigten Auflockerungszone zu erwarten.	günstig

Kriterium	Indikator des Kriteriums	Bewertung nach Referenzdatensatz
	Gesamtbewertung Kriterium 5	günstig
6	Verhältnis repräsentative Gebirgsdurchlässigkeit/repräsentative Gesteinsdurchlässigkeit	günstig
	Erfahrungen über die Barrierewirksamkeit der Gebirgsformationen in folgenden Erfahrungsbereichen	günstig
	Rückbildung der Sekundärpermeabilität durch Riss-schließung	weniger günstig
	Rückbildung der mechanischen Eigenschaften durch Rissverheilung	weniger günstig
	Gesamtbewertung Kriterium 6	bedingt günstig
7	Wasserangebot im Einlagerungsbereich	günstig
	Gesamtbewertung Kriterium 7	günstig
8	Neigung zur Bildung wärmeinduzierter Sekundärpermeabilitäten und ihrer Ausdehnung	günstig
	Temperaturstabilität hinsichtlich Mineralumwandlungen	günstig
	Gesamtbewertung Kriterium 8	günstig
9	Kd-Wert für folgende Radionuklide $\geq 0,001 \text{ m}^3/\text{kg}$	bedingt günstig
	Gehalt an Mineralphasen mit großer reaktiver Oberfläche	nicht günstig
	Ionenstärke des Grundwassers	günstig
	Öffnungsweite der Gesteinsporen	günstig
	Gesamtbewertung Kriterium 9	nicht günstig
10	chemisches Gleichgewicht zwischen dem Wirtsgestein im Bereich des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und dem darin enthaltenen tiefen Grundwasser	nicht günstig
	neutrale bis leicht alkalische Bedingungen (pH-Wert 7 bis 8) im Bereich des Tiefenwassers	günstig
	anoxisch-reduzierendes Milieu im Bereich des Tiefenwassers	günstig
	möglichst geringer Gehalt an Kolloiden und Komplexbildnern im Tiefenwasser	günstig
	geringe Karbonatkonzentration im Tiefenwasser	günstig
	Gesamtbewertung Kriterium 10	günstig

6.1.3 Ergebnisse aus dem Referenzdatensatz für Steinsalz

Tabelle 9 stellt die Bewertungen der identifizierten Gebiete des Wirtsgesteins Steinsalz für die Indikatoren und Kriterien der Anlage 1 sowie 4 bis 10 (zu § 24 Abs. 3 bis 5) StandAG dar, welche auf den Referenzdatensätzen basieren. Diese Bewertungen gelten sowohl für Steinsalz in steiler Lagerung als auch für stratiformes Steinsalz. Eine Ausnahme bildet Kriterium 4: Hier wird Steinsalz in steiler Lagerung nach Referenzdatensatz bewertet (Tabelle 9). Stratiformes Steinsalz wird für Kriterium 4 gebietspezifisch bewertet, hier gilt nicht der Referenzdatensatz.

Ausführlichere Beschreibungen zu jeder Bewertung für identifizierte Gebiete in Steinsalz sind in Anhang 1.3 und Anhang 2.3 zu finden. Die entsprechenden Begründungen zu jeder Bewertung befinden sich in den Referenzdatensätzen (BGE 2020b). Nach dem Referenzdatensatz Steinsalz erhalten identifizierte Gebiete des Wirtsgesteins Steinsalz in steiler Lagerung für sechs Kriterien eine Bewertung mit „günstig“ und für zwei Kriterien eine Bewertung mit „nicht günstig“. Identifizierte Gebiete im stratiformen Steinsalz erhalten nach dem Referenzdatensatz für fünf Kriterien eine Bewertung mit „günstig“ und für zwei Kriterien eine Bewertung mit „nicht günstig“.

Tabelle 9: Übersicht der Bewertung der Kriterien (Anlagen nach § 24 Abs. 3 bis 5 StandAG) und der zugehörigen Indikatoren nach Referenzdatensatz für das Wirtsgestein Steinsalz

Kriterium	Indikator des Kriteriums	Bewertung nach Referenzdatensatz
1	Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit des Gesteinstyps [m/s]	günstig
	Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers [mm/a]	günstig
	Charakteristischer effektiver Diffusionskoeffizient des Gesteinstyps für tritiiertes Wasser (HTO) bei 25 °C [m ² /s]	günstig
	Gesamtbewertung Kriterium 1	günstig
4	Zeitspanne über die sich die Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht wesentlich verändert hat	günstig
	Zeitspanne über die sich die Ausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht wesentlich verändert hat	günstig
	Zeitspanne über die sich die Gebirgsdurchlässigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht wesentlich verändert hat	günstig
	Gesamtbewertung Kriterium 4	günstig
5	Das Gebirge kann als geomechanisches Haupttragelement die Beanspruchung aus Auffahrung und Betrieb ohne planmäßigen tragenden Ausbau, abgesehen von einer Kontursicherung, bei verträglichen Deformationen aufnehmen.	günstig
	Um Endlagerhohlräume sind keine mechanisch bedingten Sekundärpermeabilitäten außerhalb einer unvermeidbaren konturnah entfestigten Auflockerungszone zu erwarten.	günstig
	Gesamtbewertung Kriterium 5	günstig
6	Verhältnis repräsentative Gebirgsdurchlässigkeit/repräsentative Gesteinsdurchlässigkeit	günstig
	Erfahrungen über die Barrierewirksamkeit der Gebirgsformationen in folgenden Erfahrungsbereichen: – rezente Existenz als wasserlösliches Gestein – fossile Fluideinschlüsse – unterlagernde wasserlösliche Gesteine	günstig

Kriterium	Indikator des Kriteriums	Bewertung nach Referenzdatensatz
	– unterlagernde Vorkommen flüssiger oder gasförmiger Kohlenwasserstoffe	
	– Heranziehung als hydrogeologische Schutzschicht bei Gewinnungsbergwerken	
	– Aufrechterhaltung der Abdichtungsfunktion auch bei dynamischer Beanspruchung	
	– Nutzung von Hohlräumen zur behälterlosen Speicherung von gasförmigen und flüssigen Medien	
	Rückbildung der Sekundärpermeabilität durch Riss-schließung	
	Rückbildung der mechanischen Eigenschaften durch Rissverheilung	günstig
	Zusammenfassende Beurteilung der Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten aufgrund der Bewertung der einzelnen Indikatoren	günstig
	Gesamtbewertung Kriterium 6	günstig
7	Wasserangebot im Einlagerungsbereich	günstig
	Gesamtbewertung Kriterium 7	günstig
8	Neigung zur Bildung wärmeinduzierter Sekundärpermeabilitäten und ihrer Ausdehnung	günstig
	Temperaturstabilität hinsichtlich Mineralumwandlungen	günstig
	Gesamtbewertung Kriterium 8	günstig
9	Kd-Wert für folgende Radionuklide $\geq 0,001 \text{ m}^3/\text{kg}$	weniger günstig
	Gehalt an Mineralphasen mit großer reaktiver Oberfläche	nicht günstig
	Ionenstärke des Grundwassers	günstig
	Öffnungsweite der Gesteinsporen	günstig
	Gesamtbewertung Kriterium 9	nicht günstig
10	Chemisches Gleichgewicht zwischen dem Wirtsgestein im Bereich des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und dem darin enthaltenen tiefen Grundwasser	günstig
	Neutrale bis leicht alkalische Bedingungen (pH-Wert 7 bis 8) im Bereich des Tiefenwassers	nicht günstig
	Anoxisch-reduzierendes Milieu im Bereich des Tiefenwassers	günstig

Kriterium	Indikator des Kriteriums	Bewertung nach Referenzdatensatz
	Möglichst geringer Gehalt an Kolloiden und Komplexbildnern im Tiefenwasser	günstig
	Geringe Karbonatkonzentration im Tiefenwasser	günstig
	Gesamtbewertung Kriterium 10	nicht günstig

6.2 Ergebnisse der Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien nach § 24 StandAG

Die Ergebnisse des Bewertungsprozesses werden in Berichtsform („geoWK Steckbriefe“) aus dem Bewertungsmodul ausgegeben. Dies bietet den Vorteil einer einheitlichen Darstellung für alle identifizierten Gebiete. Diese Berichte sind in den Anlagen 1A und 1B (BGE 2020ag, 2020ah) zu finden. Anlage 1A stellt die Steckbriefe für alle Teilgebiete dar, wobei Anlage 1B alle Steckbriefe der identifizierten Gebiete umfasst, welche nicht als Teilgebiete ermittelt wurden.

Diese Steckbriefe beinhalten für jedes Teilgebiet bzw. identifizierte Gebiet die Ergebnisse aus der Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien. Für jedes Teilgebiet bzw. identifizierte Gebiet ist hier die Bewertung nach jedem Indikator, jedem Kriterium und die zusammenfassende Bewertung dargestellt. In den Steckbriefen wird jede Bewertung durch eine Begründung erläutert. Bei den Bewertungen, die auf den Referenzdatensätzen (BGE 2020b) beruhen, wird für die Begründung auf die Referenzdatensätze (BGE 2020b) und den vorliegenden Fachbericht verwiesen. Darüber hinaus sind in den Steckbriefen die Literaturverweise der zusammenfassenden Bewertungen aufgeführt. Alle anderen Literaturverweise sind den Anlagen 2A und 2B (BGE 2020ai, 2020aj) zu entnehmen.

In Tabelle 10 sind alle Teilgebiete, welche durch die Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien resultieren, mit dem entsprechenden Wirtsgestein aufgelistet. Ebenfalls sind die Teilgebiete je Wirtsgestein als Kartendarstellung in Abbildung 10 bis Abbildung 12 visualisiert. Insgesamt resultieren 90 Teilgebiete. Davon befinden sich neun Teilgebiete in Tongestein, sieben Teilgebiete in kristallinem Wirtsgestein, 14 Teilgebiete in stratiformem Steinsalz und 60 Teilgebiete in Steinsalz in steiler Lagerung.

Tabelle 10: Tabellarische Übersicht aller Teilgebiete mit Nummern der Teilgebiete (TG-Nummern), Nummern der Identifizierte Gebiete (IG-Nummern) und Wirtsgestein des entsprechenden Teilgebiets

TG-Nummer	IG-Nummer	Wirtsgestein
001_00TG_032_01IG_T_f_jmOPT	032_01IG_T_f_jmOPT	Tongestein
002_00TG_044_00IG_T_f_tUMa	044_00IG_T_f_tUMa	Tongestein
003_00TG_046_00IG_T_f_tUMj	046_00IG_T_f_tUMj	Tongestein
004_00TG_053_00IG_T_f_tpg	053_00IG_T_f_tpg	Tongestein

TG-Nummer	IG-Nummer	Wirtsgestein
005_00TG_055_00IG_T_f_jm	055_00IG_T_f_jm	Tongestein
006_00TG_188_00IG_T_f_ju	188_00IG_T_f_ju	Tongestein
007_00TG_202_02IG_T_f_kru	202_02IG_T_f_kru	Tongestein
008_01TG_204_01IG_T_f_kro	204_01IG_T_f_kro	Tongestein
008_02TG_204_02IG_T_f_kro	204_02IG_T_f_kro	Tongestein
009_00TG_194_00IG_K_g_SO	194_00IG_K_g_SO	Kristallines Wirtsgestein
010_00TG_193_00IG_K_g_MKZ	193_00IG_K_g_MKZ	Kristallines Wirtsgestein
011_00TG_200_00IG_K_g_SPZ	200_00IG_K_g_SPZ	Kristallines Wirtsgestein
012_01TG_198_01IG_K_g_RHE	198_01IG_K_g_RHE	Kristallines Wirtsgestein
012_02TG_198_02IG_K_i_RHE	198_02IG_K_i_RHE	Kristallines Wirtsgestein
013_00TG_195_00IG_K_g_MO	195_00IG_K_g_MO	Kristallines Wirtsgestein
014_00TG_199_00IG_K_g_NPZ	199_00IG_K_g_NPZ	Kristallines Wirtsgestein
015_00TG_001_00IG_S_s_z	001_00IG_S_s_z	Steinsalz in steiler Lagerung
016_00TG_002_00IG_S_s_z	002_00IG_S_s_z	Steinsalz in steiler Lagerung
017_00TG_003_00IG_S_s_z	003_00IG_S_s_z	Steinsalz in steiler Lagerung
018_00TG_006_00IG_S_s_z	006_00IG_S_s_z	Steinsalz in steiler Lagerung
019_00TG_010_00IG_S_s_z	010_00IG_S_s_z	Steinsalz in steiler Lagerung
020_00TG_012_00IG_S_s_z	012_00IG_S_s_z	Steinsalz in steiler Lagerung
021_00TG_017_00IG_S_s_z	017_00IG_S_s_z	Steinsalz in steiler Lagerung
022_00TG_019_00IG_S_s_z	019_00IG_S_s_z	Steinsalz in steiler Lagerung
023_00TG_028_00IG_S_s_z	028_00IG_S_s_z	Steinsalz in steiler Lagerung
024_00TG_029_00IG_S_s_z	029_00IG_S_s_z	Steinsalz in steiler Lagerung
025_00TG_030_00IG_S_s_z	030_00IG_S_s_z	Steinsalz in steiler Lagerung
026_00TG_035_00IG_S_s_z	035_00IG_S_s_z	Steinsalz in steiler Lagerung
027_00TG_037_00IG_S_s_z	037_00IG_S_s_z	Steinsalz in steiler Lagerung
028_00TG_040_00IG_S_s_z	040_00IG_S_s_z	Steinsalz in steiler Lagerung
029_00TG_043_00IG_S_s_z	043_00IG_S_s_z	Steinsalz in steiler Lagerung
030_00TG_048_00IG_S_s_z	048_00IG_S_s_z	Steinsalz in steiler Lagerung
031_00TG_050_00IG_S_s_z	050_00IG_S_s_z	Steinsalz in steiler Lagerung
032_00TG_051_00IG_S_s_z	051_00IG_S_s_z	Steinsalz in steiler Lagerung
033_00TG_052_00IG_S_s_z	052_00IG_S_s_z	Steinsalz in steiler Lagerung

TG-Nummer	IG-Nummer	Wirtsgestein
034_00TG_054_00IG_S_s_z	054_00IG_S_s_z	Steinsalz in steiler Lagerung
035_00TG_057_00IG_S_s_z	057_00IG_S_s_z	Steinsalz in steiler Lagerung
036_00TG_058_00IG_S_s_z	058_00IG_S_s_z	Steinsalz in steiler Lagerung
037_00TG_061_00IG_S_s_z	061_00IG_S_s_z	Steinsalz in steiler Lagerung
038_00TG_063_00IG_S_s_z	063_00IG_S_s_z	Steinsalz in steiler Lagerung
039_00TG_064_00IG_S_s_z	064_00IG_S_s_z	Steinsalz in steiler Lagerung
040_00TG_067_00IG_S_s_z	067_00IG_S_s_z	Steinsalz in steiler Lagerung
041_00TG_068_00IG_S_s_z	068_00IG_S_s_z	Steinsalz in steiler Lagerung
042_00TG_071_00IG_S_s_z	071_00IG_S_s_z	Steinsalz in steiler Lagerung
043_00TG_075_00IG_S_s_z	075_00IG_S_s_z	Steinsalz in steiler Lagerung
044_00TG_082_00IG_S_s_z	082_00IG_S_s_z	Steinsalz in steiler Lagerung
045_00TG_086_00IG_S_s_z	086_00IG_S_s_z	Steinsalz in steiler Lagerung
046_00TG_090_00IG_S_s_z	090_00IG_S_s_z	Steinsalz in steiler Lagerung
047_00TG_096_00IG_S_s_z	096_00IG_S_s_z	Steinsalz in steiler Lagerung
048_00TG_097_00IG_S_s_z	097_00IG_S_s_z	Steinsalz in steiler Lagerung
049_00TG_106_00IG_S_s_z	106_00IG_S_s_z	Steinsalz in steiler Lagerung
050_00TG_107_00IG_S_s_z	107_00IG_S_s_z	Steinsalz in steiler Lagerung
051_00TG_109_00IG_S_s_z	109_00IG_S_s_z	Steinsalz in steiler Lagerung
052_00TG_119_00IG_S_s_z	119_00IG_S_s_z	Steinsalz in steiler Lagerung
053_00TG_122_00IG_S_s_z	122_00IG_S_s_z	Steinsalz in steiler Lagerung
054_00TG_124_00IG_S_s_z	124_00IG_S_s_z	Steinsalz in steiler Lagerung
055_00TG_130_00IG_S_s_z	130_00IG_S_s_z	Steinsalz in steiler Lagerung
056_00TG_132_00IG_S_s_z	132_00IG_S_s_z	Steinsalz in steiler Lagerung
057_00TG_133_00IG_S_s_z	133_00IG_S_s_z	Steinsalz in steiler Lagerung
058_00TG_136_00IG_S_s_z	136_00IG_S_s_z	Steinsalz in steiler Lagerung
059_00TG_137_00IG_S_s_z	137_00IG_S_s_z	Steinsalz in steiler Lagerung
060_00TG_144_00IG_S_s_z	144_00IG_S_s_z	Steinsalz in steiler Lagerung
061_00TG_145_00IG_S_s_z	145_00IG_S_s_z	Steinsalz in steiler Lagerung
062_00TG_146_00IG_S_s_z	146_00IG_S_s_z	Steinsalz in steiler Lagerung
063_00TG_149_00IG_S_s_z-ro	149_00IG_S_s_z-ro	Steinsalz in steiler Lagerung
064_00TG_151_00IG_S_s_z-ro	151_00IG_S_s_z-ro	Steinsalz in steiler Lagerung

TG-Nummer	IG-Nummer	Wirtsgestein
065_00TG_153_00IG_S_s_z-ro	153_00IG_S_s_z-ro	Steinsalz in steiler Lagerung
066_00TG_154_00IG_S_s_z-ro	154_00IG_S_s_z-ro	Steinsalz in steiler Lagerung
067_00TG_159_00IG_S_s_z-ro	159_00IG_S_s_z-ro	Steinsalz in steiler Lagerung
068_00TG_163_00IG_S_s_z-ro	163_00IG_S_s_z-ro	Steinsalz in steiler Lagerung
069_00TG_168_00IG_S_s_z-ro	168_00IG_S_s_z-ro	Steinsalz in steiler Lagerung
070_00TG_172_00IG_S_s_z-ro	172_00IG_S_s_z-ro	Steinsalz in steiler Lagerung
071_00TG_179_00IG_S_s_z-ro	179_00IG_S_s_z-ro	Steinsalz in steiler Lagerung
072_00TG_181_00IG_S_s_z-ro	181_00IG_S_s_z-ro	Steinsalz in steiler Lagerung
073_00TG_183_00IG_S_s_z	183_00IG_S_s_z	Steinsalz in steiler Lagerung
074_00TG_185_00IG_S_s_z-ro	185_00IG_S_s_z-ro	Steinsalz in steiler Lagerung
075_01TG_189_01IG_S_f_km	189_01IG_S_f_km	Stratiformes Steinsalz
075_02TG_189_03IG_S_f_km	189_03IG_S_f_km	Stratiformes Steinsalz
076_01TG_191_01IG_S_f_so	191_01IG_S_f_so	Stratiformes Steinsalz
076_02TG_191_02IG_S_f_so	191_02IG_S_f_so	Stratiformes Steinsalz
076_03TG_191_05IG_S_f_so	191_05IG_S_f_so	Stratiformes Steinsalz
077_00TG_192_00IG_S_f_jo	192_00IG_S_f_jo	Stratiformes Steinsalz
078_01TG_197_01IG_S_f_z	197_01IG_S_f_z	Stratiformes Steinsalz
078_02TG_197_02IG_S_f_z	197_02IG_S_f_z	Stratiformes Steinsalz
078_03TG_197_03IG_S_f_z	197_03IG_S_f_z	Stratiformes Steinsalz
078_04TG_197_04IG_S_f_z	197_04IG_S_f_z	Stratiformes Steinsalz
078_05TG_197_05IG_S_f_z	197_05IG_S_f_z	Stratiformes Steinsalz
078_06TG_197_06IG_S_f_z	197_06IG_S_f_z	Stratiformes Steinsalz
078_07TG_197_07IG_S_f_z	197_07IG_S_f_z	Stratiformes Steinsalz
078_08TG_197_08IG_S_f_z	197_08IG_S_f_z	Stratiformes Steinsalz

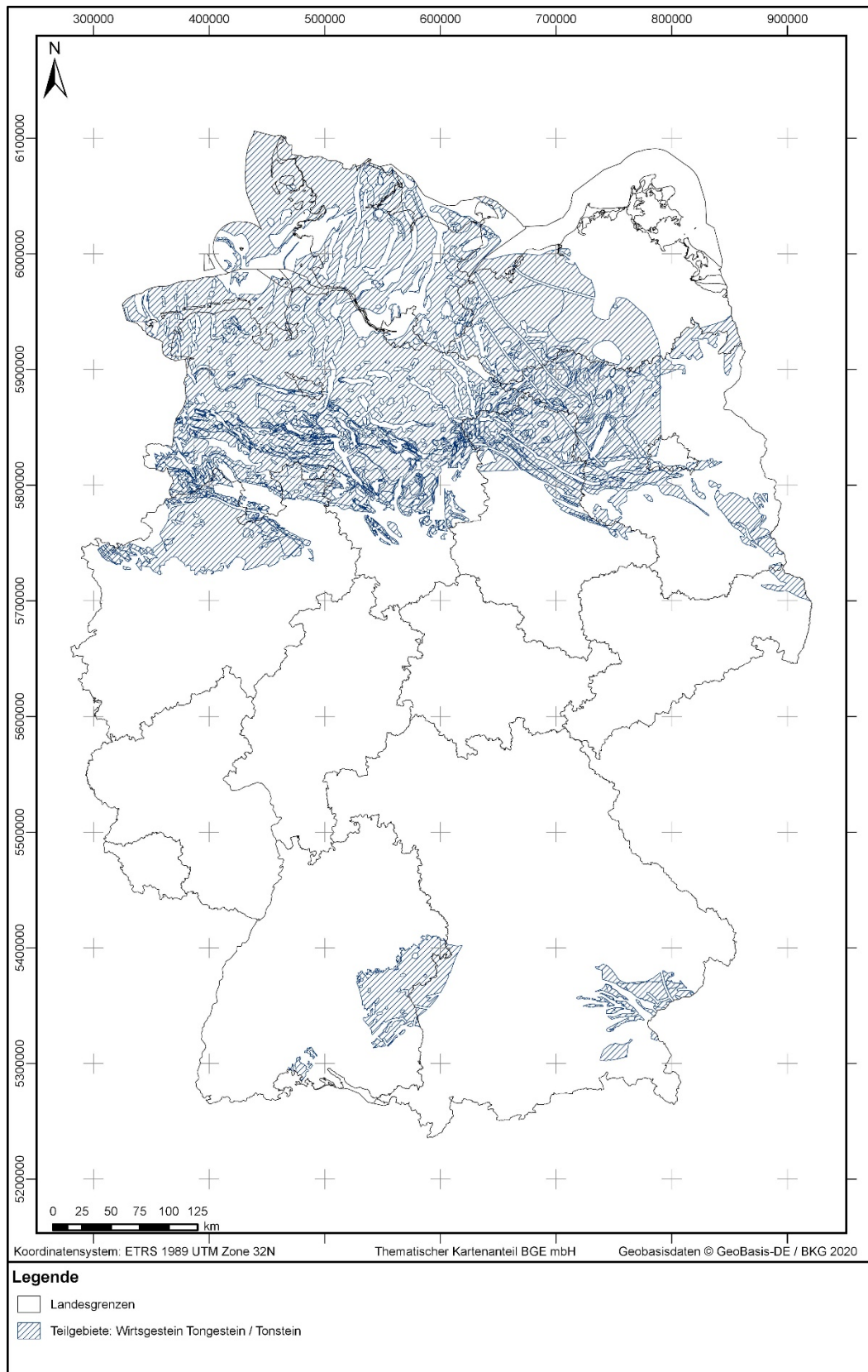


Abbildung 10: *Übersichtskarte der Teilgebiete im Wirtsgestein Tongestein. Die Teilgebiete wurden nach stratigraphischen Einheiten ermittelt, daher kommt es in einigen Fällen zur teilweisen Überlagerung mehrerer Teilgebiete in dieser Kartendarstellung.*

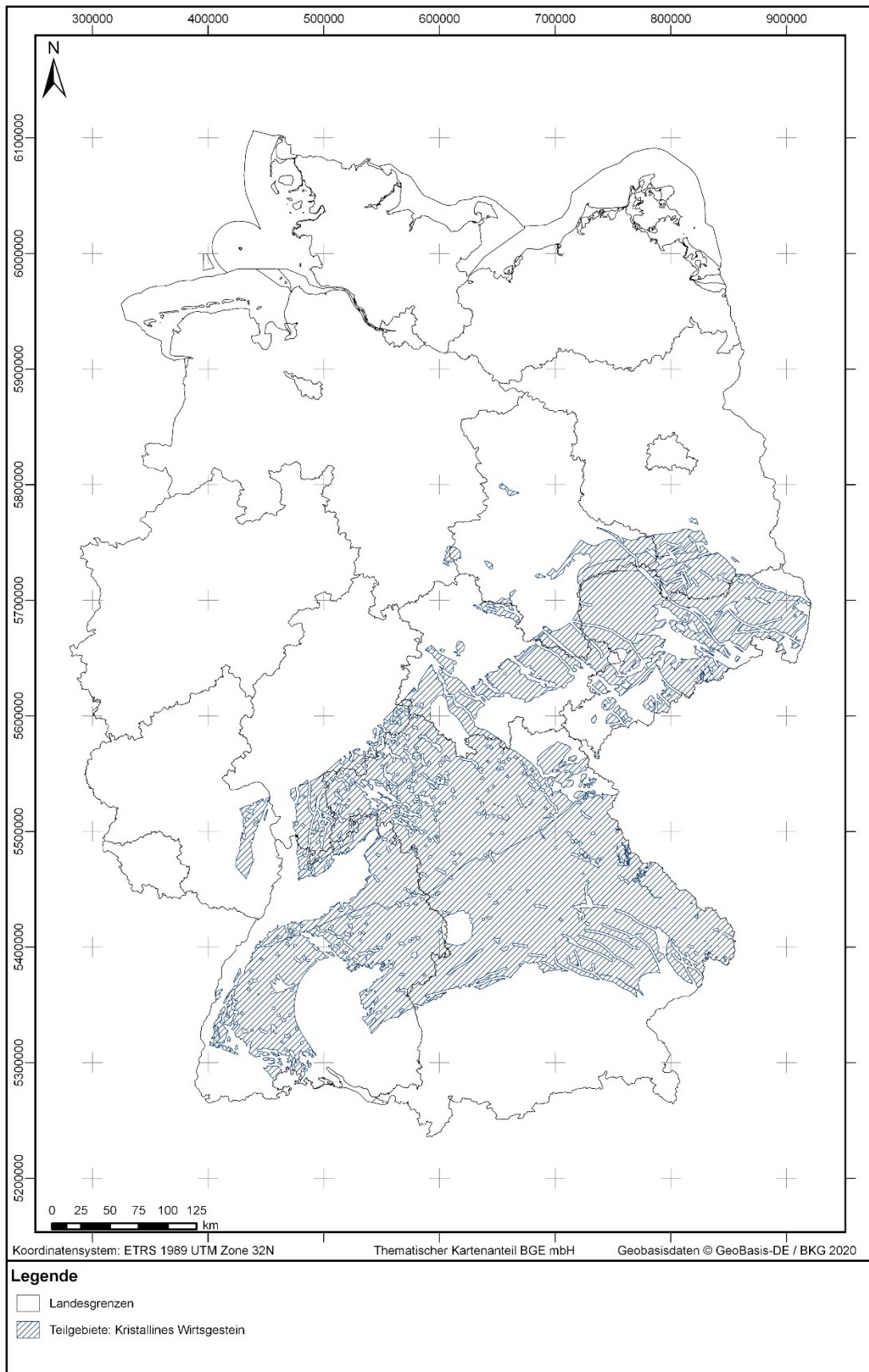


Abbildung 11: Übersichtskarte der Teilgebiete im kristallinen Wirtsgestein auf dem Gebiet der Bundesrepublik Deutschland

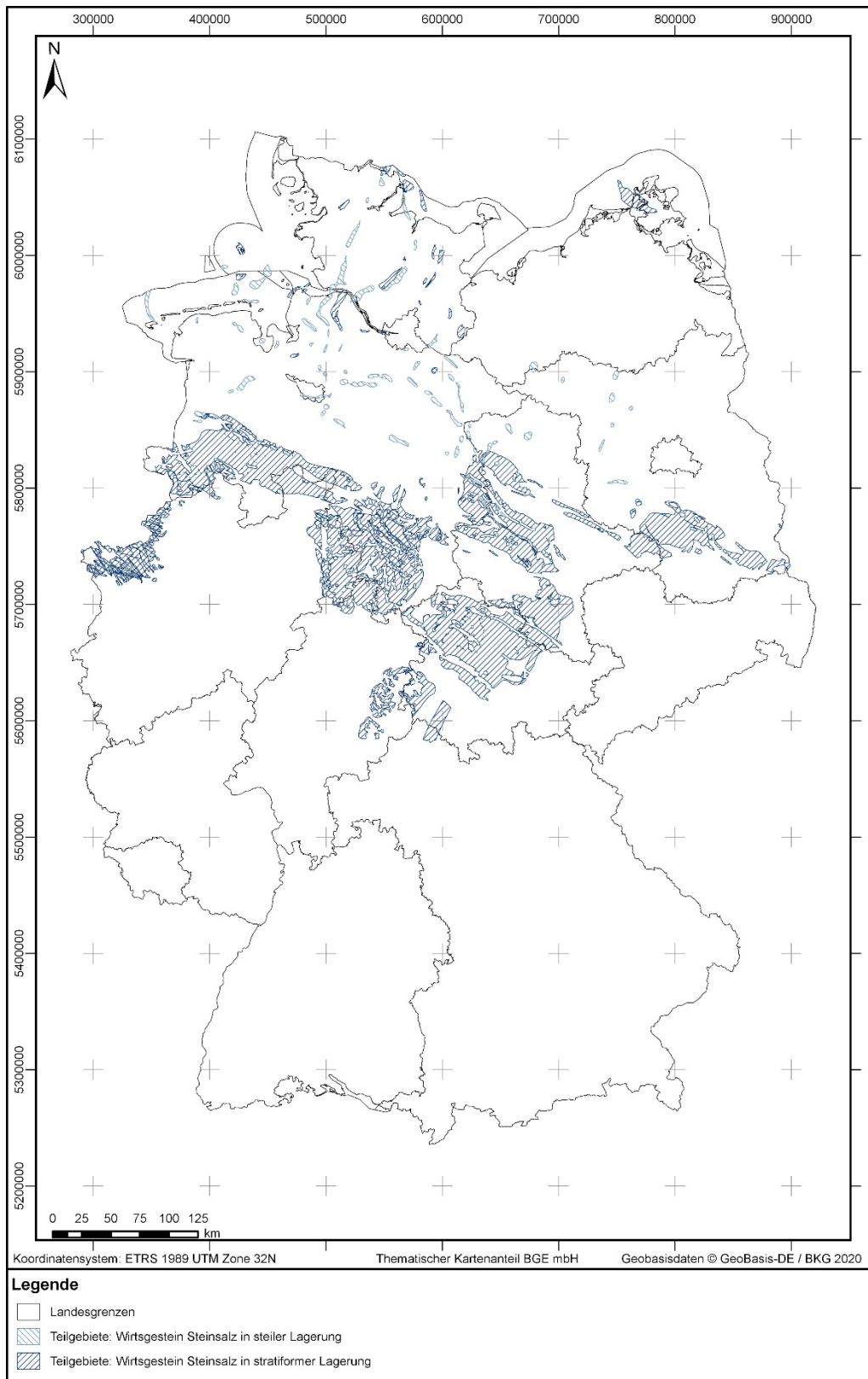


Abbildung 12: *Übersichtskarte der Teilgebiete im Wirtsgestein Steinsalz. Bei den Teilgebieten in stratiformen Steinsalz kommt es in einigen Fällen zur teilweisen Überlagerung mehrerer Teilgebiete in der Kartendarstellung, da diese nach stratigraphischen Einheiten getrennt ausgewiesen wurden.*

Anhang 1 Bewertungen der Indikatoren nach den Referenzdatensätzen (BGE 2020b)

Anhang 1.1 Bewertung der Indikatoren nach Referenzdatensatz für Tongestein

Tabelle A. 1: *Bewertung der Indikatoren für das Kriterium nach Anlage 1 (zu § 24 Abs. 3) StandAG nach Referenzdatensatz für Tongestein*

Indikatoren	Bewertung des Indikators nach Referenzdatensatz für Tongestein
Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers	Aufgrund der bei Tongestein sehr geringen Permeabilität und effektiven (durchflusswirksamen) Porosität kann von einer sehr geringen Abstandsgeschwindigkeit ausgegangen werden. Daher wird auf Grundlage des Referenzdatensatzes Tongestein der Indikator „Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers“ für alle identifizierten Gebiete des Wirtsgesteins „Tongestein“ mit „günstig“ bewertet.
Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit des Gesteinstyps	Die Messergebnisse zur Ermittlung der Durchlässigkeit verschiedener Standorte weisen auf geringe hydraulische Eigenschaften im Tongestein bei zunehmenden Versenkungstiefen und unterschiedlichen Tongehalten hin. Bis zur Erkundung und Feststellung standortbezogener Daten kann auf Basis der bisherigen Messergebnisse von teils bedingt günstigen und überwiegend günstigen Bedingungen ausgegangen werden. Für den Referenzdatensatz wird der Indikator „Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit des Gesteinstyps“ für Tongestein mit „günstig“ bewertet.
Charakteristischer effektiver Diffusionskoeffizient des Gesteinstyps für tritiiertes Wasser (HTO) bei 25 °C	Der effektive Diffusionskoeffizient steht beim Gesteinstyp Tongestein im direkten Zusammenhang mit der Porosität, der Kompaktion, der Temperatur und der natürlichen Schichtung des Tongesteins. Für verfestigte Tone mit Porositäten kleiner 20 % sind effektive Diffusionskoeffizienten kleiner 10^{-11} m ² /s typisch. Die aus der Literatur aufgeführten Werte für verfestigte Tone sind alle als „günstig“ zu bewerten. Da standortspezifische Untersuchungen bezüglich der effektiven Diffusionskoeffizienten durchgeführt werden müssen, wird der Indikator mit „günstig“ bewertet.
Absolute Porosität	Der Indikator „absolute Porosität“ hängt stark vom Verfestigungsgrad des Tongesteins ab. Im Tongestein ist die absolute Porosität im Gegensatz zu unverfestigten Tönen geringer. Da eine Aussage über den Verfestigungsgrad nicht ohne In-situ-Untersuchungen möglich ist, sind Bewertungen als „günstig“, „bedingt günstig“ oder „weniger günstig“ möglich. Eine pauschale Einordnung in eine der Wertungsgruppen ist

Indikatoren	Bewertung des Indikators nach Referenzdatensatz für Tongestein
	tendenziell nicht möglich. Da standortspezifische Untersuchungen durchgeführt werden müssen, wird der Indikator mit „günstig“ bewertet.
Verfestigungsgrad	Der Indikator „Verfestigungsgrad“ ist stark von der Versenkungsgeschichte (Druck, Temperatur und Zeit) und diagenetischen Veränderungen abhängig. Im Tongestein erfolgt die Abschätzung des Verfestigungsgrades dahingehend, dass eine günstige, bedingt günstige oder weniger günstige Bewertung möglich ist. Eine pauschale Einordnung in eine der Wertungsgruppen ist nicht möglich. Belastbare Aussagen können nur auf Basis von In-situ-Messungen bzw. geologischen Beschreibungen vorgenommen werden. Da jedoch standortspezifische Untersuchungen durchgeführt werden müssen, wird der Indikator mit „günstig“ bewertet.

Tabelle A. 2: Bewertung der Indikatoren für das Kriterium nach Anlage 5 (zu § 24 Abs. 4) StandAG nach Referenzdatensatz für Tongestein

Indikatoren	Bewertung der Indikatoren nach Referenzdatensatz für Tongestein
„Aufnahme der Beanspruchung des Gebirges aus der Auffahrung ohne planmäßigen tragenden Ausbau“ und „Mechanisch bedingte Sekundärpermeabilitäten“	<p>Prinzipiell können Tongesteine ohne tragenden Ausbau die Beanspruchungen aus Auffahrung und Betrieb nicht aufnehmen. Zu dieser Einschätzung kommen ,wie bereits erwähnt, auch BGR (2007) und Alfara et al. (2020b).</p> <p>Somit kann der erste Indikator grundsätzlich im ersten Bearbeitungsschritt für den Zwischenbericht Teilgebiete auf Basis der bergmännischen Erfahrungen und zahlreichen Laboruntersuchungen als „nicht günstig“ bewertet werden. Lux et al. (2002, S. 49 f.) beschreiben in ihrer Arbeit die Wichtigkeit der Tiefenlage für günstige Bedingungen. „Für Tongestein der Gebirgsklasse „intakt“ kann eingeschätzt werden, dass im Lastfall Ausbruch bis in eine Teufe von 900 m und im Lastfall Ausbruch/Temperatur bis in eine Teufe von 600 m jeweils günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen vorliegen. Für Tongestein der Gebirgsklasse „leicht geschädigt“ ist dagegen davon auszugehen, dass in den beiden Lastfällen Ausbruch sowie Ausbruch und Temperaturänderung nur für Teufen kleiner als 500 m gebirgsmechanische Bedingungen vorliegen, die nach den abgeleiteten Kriterien/ eingeschätzten Grenzwerten „günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen“ erwarten lassen“. Begründet mit den Ergebnissen von Alfara et al.</p>

Indikatoren	Bewertung der Indikatoren nach Referenzdatensatz für Tongestein
	(2020a) kann der zweite Indikator im ersten Bearbeitungsschritt mit „günstig“ bewertet werden.

Tabelle A. 3: Bewertung der Indikatoren für das Kriterium nach Anlage 6 (zu § 24 Abs. 4) StandAG nach Referenzdatensatz für Tongestein

Indikatoren	Bewertung des Indikators nach Referenzdatensatz für Tongestein
Verhältnis repräsentative Gebirgsdurchlässigkeit/ repräsentative Gesteinsdurchlässigkeit	Bei Tongesteinen kann davon ausgegangen werden, dass Bereiche vorhanden sind, die annähernd gleiche Gebirgs- und Gesteinsdurchlässigkeit haben, da die Möglichkeit besteht, dass sich Klüfte wieder verschließen und somit als hydraulisch dicht anzusehen sind. Demnach wird dieser Indikator mit „günstig“ bewertet.
Erfahrungen über die Barrierewirksamkeit der Gebirgsformationen	Für Tongestein sind mehrere der in der Anlage 6 (zu § 24 Abs. 4) StandAG aufgeführten Erfahrungsbereiche erfüllt. Der Indikator wird demnach mit „günstig“ bewertet.
Rückbildung der Sekundärpermeabilität durch Risschließung	Tongestein neigt prinzipiell zur Risschließung, vorwiegend in Verbindung mit sekundären Mechanismen, insbesondere durch Quellen der Tonminerale. Teilverfestigte Tone besitzen die Möglichkeit Oberflächenrauigkeiten zu reduzieren. Es ist zu beachten, dass zwischen verfestigten und unverfestigten Tongesteinen unterschiedliche Bewertungen auftreten können, da die Bewertung des Indikators vom Verfestigungsgrad des Gesteins abhängig sein kann. Stratigraphisch ist hierbei auch bei jüngeren Tongesteinen formationsintern mit zunehmender Tiefe eine Zunahme des Verfestigungsgrades zu erwarten. Dies ist standortspezifisch im weiteren Verlauf des Verfahrens zu ermitteln. Zum jetzigen Zeitpunkt wird der Indikator demnach mit „günstig“ bewertet.
Rückbildung der mechanischen Eigenschaften durch Rissverheilung	Bei verfestigtem Tongestein tritt die Verheilung primär durch Sekundärmineralisation auf, bei unverfestigten Tongesteinen kann die Verheilung ebenfalls durch geochemisch geprägte Prozesse ablaufen. Es ist zu beachten, dass zwischen verfestigten und unverfestigten Tongesteinen unterschiedliche Bewertungen auftreten können, da die Bewertung des Indikators vom Verfestigungsgrad des Gesteins abhängig sein kann. Stratigraphisch ist hierbei auch bei jüngeren Tongesteinen formationsintern mit zunehmender Tiefe eine Zunahme

Indikatoren	Bewertung des Indikators nach Referenzdatensatz für Tongestein
	des Verfestigungsgrades zu erwarten. Dies ist standortspezifisch im weiteren Verlauf des Verfahrens zu ermitteln. Dementsprechend wird der Indikator mit „günstig“ bewertet.

Tabelle A. 4: Bewertung des Indikators für das Kriterium nach Anlage 7 (zu § 24 Abs. 5) StandAG nach Referenzdatensatz für Tongestein

Indikatoren	Bewertung des Indikators nach Referenzdatensatz für Tongestein
Wasserangebot im Einlagerungsbereich	<p>Im Tongestein ist aufgrund der Existenz durchströmbarer Poren und die Wasseranlagerung an die Oberflächen der Tonminerale die Bedingung erfüllt, dass die zur Korrosion erforderliche Feuchtigkeit ansteht. Daher sind Tongesteine als „feucht“ einzustufen. Dies hängt allerdings von individuellen Umgebungsbedingungen und standortspezifischen Parametern ab. Weiterhin wird davon ausgegangen, dass im Tongestein generell eine Gebirgsdurchlässigkeit kleiner als 10^{-11} m/s eingehalten wird und dadurch die „Dichtheit“ gegenüber einer Wasserphase gewährleistet wird. Dies trifft ebenso auf eine mögliche gebildete Gasphase und das damit verbundene Risiko der Überdruckentstehung zu. Es ist zu beachten, dass zwischen verfestigten und unverfestigten plastischen Tongesteinen unterschiedliche Bewertungen auftreten können, da die Bewertung des Indikators vom Verfestigungsgrad des Gesteins abhängig sein kann. Stratigraphisch ist hierbei auch bei jüngeren Tongesteinen formationsintern mit zunehmender Tiefe eine Zunahme des Verfestigungsgrades (und damit eine Abnahme des Wasserangebotes) zu erwarten. Dies ist standortspezifisch im weiteren Verlauf des Verfahrens zu ermitteln. Darüber hinaus liegen zum jetzigen Zeitpunkt keine detaillierten Informationen über den Wassergehalt in den identifizierten Gebieten vor und es gibt keine standortspezifischen Festlegungen der Materialien der technischen Barrieren. Dementsprechend wird davon ausgegangen, dass eine günstige Situation in Bezug auf Gasbildung grundsätzlich möglich ist. Dementsprechend wird der Indikator mit „günstig“ bewertet.</p>

Tabelle A. 5: *Bewertung der Indikatoren für das Kriterium nach Anlage 8 (zu § 24 Abs. 5) StandAG nach Referenzdatensatz für Tongestein*

Indikatoren	Bewertung des Indikators nach Referenzdatensatz für Tongestein
Neigung zur Bildung wärmeinduzierter Sekundärpermeabilitäten	Basierend auf den positiven thermischen Expansionskoeffizienten kann der Indikator „Neigung zur Bildung wärmeinduzierter Sekundärpermeabilitäten und ihrer Ausdehnung“ im möglichst homogenen Tongestein mit „günstig“ bewertet werden.
Temperaturstabilität hinsichtlich Mineralumwandlungen	Verschiedene Studien deuten darauf hin, dass in der Zeitdauer der Temperatureinwirkung eines Endlagers keine nennenswerte Illitisierung stattfindet. Dennoch ist eine quantitative Beschreibung von Illit-Smektit-Umwandlungen nur standortspezifisch möglich. Allgemein sind Tongesteinsformationen, welche in ihrer geologischen Vergangenheit größeren Versenkungstiefen ausgesetzt waren, thermisch stabiler gegenüber Mineralumwandlungen. Die Versenkungstiefe spiegelt auch den Grad der Verfestigung wieder. Daher ist zu beachten, dass zwischen verfestigten und unverfestigt plastischen Tongesteinen unterschiedliche Bewertungen auftreten können, da die Bewertung des Indikators vom Verfestigungsgrad bzw. der Versenkungstiefe des Gesteins abhängig sein kann. Stratigraphisch ist hierbei auch bei jüngeren Tongesteinen formationsintern mit zunehmender Tiefe eine Zunahme des Verfestigungsgrades zu erwarten. Dies ist standortspezifisch im weiteren Verlauf des Verfahrens zu ermitteln. Zum jetzigen Zeitpunkt wird der Indikator demnach mit „günstig“ bewertet.

Tabelle A. 6: *Bewertung der Indikatoren für das Kriterium nach Anlage 9 (zu § 24 Abs. 5) StandAG nach Referenzdatensatz für Tongestein*

Indikatoren	Bewertung des Indikators nach Referenzdatensatz für Tongestein
Sorptionskoeffizienten für die betreffenden langzeitrelevanten Radionuklide	Im Wirtsgestein Tongestein ist für die meisten langzeitrelevanten Radionuklide eine gute Sorption zu erwarten (K_d -Wert größer als $0,001 \text{ m}^3/\text{kg}$). Es ist ebenfalls zu erwarten, dass der K_d -Wert der meisten Radionuklide den Schwellenwert von größer gleich $0,001 \text{ m}^3/\text{kg}$ übersteigt. Diese Annahme wird durch unterschiedliche experimentelle Arbeiten zu Sorptionskoeffizienten im Tongestein unterstützt. Nach diesen Referenzwerten können allerdings die K_d -Werte für die Elemente Iod, Cäsium und Chlor potentiell den Schwellenwert unterschreiten (regional bedingt), wobei Chlor und Iod in der Wertungsgruppe „bedingt günstig“ nicht aufgelistet werden.

Indikatoren	Bewertung des Indikators nach Referenzdatensatz für Tongestein
	Solange keine standortspezifischen Prüfungen stattgefunden haben, ist daher von der bestmöglichen Sorption für jedes dieser Elemente auszugehen. Demnach wird dieser Indikator für das Wirtsgestein Tongestein mit „günstig“ bewertet.
Gehalt an Mineralphasen mit großer reaktiver Oberfläche	Tongesteine bestehen zum Großteil aus Mineralphasen mit großer reaktiver Oberfläche. Für die Anwendung des Indikators wird ein Schwellenwert für einen „möglichst hohen“ Gehalt vorausgesetzt, wovon bei Tongestein ausgegangen werden kann. Dies trifft auch bei regionalen und stratigraphischen Schwankungen der Tongehalte zu, wobei oft hohe Gehalte an Illit, Montmorillonit, Kaolinit und Chlorit gegeben sind. Der Indikator für das Wirtsgestein Tongestein wird demnach mit „günstig“ bewertet.
Ionenstärke des Grundwassers	Die Ionenstärke ist abhängig von der jeweiligen standortspezifischen geologischen Situation. Die Ionenstärke im Tongestein als Wirtsgestein kann regional und stratigraphisch variieren. Da ohne standortspezifische Untersuchungen keine belastbaren Aussagen zur Ionenstärke gemacht werden können, wird der Indikator mit „günstig“ bewertet.
Öffnungsweite der Gesteinsporen im Nanobereich	In Tongestein als Wirtsgestein ist mit sehr geringen Öffnungsweiten der Gesteinsporen zu rechnen. Es kann davon ausgegangen werden, dass Porengrößen stets im Nanometerbereich dominieren. Auch durch regionale oder stratigraphische Schwankungen werden diese nicht überschritten. Daher wird der Indikator mit „günstig“ bewertet.

Tabelle A. 7: Bewertung der Indikatoren für das Kriterium nach Anlage 10 (zu § 24 Abs. 5) StandAG nach Referenzdatensatz für Tongestein

Indikatoren	Bewertung des Indikators nach Referenzdatensatz für Tongestein
Chemisches Gleichgewicht zwischen dem Wirtsgestein im Bereich des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und dem darin enthaltenen tiefen Grundwasser	Durch geringe Fließgeschwindigkeiten, geringe Porengrößen und lange Verweildauer der Porenwässer im Tongestein ist ein chemisches Gleichgewicht zu erwarten. Zudem sind weitere standortspezifische Faktoren, wie Klüftung und etwaige lithologische Einschaltungen zu ermitteln. Daher wird der Indikator mit „günstig“ bewertet.
Neutrale bis leicht alkalische Bedingungen (pH-Wert 7 bis 8) im Bereich des Tiefenwassers	Für Tiefenwässer im Tongestein sind generell neutrale bis leicht basische Bedingungen zu erwarten, die standortspezifisch und stratigraphisch variieren können. Daher wird der Indikator mit „günstig“ bewertet..

Indikatoren	Bewertung des Indikators nach Referenzdatensatz für Tongestein
Anoxisch-reduzierendes Milieu im Bereich des Tiefenwassers	Da im Tongestein generell ein anoxisch-reduzierendes Milieu im Einlagerungsbereich erwartet werden kann, wird der Indikator mit „günstig“ bewertet..
Möglichst geringer Gehalt an Kolloiden und Komplexbildnern im Tiefenwasser	Im Tiefenwasser von Tongestein können Kolloide regelmäßig auftreten, allerdings in sehr geringen Konzentrationen. Die sehr geringen Porengrößen in Tongesteinen (meist $1 - 25 \cdot 10^{-9}$ μm) verglichen mit Kolloidengrößen von $1 \cdot 10^{-9} - 1 \cdot 10^{-6}$ m, beeinträchtigen deren Transporteigenschaften bis hin zur Immobilität. Zudem sind quantitative Angaben zu Kolloiden und Komplexbildnern standortspezifisch zu ermitteln. Daher wird der Indikator mit „günstig“ bewertet.
Geringe Karbonatkonzentration im Tiefenwasser	Der zu erwartende Gehalt an Karbonaten in Tiefenwässern im Tongestein ist ein standortspezifischer Indikator und muss individuell ermittelt werden. Im ungestörten und gering geklüfteten Tongestein wird von einer geringen Konzentration ausgegangen. Daher wird der Indikator mit „günstig“ bewertet.

Anhang 1.2 Bewertung der Indikatoren nach Referenzdatensatz für kristallines Wirtsgestein

Tabelle A. 8: Bewertung der Indikatoren für das Kriterium nach Anlage 1 (zu § 24 Abs. 3) StandAG nach Referenzdatensatz für kristallines Wirtsgestein

Indikatoren	Bewertung des Indikators nach Referenzdatensatz für kristallines Wirtsgestein
Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers	Der zu bewertende Indikator „Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers“ hängt u. a. von der Gebirgsdurchlässigkeit ab. Diese lässt sich bei fehlender Datenbasis nur abschätzen. Im kristallinen Wirtsgestein variiert die Gebirgsdurchlässigkeit und somit auch die Abstandsgeschwindigkeiten so stark, dass eine günstige, bedingt günstige oder weniger günstige Bewertung möglich ist. Eine pauschale Einordnung in einer der Wertungsgruppen ist nicht möglich. Belastbare Aussagen können sich nur auf Basis von In-situ-Messungen machen lassen. Da Bereiche mit geringer Klüftung und damit einhergehender geringer Abstandsgeschwindigkeit von kleiner als 0,1 m/a nicht auszuschließen sind, wird dieser Indikator mit „günstig“ bewertet.
Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit des Gesteinstyps	Bei kristallinem Wirtsgestein stellt sich die Problematik, dass in der Literatur angegebene Gebirgsdurchlässigkeiten einen Wertebereich abdecken, der eine günstige, bedingt günstige oder weniger günstige Bewertung zulassen würde. Günstige

Indikatoren	Bewertung des Indikators nach Referenzdatensatz für kristallines Wirtsgestein
	Bedingungen sind dabei seltener zu finden, was insbesondere auf die häufige Klüftung im kristallinen Wirtsgestein und der damit verbundenen Erhöhung der Gebirgsdurchlässigkeit zurückzuführen ist. In kluffreien oder durch Kluffverheilung dichten Bereichen kann es jedoch auch zur Verringerung der Gebirgsdurchlässigkeit und einer günstigen Bewertung kommen. Für den Referenzdatensatz wird von einem ungeklüfteten Gebirgsbereich ausgegangen, womit der Indikator „Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit des Gesteinstyps“ für kristallines Wirtsgestein mit „günstig“ bewertet wird.
Charakteristischer effektiver Diffusionskoeffizient des Gesteinstyps für tritiiertes Wasser (HTO) bei 25 °C	Der „Charakteristischer effektiver Diffusionskoeffizient des Gesteinstyps für tritiiertes Wasser (HTO) bei 25 °C“ steht beim Gesteinstyp im direkten Zusammenhang mit der Porosität. Kristallines Wirtsgestein weist eine sehr geringe Porosität auf, weshalb kleine Diffusionskoeffizienten erwartet werden. Demnach wird der Indikator mit „günstig“ bewertet.

Tabelle A. 9: Bewertung der Indikatoren für das Kriterium nach Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG nach Referenzdatensatz für kristallines Wirtsgestein

Indikatoren	Bewertung des Indikators nach Referenzdatensatz für kristallines Wirtsgestein
Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich	Kristalline Wirtsgesteine können aufgrund ihrer Genese eine erhebliche Variationsbreite ihrer Eigenschaften aufweisen. Großräumige Plutonite und hochgradig regionalmetamorphe Gesteine aus magmatischen Edukten weisen meist einen homogenen modalen Mineralbestand auf als Metamorphite mit einem wechselgelagerten sedimentären Edukt. Aussagen über die Variationsbreite der Klüftungen im Gestein sind in der ersten Phase des Standortauswahlverfahrens nicht zuverlässig zu treffen. Es ist in der ersten Phase des Standortauswahlverfahrens aufgrund geringer Standortinformationen jedoch nicht auszuschließen, dass innerhalb eines kristallinen Wirtsgesteines ein ausreichend großer, gering geklüfteter Bereich mit einer geringen Variation der Gesteinseigenschaften identifiziert wird. Aus diesem Grund wird der Indikator für alle identifizierten Gebiete des Wirtsgesteins mit „günstig“ bewertet.
Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften	Unter der Annahme eines gering geklüfteten kristallinen Wirtsgesteins wird der Indikator „Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften“ für alle identifizierten Gebiete des Wirtsgesteins mit „günstig“ bewertet, da trotz genannter potentieller Ursachen für Heteroge-

Indikatoren	Bewertung des Indikators nach Referenzdatensatz für kristallines Wirtsgestein
	<p>nitäten für kristalline Wirtsgesteine nicht ausgeschlossen werden kann, dass ein für den Endlagerbereich ausreichend großer Bereich mit gleichmäßiger Verteilung der Gesteinseigenschaften und des Gesteinstyps identifiziert wird.</p>
<p>Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit</p>	<p>Zum jetzigen Zeitpunkt im Verfahren wird angenommen, dass es möglich ist einen nicht bis gering gestörten Kristallinkörper in ausreichend großer Ausdehnung für die Realisierung eines Endlagers zu identifizieren. Unter dieser Annahme wird der Indikator „Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit“ für alle identifizierten Gebiete des Wirtsgesteins mit „günstig“ bewertet.</p>
<p>Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)</p>	<p>Für die Bewertung des Indikators muss zwischen hochgradig regionalmetamorphen Gesteinen und Intrusivgesteinen differenziert werden. Innerhalb von Plutoniten kann es aufgrund der Gesteinsgenese zu Heterogenitäten in Bezug auf die Mineralzusammensetzung kommen, die standortspezifisch erhoben werden müssen. Die Identifikation von ausreichend großen Homogenbereichen ist jedoch potentiell möglich, sodass hier eine Bewertung für alle identifizierten Gebiete des Wirtsgesteins als „günstig“ erfolgt. Hochgradige Regionalmetamorphite granitoiden Ursprungs können ebenfalls eine „günstige“ Gesteinsausbildung aufweisen, können jedoch wie die hochgradigen Regionalmetamorphite, die aus Wechsellagerungen sedimentärer Gesteine aufgebaut sind, einen metamorphen Lagenbau aufweisen. Dies ist im späteren Verlauf des Verfahrens standortspezifisch zu prüfen. Hochgradige Regionalmetamorphite aus einem sedimentären, wechselgelagerten Ausgangsgestein bilden häufig die Heterogenitäten des Ausgangsgesteins ab, sodass sie für alle identifizierten Gebiete des Wirtsgesteins als „bedingt günstig“ bewertet werden. Zum jetzigen Zeitpunkt im Verfahren wird jedoch in der Bearbeitung nicht zwischen den verschiedenen Kristallingesteinstypen unterschieden, weshalb die räumliche Lage der hochgradigen Regionalmetamorphite nicht bekannt ist und zu einem späteren Zeitpunkt ermittelt werden muss. Dementsprechend erfolgt die Bewertung der Gesteinsausbildung für das Kristallin für alle identifizierten Gebiete des Wirtsgesteins im Moment insgesamt mit „günstig“.</p>

Tabelle A. 10: Bewertung der Indikatoren für das Kriterium nach Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG nach Referenzdatensatz für kristallines Wirtsgestein

Indikatoren	Bewertung des Indikators nach Referenzdatensatz für kristallines Wirtsgestein
Zeitspanne über die sich die Mächtigkeit, Ausdehnung und Gebirgsdurchlässigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht wesentlich verändert hat	Es ist zu erwarten, dass trotz anhaltender Erosion anstehender Kristallinvorkommen keine Veränderung der Mächtigkeit des Wirtsgesteinsbereichs in einer endlagerrelevanten Teufe innerhalb der letzten zehn Millionen Jahre stattgefunden hat. Da hier ausschließlich die Mächtigkeit im Endlagerbereich und nicht die Gesamtmächtigkeit des Gesteinskörpers betrachtet wird, wird der Indikator „Zeitspanne über die sich die Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht wesentlich verändert hat“ für alle identifizierten Gebiete des Wirtsgesteins mit „günstig“ bewertet. Im späteren Verlauf des Verfahrens ist diese Aussage regionalspezifisch zu überprüfen.
Zeitspanne über die sich die Ausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht wesentlich verändert hat	Es ist zu erwarten, dass keine Veränderung in der Ausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs bzw. des Gesteinskörpers, der ein noch auszuweisenden einschlusswirksamen Gebirgsbereich aufnehmen kann, innerhalb der letzten zehn Millionen Jahre stattgefunden hat. Aus diesem Grund wird der Indikator „Zeitspanne über die sich die Ausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht wesentlich verändert hat“ für alle identifizierten Gebiete des Wirtsgesteins mit „günstig“ bewertet. Im späteren Verlauf des Verfahrens ist diese Aussage regionalspezifisch zu überprüfen.
Zeitspanne über die sich die Gebirgsdurchlässigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht wesentlich verändert hat	Es ist zu erwarten, dass keine Veränderung der Gebirgsdurchlässigkeit innerhalb der letzten zehn Millionen Jahre stattgefunden hat. Aus diesem Grund wird der Indikator „Zeitspanne über die sich die Gebirgsdurchlässigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht wesentlich verändert hat“ für alle identifizierten Gebiete des Wirtsgesteins mit „günstig“ bewertet. Im späteren Verlauf des Verfahrens ist diese Aussage regionalspezifisch zu überprüfen.

Tabelle A. 11: Bewertung der Indikatoren für das Kriterium nach Anlage 5 (zu § 24 Abs. 4) StandAG nach Referenzdatensatz für kristallines Wirtsgestein

Indikatoren	Bewertung der Indikatoren nach Referenzdatensatz für kristallines Wirtsgestein
„Aufnahme der Beanspruchung des Gebirges aus der Auffahrung ohne planmäßigen tragenden	Für die Anwendung beider Indikatoren ist das vorherrschende Kluftsystem von großer Bedeutung. Sollte für das zu bewertende Gebiet keine Informationen hierüber vorliegen, so ist vom besten Fall, also einem nahezu ungeklüftetem Gebirge

Indikatoren	Bewertung der Indikatoren nach Referenzdatensatz für kristallines Wirtsgestein
Ausbau“ und „Mechanisch bedingte Sekundärpermeabilitäten“	<p>auszugehen. Somit können die beiden Indikatoren grundsätzlich im ersten Bearbeitungsschritt für den Zwischenbericht Teilgebiete auf Basis der bergmännischen Erfahrung sowie der hohen Druckfestigkeit in ungeklüftetem Zustand als „günstig“ bewertet werden. Zu dem gleichen Ergebnis kommen auch Becker et al. (2020): „Für Kristallingestein hängen die gebirgsmechanischen Eigenschaften vor allem von den Eigenschaften des Kluftsystems ab. Für den Einlagerungsbereich würde gering geklüftetes Gestein bevorzugt werden, in dem kein tragender Ausbau notwendig ist“. Lux et al. (2002) schreiben in ihrer Arbeit „Für Granitgestein der Gebirgsklassen „intakt“ und „leicht geschädigt“ liegen bis in eine Teufe von 1200 m günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen vor für die Lastfälle Ausbruch/Ausbruch und Temperaturänderung.“</p>

Tabelle A. 12: *Bewertung der Indikatoren für das Kriterium nach Anlage 6 (zu § 24 Abs. 4) StandAG nach Referenzdatensatz für kristallines Wirtsgestein*

Indikatoren	Bewertung des Indikators nach Referenzdatensatz für kristallines Wirtsgestein
Verhältnis repräsentative Gebirgsdurchlässigkeit/ repräsentative Gesteinsdurchlässigkeit	Die für kristallines Wirtsgestein typische Klüftung führt in der Regel zu einer um mehrere Zehnerpotenzen höheren Gebirgsdurchlässigkeit im Vergleich zur Gesteinsdurchlässigkeit. Bei Abwesenheit von Daten wird jedoch nicht ausgeschlossen, dass ungestörte Bereiche vorhanden sind, die die gleiche oder annähernd gleiche Gebirgs- und Gesteinsdurchlässigkeit haben. Demnach ergibt sich im besten Fall für den Quotienten aus beiden ein Faktor gleich eins, weshalb dieser Indikator mit „günstig“ bewertet wird.
Erfahrungen über die Barrierewirksamkeit der Gebirgsformationen	Für kristallines Wirtsgestein ist einer der im StandAG aufgeführten Erfahrungsbereiche erfüllt. Der Indikator wird demnach mit „günstig“ bewertet.
Rückbildung der Sekundärpermeabilität durch Risschließung	Kristallines Wirtsgestein als nicht kriechfähiges Gestein neigt nicht zur Risschließung. Für das Wirtsgestein Kristallin wird der Indikator daher mit „weniger günstig“ bewertet.
Rückbildung der mechanischen Eigenschaften durch Rissverheilung	Bei kristallinem Wirtsgestein tritt die Verheilung durch Sekundärmineralisation in langen Zeiträumen auf. Der Indikator wird daher mit „weniger günstig“ bewertet.

Tabelle A. 13: *Bewertung des Indikators für das Kriterium nach Anlage 7 (zu § 24 Abs. 5) StandAG nach Referenzdatensatz für kristallines Wirtsgestein*

Indikatoren	Bewertung des Indikators nach Referenzdatensatz für kristallines Wirtsgestein
Wasserangebot im Einlagerungsbereich	<p>Im Referenzdatensatz für kristallines Wirtsgestein wird davon ausgegangen, dass der Einlagerungsbereich in möglichst dichtem kristallinem Wirtsgestein mit einer Gebirgsdurchlässigkeit kleiner als 10^{-11} m/s realisiert wird. Der Einlagerungsbereich ist demzufolge als „dicht“ zu bewerten. Da in ungestörten und ungeklüfteten kristallinen Gesteinen sehr geringe Wassergehalte vorhanden sind, wird der Einlagerungsbereich auch als „trocken“ bewertet. Daraus folgend ergibt sich eine „günstige“ Bewertung für den Indikator.</p> <p>Darüber hinaus liegen zum jetzigen Zeitpunkt keine detaillierten Informationen über den Wassergehalt in den identifizierten Gebieten vor und es gibt keine standortspezifischen Festlegungen der Materialien der technischen Barrieren. Dementsprechend</p>

Indikatoren	Bewertung des Indikators nach Referenzdatensatz für kristallines Wirtsgestein
	wird zum jetzigen Zeitpunkt angenommen, dass eine günstige Situation in Bezug auf Gasbildung grundsätzlich möglich ist, dementsprechend wird der Indikator mit „günstig“ bewertet.

Tabelle A. 14: Bewertung der Indikatoren für das Kriterium nach Anlage 8 (zu § 24 Abs. 5) StandAG nach Referenzdatensatz für kristallines Wirtsgestein

Indikatoren	Bewertung des Indikators nach Referenzdatensatz für kristallines Wirtsgestein
Neigung zur Bildung wärmeinduzierter Sekundärpermeabilitäten	Basierend auf den positiven thermischen Expansionskoeffizienten kann der Indikator „Neigung zur Bildung wärmeinduzierter Sekundärpermeabilitäten und ihrer Ausdehnung“ im kristallinen Wirtsgestein mit „günstig“ bewertet werden.
Temperaturstabilität hinsichtlich Mineralumwandlungen	Aufgrund der Entstehungsbedingungen von kristallinem Wirtsgestein, sind keine thermisch induzierten Mineralumwandlungen bei einer Grenztemperatur von 100 °C (nach § 27 Abs.4 (StandAG)) zu erwarten. Für kristallines Wirtsgestein wird dieser Indikator demnach mit „günstig“ bewertet.

Tabelle A. 15: Bewertung der Indikatoren für das Kriterium nach Anlage 9 (zu § 24 Abs. 5) StandAG nach Referenzdatensatz für kristallines Wirtsgestein

Indikatoren	Bewertung des Indikators nach Referenzdatensatz für kristallines Wirtsgestein
Sorptionkoeffizienten für die betreffenden langzeitrelevanten Radionuklide	<p>Im Wirtsgestein Kristallin ist für die meisten der langzeitrelevanten Radionuklide eine Sorption zu erwarten. Durch die dargestellten K_d-Werten ist zu erkennen, dass der Sorptionskoeffizient abhängig von den jeweiligen Bedingungen des Grundwassers stark schwanken kann. Solange jedoch keine standortspezifischen Prüfungen stattgefunden haben, ist von der bestmöglichen Sorption für jedes dieser Elemente auszugehen. Demnach ist zu erwarten, dass der K_d-Wert der meisten Radionuklide den Schwellenwert von größer gleich 0,001 m³/kg übersteigt. Nach den dargestellten Referenzwerten ist zu erwarten, dass die nur Elemente Chlor und Iod den Schwellenwert nicht erreichen. Ebenso kann angenommen werden, dass Cäsium den Schwellenwert potentiell unterschreitet.</p> <p>Das Erreichen des Schwellenwertes von Chlor und Iod ist die Voraussetzung für eine Bewertung mit „günstig“, aber keine Voraussetzung für eine Bewertung mit „bedingt günstig“.</p>

Indikatoren	Bewertung des Indikators nach Referenzdatensatz für kristallines Wirtsgestein
	Demnach wird dieser Indikator für das Wirtsgestein Kristallin mit „bedingt günstig“ bewertet.
Gehalt an Mineralphasen mit großer reaktiver Oberfläche	Im Referenzdatensatz wird ein möglichst ungeklüfteter Bereich im Kristallin betrachtet und somit werden Kluffüllungen nicht für eine Bewertung miteinbezogen. Daher ist im Kristallin kein hoher Gehalt an Mineralphasen mit großer reaktiver Oberfläche wie Tonmineralen sowie Eisen- und Mangan-Hydroxide oder Oxihydrate zu erwarten. Der Indikator wird demnach für kristallines Wirtsgestein mit „nicht günstig“ bewertet.
Ionenstärke des Grundwassers	Die Ionenstärke ist abhängig von der jeweiligen standortspezifischen geologischen Situation. Daher kann die Ionenstärke im kristallinen Wirtsgestein sehr variabel sein. Da ohne standort-spezifische Untersuchungen keine belastbaren Aussagen zur Ionenstärke gemacht werden können, wird der Indikator mit „günstig“ bewertet.
Öffnungsweite der Gesteinsporen im Nanobereich	In kristallinen Wirtsgesteinen ist mit sehr geringen Öffnungsweiten der Gesteinsporen zu rechnen. Es kann davon ausgegangen werden, dass Porengrößen im Nanometerbereich dominieren. Durch die Bildung einer Sekundärporosität durch Mikrorisse, können die Porengrößen den Nanometerbereich überschreiten. Da für den Referenzdatensatz für kristallines Wirtsgestein keine Kluff- und Rissbildungen betrachtet werden, wird der Indikator mit „günstig“ bewertet.

Tabelle A. 16: Bewertung der Indikatoren für das Kriterium nach Anlage 10 (zu § 24 Abs. 5) StandAG nach Referenzdatensatz für kristallines Wirtsgestein

Indikatoren	Bewertung des Indikators nach Referenzdatensatz für kristallines Wirtsgestein
Chemisches Gleichgewicht zwischen dem Wirtsgestein im Bereich des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und dem darin enthaltenen tiefen Grundwasser	Durch geringe Lösungsraten der gesteinsbildenden Minerale des kristallinen Wirtsgesteins in der oberen Kruste kommt es in der Regel zu keiner Ausbildung eines chemischen Gleichgewichts zwischen dem Wirtsgestein im Bereich des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und dem darin enthaltenen tiefen Grundwasser. Der Indikator wird für alle identifizierten Gebiete des Wirtsgesteins mit „nicht günstig“ bewertet.
Neutrale bis leicht alkalische Bedingungen (pH-Wert 7 bis 8) im Bereich des Tiefenwassers	Für Tiefenwässer im kristallinen Wirtsgestein sind neutrale bis leicht basische pH-Werte zu erwarten. Damit ist die im StandAG vorgegebene Voraussetzung von neutralen bis leicht alkalischen Bedingungen erfüllt und der Indikator wird demnach für alle identifizierten Gebiete des Wirtsgesteins mit „günstig“ bewertet. Standortspezifisch kann der vorgegebene pH-Wert-

Indikatoren	Bewertung des Indikators nach Referenzdatensatz für kristallines Wirtsgestein
	Rahmen von 7 – 8 unter- bzw. überschritten werden, wobei bis auf wenige Ausnahmen ein neutraler bis leicht basischer pH-Wert gegeben ist. Dies ist standortspezifisch zu prüfen.
Anoxisch-reduzierendes Milieu im Bereich des Tiefenwassers	Da im kristallinen Wirtsgestein ein anoxisch-reduzierendes Milieu im Einlagerungsbereich erwartet wird, wird dieser Indikator für alle identifizierten Gebiete des Wirtsgesteins mit „günstig“ bewertet.
Möglichst geringer Gehalt an Kolloiden und Komplexbildnern im Tiefenwasser	Da im gering geklüfteten kristallinen Wirtsgestein nur geringe Mengen an Kolloiden und Komplexbildnern zu erwarten sind, wird dieser Indikator für alle identifizierten Gebiete des Wirtsgesteins mit „günstig“ bewertet.
Geringe Karbonatkonzentration im Tiefenwasser	Der zu erwartende Gehalt an Karbonaten in Tiefenwässern im gering geklüfteten kristallinen Wirtsgestein ist gering, daher wird dieser Indikator für alle identifizierten Gebiete des Wirtsgesteins mit „günstig“ bewertet.

Anhang 1.3 Bewertung der Indikatoren nach Referenzdatensatz für Steinsalz

Tabelle A. 17: Bewertung der Indikatoren für das Kriterium nach Anlage 1 (zu § 24 Abs. 3) StandAG nach Referenzdatensatz für Steinsalz

Indikatoren	Bewertung des Indikators nach Referenzdatensatz für Steinsalz
Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers	Aufgrund der bei reinem Steinsalz sehr geringen Permeabilität und Porosität (unverritztes Steinsalz wird allgemein als dicht bezeichnet) kann von einer sehr geringen Abstandsgeschwindigkeit ausgegangen werden. Daher wird auf Grundlage des Referenzdatensatzes Steinsalz der Indikator „Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers“ für alle identifizierten Gebiete der Wirtsgesteine „Steinsalz in steiler Lagerung“ und „stratiforme Steinsalzformationen“ mit „günstig“ bewertet.
Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit des Gesteinstyps	Auf Grundlage des Referenzdatensatzes Steinsalz wird der Indikator „Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit des Gesteinstyps“ für alle identifizierten Gebiete der Wirtsgesteine „Steinsalz in steiler Lagerung“ und „stratiforme Steinsalzformationen“ mit „günstig“ bewertet. Die günstige Einstufung basiert sowohl auf Labor- und In-situ-Messwerten als auch auf Erfahrungen durch langjährige bergmännische Tätigkeit und geologischen Analogie wie z. B. Kavernenbau.
Charakteristischer effektiver Diffusionskoeffizient	Da reines Steinsalz im Allgemeinen als dicht, also undurchlässig für Gase und Fluide, betrachtet wird, ist auch der effektive

Indikatoren	Bewertung des Indikators nach Referenzdatensatz für Steinsalz
des Gesteinstyps für tritiiertes Wasser (HTO) bei 25 °C	Diffusionskoeffizient sehr klein. Demnach wird der Indikator „effektiver Diffusionskoeffizient für tritiiertes Wasser (HTO) bei 25 °C“ für alle identifizierten Gebiete der Wirtsgesteine „Steinsalz in steiler Lagerung“ und „stratiforme Steinsalzformationen“ mit „günstig“ bewertet.

Tabelle A. 18: Bewertung der Indikatoren für das Kriterium nach Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG nach Referenzdatensatz für Steinsalz

Indikatoren	Bewertung der Indikatoren nach Referenzdatensatz für Steinsalz
Zeitspanne, über die sich die Mächtigkeit, Ausdehnung und Gebirgsdurchlässigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht wesentlich verändert hat	<p>Es wird davon ausgegangen, dass der Salzaufstieg im Tertiär zum Ende gekommen ist. Danach haben sich Aufstiegs- geschwindigkeiten stark verlangsamt, wodurch keine wesentliche Änderung der Mächtigkeit und der Ausdehnung des Salz- stockes in dem Zeitraum nach dem Tertiär zu erwarten sind. Po- tentielle Änderungen, die nach dem Tertiär stattgefunden ha- ben, sind nur sehr gering und vernachlässigbar gegenüber den generell großen Mächtigkeiten und Ausdehnungen der Salz- stöcke.</p> <p>Darüber hinaus wird angenommen, dass Prozesse, die poten- tiell die Gebirgsdurchlässigkeit des Steinsalzes verändern, ebenfalls mit Ende des Diapirstadiums im Tertiär zum Erliegen gekommen sind. Da sich Bewegungen in Salzstöcken nach dem Tertiär nur noch in kleinem Maße fortsetzen und potenti- elle Änderungen in Mächtigkeit und Ausdehnung nach dem Tertiär als „nicht wesentlich“ eingestuft werden, wird ebenfalls angenommen, dass potentielle Änderungen der Gebirgsdurch- lässigkeit „nicht wesentlich“ sind.</p> <p>Daraus folgend wird davon ausgegangen, dass seit mehr als zehn Millionen Jahren keine wesentlichen Änderungen der Mächtigkeit, der Ausdehnung und der Gebirgsdurchlässigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs aufgetreten sind.</p> <p>Somit werden auf Grundlage des Referenzdatensatzes Stein- salz die Indikatoren „Zeitspanne, über die sich die Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht wesentlich verändert hat“, „Zeitspanne, über die sich die Ausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht wesentlich verän- dert hat“ und „Zeitspanne, über die sich die Gebirgsdurchläs- sigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht we-</p>

Indikatoren	Bewertung der Indikatoren nach Referenzdatensatz für Steinsalz
	sentlich verändert hat“ für alle identifizierten Gebiete der Wirtsgesteine „Steinsalz in steiler Lagerung“ und „stratiforme Steinsalzformationen“ mit „günstig“ bewertet.

Tabelle A. 19: Bewertung der Indikatoren für das Kriterium nach Anlage 5 (zu § 24 Abs. 4) StandAG nach Referenzdatensatz für Steinsalz

Indikatoren	Bewertung der Indikatoren nach Referenzdatensatz für Steinsalz
„Aufnahme der Beanspruchung des Gebirges aus der Auffahrung ohne planmäßigen tragenden Ausbau“ und „Mechanisch bedingte Sekundärpermeabilitäten	<p>Auf Grundlage des Referenzdatensatzes Steinsalz werden beide Indikatoren der Anlage 5 für alle identifizierten Gebiete der Wirtsgesteine „Steinsalz in steiler Lagerung“ und „stratiforme Steinsalzformationen“ mit „günstig“ bewertet. Diese Bewertung basiert auf bergmännischer Erfahrung.</p> <p>Zu dem gleichen Ergebnis der Bewertung kommen auch Bertrams et al. (2020) „Für weitgehend homogenes Steinsalz können in allen relevanten Teufen grundsätzlich günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen erwartet werden.“ sowie Lux & Eberth (2002) und Lux et al. (2002) in ihren Arbeiten „Für Salzgestein der hier unterstellten Gebirgsklasse mittlere Kriechfähigkeit können in Verbindung mit den angesetzten Kriterien/ eingeschätzten Grenzwerten ausgehend von einer Teufe z größer gleich 600 m</p> <ul style="list-style-type: none"> - bis in eine Teufe von 1100 m für den Lastfall Ausbruch und - bis in eine Teufe von 1000 m für den Lastfall Ausbruch/ Temperaturänderung <p>„günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen“ abgeleitet werden.“</p>

Tabelle A. 20: Bewertung der Indikatoren für das Kriterium nach Anlage 6 (zu § 24 Abs. 4) StandAG nach Referenzdatensatz für Steinsalz

Indikatoren	Bewertung des Indikators nach Referenzdatensatz für Steinsalz
Verhältnis repräsentative Gebirgsdurchlässigkeit/ repräsentative Gesteinsdurchlässigkeit	Bis In-situ-Messwerte vorliegen wird davon ausgegangen, dass repräsentative Gebirgsdurchlässigkeit/repräsentative Gesteinsdurchlässigkeit den gleichen Wert haben. Dementsprechend ist das Verhältnis beider Messgrößen 1, also immer kleiner als 10. Deshalb wird auf Grundlage des Referenzdatensatzes Steinsalz der Indikator „Verhältnis repräsentative Gebirgsdurchlässigkeit / repräsentative Gesteinsdurchlässigkeit“ für alle identifizierten Gebiete der Wirtsgesteine „Steinsalz

Indikatoren	Bewertung des Indikators nach Referenzdatensatz für Steinsalz
	in steiler Lagerung“ und „stratiforme Steinsalzformationen“ mit „günstig“ bewertet.
Erfahrungen über die Barrierewirksamkeit der Gebirgsformationen	Auf Grundlage des Referenzdatensatzes Steinsalz wird der Indikator „Erfahrungen über die Barrierewirksamkeit der Gebirgsformationen“ für alle identifizierten Gebiete der Wirtsgesteine „Steinsalz in steiler Lagerung“ und „stratiforme Steinsalzformationen“ mit „günstig“ bewertet. Die Bewertung basiert auf Erfahrungen mit Steinsalz wie z. B. Kavernenspeicherung.
Rückbildung der Sekundärpermeabilität durch Risschließung	Steinsalz als kriechfähiges Gestein neigt zur Risschließung. Auf Grundlage des Referenzdatensatzes Steinsalz wird der Indikator „Rückbildung der Sekundärpermeabilität durch Risschließung“ für alle identifizierten Gebiete der Wirtsgesteine „Steinsalz in steiler Lagerung“ und „stratiforme Steinsalzformationen“ mit „günstig“ bewertet.
Rückbildung der mechanischen Eigenschaften durch Rissverheilung	Bei Steinsalz tritt die Verheilung durch geochemische Rekrystallisation auf. Auf Grundlage des Referenzdatensatzes Steinsalz wird der Indikator „Rückbildung der mechanischen Eigenschaften durch Rissverheilung“ für alle identifizierten Gebiete der Wirtsgesteine „Steinsalz in steiler Lagerung“ und „stratiforme Steinsalzformationen“ mit „günstig“ bewertet.

Tabelle A. 21: Bewertung der Indikatoren für das Kriterium nach Anlage 7 (zu § 24 Abs. 5) StandAG nach Referenzdatensatz für Steinsalz

Indikatoren	Bewertung des Indikators nach Referenzdatensatz für Steinsalz
Wasserangebot im Einlagerungsbereich	<p>Generell ist Steinsalz als trocken zu betrachten. Da noch kein Endlagerkonzept festgelegt ist und die Menge an korrodierbaren Material noch unbekannt ist, wird für die Anwendung eine generische Modellberechnung nach Rübel et al. (2013) herangezogen. Im späteren Verlauf des Verfahrens werden spezifischere Untersuchungen durchgeführt.</p> <p>Die mobilisierbare vorhandene Wassermenge in Steinsalz reicht nur für die Korrosion eines geringen Anteils des zu erwartenden Metalls aus und es kann keine vollständige Korrosion stattfinden. Zum jetzigen Zeitpunkt liegen keine detaillierten Informationen über den Wassergehalt in den identifizierten Gebieten vor und es gibt keine standortspezifischen Festlegungen der Materialien der technischen Barrieren. Dementsprechend wird zum jetzigen Zeitpunkt angenommen, dass eine günstige Situation in Bezug auf Gasbildung grundsätzlich möglich ist.</p>

Indikatoren	Bewertung des Indikators nach Referenzdatensatz für Steinsalz
	Auf Grundlage des Referenzdatensatzes Steinsalz wird der Indikator „Wasserangebot im Einlagerungsbereich“ für alle identifizierten Gebiete der Wirtsgesteine „Steinsalz in steiler Lagerung“ und „stratiforme Steinsalzformationen“ mit „günstig“ bewertet.

Tabelle A. 22: Bewertung der Indikatoren für das Kriterium nach Anlage 8 (zu § 24 Abs. 5) StandAG nach Referenzdatensatz für Steinsalz

Indikatoren	Bewertung des Indikators nach Referenzdatensatz für Steinsalz
Neigung zur Bildung wärmeinduzierter Sekundärpermeabilitäten	Auf Grundlage des Referenzdatensatzes Steinsalz wird der Indikator „Neigung zur Bildung wärmeinduzierter Sekundärpermeabilitäten“ für alle identifizierten Gebiete der Wirtsgesteine „Steinsalz in steiler Lagerung“ und „stratiforme Steinsalzformationen“ mit „günstig“ bewertet. Die Bewertung basiert auf ermittelten positiven thermischen Expansionskoeffizienten in Steinsalzformationen.
Temperaturstabilität hinsichtlich Mineralumwandlungen	Da davon ausgegangen wird, dass ein Endlager im möglichst reinen Steinsalz realisiert wird, welches hauptsächlich aus Halit besteht und kristallwasserfrei ist, sind Entwässerungen von Salzhydraten und somit Mineralumwandlungen unter 100 °C (nach § 27 Abs. 4 (StandAG)) ausgeschlossen. Auf Grundlage des Referenzdatensatzes Steinsalz wird der Indikator „Temperaturstabilität hinsichtlich Mineralumwandlungen“ für alle identifizierten Gebiete der Wirtsgesteine „Steinsalz in steiler Lagerung“ und „stratiforme Steinsalzformationen“ mit „günstig“ bewertet.

Tabelle A. 23: Bewertung der Indikatoren für das Kriterium nach Anlage 9 (zu § 24 Abs. 5) StandAG nach Referenzdatensatz für Steinsalz

Indikatoren	Bewertung des Indikators nach Referenzdatensatz für Steinsalz
Sorptionkoeffizienten für die betreffenden langzeitrelevanten Radionuklide	Im Steinsalz ist keine Sorption zu erwarten. Auf Grundlage des Referenzdatensatzes Steinsalz wird der Indikator „Sorptionkoeffizienten für die betreffenden langzeitrelevanten Radionuklide“ daher für alle identifizierten Gebiete der Wirtsgesteine „Steinsalz in steiler Lagerung“ und „stratiforme Steinsalzformationen“ mit „weniger günstig“ bewertet.

Indikatoren	Bewertung des Indikators nach Referenzdatensatz für Steinsalz
Gehalt an Mineralphasen mit großer reaktiver Oberfläche	<p>Da der Referenzdatensatz auf reinem Steinsalz basiert, welches hauptsächlich aus Halit besteht, sind keine großen Mengen an Mineralphasen mit großer reaktiver Oberfläche wie Tonminerale sowie Eisen- und Mangan-Hydroxide und -Oxidhydrate zu erwarten.</p> <p>Auf Grundlage des Referenzdatensatzes Steinsalz wird der Indikator „Gehalt an Mineralphasen mit großer reaktiver Oberfläche“ daher für alle identifizierten Gebiete der Wirtsgesteine „Steinsalz in steiler Lagerung“ und „stratiforme Steinsalzformationen“ mit „nicht günstig“ bewertet.</p>
Ionenstärke des Grundwassers	<p>Lösungen innerhalb Salzgesteinsformationen sind von hohen Ionenstärken geprägt.</p> <p>Auf Grundlage des Referenzdatensatzes Steinsalz wird der Indikator „Ionenstärke des Grundwassers“ daher für alle identifizierten Gebiete der Wirtsgesteine „Steinsalz in steiler Lagerung“ und „stratiforme Steinsalzformationen“ mit „günstig“ bewertet.</p>
Öffnungsweite der Gesteinsporen im Nanobereich	<p>Im Steinsalz ist kein durchströmbarer Porenraum zu erwarten und somit wird auch eine Filterung von Kolloiden gewährleistet. Darüber hinaus weisen die präsentierten Arbeiten auf Porengrößen hin, welche durchschnittlich im Nanometerbereich liegen.</p> <p>Auf Grundlage des Referenzdatensatzes Steinsalz wird der Indikator „Öffnungsweite der Gesteinsporen im Nanobereich“ daher für alle identifizierten Gebiete der Wirtsgesteine „Steinsalz in steiler Lagerung“ und „stratiforme Steinsalzformationen“ mit „günstig“ bewertet.</p>

Tabelle A. 24: Bewertung der Indikatoren für das Kriterium nach Anlage 10 (zu § 24 Abs. 5) StandAG nach Referenzdatensatz für Steinsalz

Indikatoren	Bewertung des Indikators nach Referenzdatensatz für Steinsalz
Chemisches Gleichgewicht zwischen dem Wirtsgestein im Bereich des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und dem darin enthaltenen tiefen Grundwasser	<p>Durch eine ausreichende Mächtigkeit des Steinsalzes und der geringen hydraulischen Durchlässigkeit ist ein chemisches Gleichgewicht zu erwarten. Auf Grundlage des Referenzdatensatzes Steinsalz wird der Indikator „Chemischen Gleichgewicht zwischen dem Wirtsgestein im Bereich des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und dem darin enthaltenen tiefen Grundwasser“ daher für alle identifizierten Gebiete der Wirtsgesteine „Steinsalz in steiler Lagerung“ und „stratiforme Steinsalzformationen“ mit „günstig“ bewertet.</p>

Indikatoren	Bewertung des Indikators nach Referenzdatensatz für Steinsalz
<p>Neutrale bis leicht alkalische Bedingungen (pH-Wert 7 bis 8) im Bereich des Tiefenwassers</p>	<p>Für Tiefenwässer im Steinsalz sind neutrale bis saure Bedingungen zu erwarten. Damit ist die im StandAG vorgegebene Voraussetzung von neutralen bis leicht alkalischen Bedingungen nicht erfüllt. Auf Grundlage des Referenzdatensatzes Steinsalz wird der Indikator „Neutrale bis leicht alkalische Bedingungen (pH-Wert 7 bis 8) im Bereich des Tiefenwassers“ daher für alle identifizierten Gebiete der Wirtsgesteine „Steinsalz in steiler Lagerung“ und „stratiforme Steinsalzformationen“ mit „nicht günstig“ bewertet.</p>
<p>Anoxisch-reduzierendes Milieu im Bereich des Tiefenwassers</p>	<p>Im Steinsalz wird ein anoxisch-reduzierendes Milieu im Einlagerungsbereich erwartet. Auf Grundlage des Referenzdatensatzes Steinsalz wird der Indikator „Anoxisch-reduzierendes Milieu im Bereich des Tiefenwassers“ daher für alle identifizierten Gebiete der Wirtsgesteine „Steinsalz in steiler Lagerung“ und „stratiforme Steinsalzformationen“ mit „günstig“ bewertet.</p>
<p>Möglichst geringer Gehalt an Kolloiden und Komplexbildnern im Tiefenwasser</p>	<p>Im Steinsalz sind nur geringe Mengen an Kolloiden und Komplexbildnern zu erwarten. Auf Grundlage des Referenzdatensatzes Steinsalz wird der Indikator „Möglichst geringer Gehalt an Kolloiden und Komplexbildnern im Tiefenwasser“ daher für alle identifizierten Gebiete der Wirtsgesteine „Steinsalz in steiler Lagerung“ und „stratiforme Steinsalzformationen“ mit „günstig“ bewertet.</p>
<p>Geringe Karbonatkonzentration im Tiefenwasser</p>	<p>Der zu erwartende Gehalt an Karbonaten in Tiefenwässern in Steinsalz ist gering. Auf Grundlage des Referenzdatensatzes Steinsalz wird der Indikator „Geringe Karbonatkonzentration im Tiefenwasser“ daher für alle identifizierten Gebiete der Wirtsgesteine „Steinsalz in steiler Lagerung“ und „stratiforme Steinsalzformationen“ mit „günstig“ bewertet.</p>

Anhang 2 Bewertung der Kriterien nach Referenzdatensätzen (BGE 2020b)

Anhang 2.1 Bewertung der Kriterien nach Referenzdatensatz für Tongestein

Tabelle A. 25: Bewertung des Kriteriums „Transport radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich“ aus Anlage 1 (zu § 24 Abs. 3) StandAG nach Referenzdatensatz für Tongestein

Bewertung des Kriteriums „Transport radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich“ nach Referenzdatensatz für Tongestein

Die Bewertung des Kriteriums aus Anlage 1 (zu § 24 Abs. 3) StandAG ergibt sich aus den Einzelbewertungen der Indikatoren „Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers [mm/a]“ („günstig“), „Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit des Gesteinstyps [m/s]“ („günstig“), „Charakteristischer effektiver Diffusionskoeffizient des Gesteinstyps für tritiiertes Wasser (HTO) bei 25 °C [m²/s]“ („günstig“), „Absolute Porosität“ („günstig“) und „Verfestigungsgrad“ („günstig“). Auf Grundlage des Referenzdatensatzes Tongestein wird das Kriterium für alle identifizierten Gebiete des Wirtsgesteins Tongestein mit „günstig“ bewertet.

Tabelle A. 26: Bewertung des Kriteriums „günstige gebirgsmechanische Eigenschaften“ aus Anlage 5 (zu § 24 Abs. 4) StandAG nach Referenzdatensatz für Tongestein

Bewertung des Kriteriums „Günstige gebirgsmechanische Eigenschaften“ nach Referenzdatensatz für Tongestein

Die Bewertung des Kriteriums aus Anlage 5 (zu § 24 Abs. 4) StandAG entspricht der Bewertung des schlechter bewerteten Indikators für Anlage 5. Daher wird auf Grundlage des Referenzdatensatzes Tongestein das Kriterium für alle identifizierten Gebiete des Wirtsgesteins Tongestein mit „nicht günstig“ bewertet. Die Bewertung nach dem schlechter bewerteten Indikator beruht darauf, dass auch mit zusätzlichen ortspezifischen Erkundungen nicht zu erwarten ist, dass Tongestein ohne tragenden Ausbau die Beanspruchung aus Auffahrung und Betrieb aufnehmen kann.

Tabelle A. 27: *Bewertung des Kriteriums „Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten“ aus Anlage 6 (zu § 24 Abs. 4) StandAG nach Referenzdatensatz für Tongestein*

Bewertung des Kriteriums „Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten“ nach Referenzdatensatz für Tongestein
Die Bewertung des Kriteriums aus Anlage 6 (zu § 24 Abs. 4) StandAG ergibt sich aus den Einzelbewertungen der Indikatoren „Verhältnis repräsentative Gebirgsdurchlässigkeit/repräsentative Gesteinsdurchlässigkeit“ („günstig“), „Erfahrungen über die Barrierewirksamkeit der Gebirgsformationen in folgenden Erfahrungsbereichen“ („günstig“), „Rückbildung der Sekundärpermeabilität durch Risschließung“ („günstig“) und „Rückbildung der mechanischen Eigenschaften durch Rissverheilung“ („günstig“). Da alle Indikatoren als „günstig“ bewertet werden, wird das Kriterium auf Grundlage des Referenzdatensatzes Tongestein für alle identifizierten Gebiete des Wirtsgesteins Tongestein mit „günstig“ bewertet.

Tabelle A. 28: *Bewertung des Kriteriums „Gasbildung“ aus Anlage 7 (zu § 24 Abs. 5) StandAG nach Referenzdatensatz für Tongestein*

Bewertung des Kriteriums „Gasbildung“ nach Referenzdatensatz für Tongestein
Die Bewertung des Kriteriums aus Anlage 7 (zu § 24 Abs. 5) StandAG ergibt sich aus der Bewertung des Indikators „Wasserangebot im Einlagerungsbereich“ („günstig“). Auf Grundlage des Referenzdatensatzes Tongestein wird das Kriterium demnach für alle identifizierten Gebiete des Wirtsgesteins Tongestein mit „günstig“ bewertet.

Tabelle A. 29: *Bewertung des Kriteriums „Temperaturverträglichkeit“ aus Anlage 8 (zu § 24 Abs. 5) StandAG nach Referenzdatensatz für Tongestein*

Bewertung des Kriteriums „Temperaturverträglichkeit“ nach Referenzdatensatz für Tongestein
Die Bewertung des Kriteriums aus Anlage 8 (zu § 24 Abs. 5) StandAG ergibt sich aus der Bewertung der Indikatoren „Neigung zu wärmeinduzierten Sekundärpermeabilitäten“ („günstig“) und „Temperaturstabilität hinsichtlich Mineralumwandlungen“ („günstig“). Da beide Indikatoren als „günstig“ bewertet werden, wird das Kriterium auf Grundlage des Referenzdatensatzes Tongestein für alle identifizierten Gebiete des Wirtsgesteins Tongestein mit „günstig“ bewertet.

Tabelle A. 30: *Bewertung des Kriteriums „Rückhaltevermögen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich“ aus Anlage 9 (zu § 24 Abs. 5) StandAG nach Referenzdatensatz für Tongestein*

Bewertung des Kriteriums „Rückhaltevermögen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich“ nach Referenzdatensatz für Tongestein
Die Bewertung des Kriteriums aus Anlage 9 (zu § 24 Abs. 5) StandAG ergibt sich aus den Einzelbewertungen der Indikatoren „Sorptionskoeffizienten für die betreffenden langzeitrelevanten Radionuklide“ („günstig“), „Gehalt an Mineralphasen mit reaktiver Oberfläche“ („günstig“), „Ionenstärke des Grundwassers“ („günstig“) und „Öffnungsweite der Gesteinsporen“ („günstig“). Demnach werden alle Indikatoren mit „günstig“ bewertet. Sowie Sorptionskoeffizienten im Tongestein, als auch die spezifische Ionenstärke können regional und stratigraphisch variieren und sind daher von standortspezifischen Prüfungen abhängig. Ein hoher Gehalt an Mineralphasen mit reaktiver Oberfläche und einer Öffnungsweite der Gesteinsporen im Nanobereich werden auch bei regionalen oder stratigraphischen Schwankungen erfüllt. Auf Grundlage des Referenzdatensatzes Tongestein wird das Kriterium dementsprechend für alle identifizierten Gebiete des Wirtsgesteins Tongestein mit „günstig“ bewertet

Tabelle A. 31: *Bewertung des Kriteriums „hydrochemische Verhältnisse“ aus Anlage 10 (zu § 24 Abs. 5) StandAG nach Referenzdatensatz für Tongestein*

Bewertung des Kriteriums „Hydrochemische Verhältnisse“ nach Referenzdatensatz für Tongestein
Die Bewertung des Kriteriums aus Anlage 10 (zu § 24 Abs. 5) StandAG ergibt sich aus den Einzelbewertungen der Indikatoren „Chemisches Gleichgewicht zwischen dem Wirtsgestein im Bereich des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und dem darin enthaltenen tiefen Grundwasser“ („günstig“), „Neutrale bis leicht alkalische Bedingungen (pH-Wert 7 bis 8) im Bereich des Tiefenwassers“ („günstig“), „Anoxisch reduzierendes Milieu im Bereich des Tiefenwassers“ („günstig“), „Möglichst geringer Gehalt an Kolloiden und Komplexbildnern im Tiefenwasser“ („günstig“) und „Geringe Karbonatkonzentration im Tiefenwasser“ („günstig“). Alle Indikatoren sind als günstig anzunehmen. Zudem sind standortspezifische Informationen notwendig, besonders für die Indikatoren „Chemisches Gleichgewicht zwischen dem Wirtsgestein im Bereich des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und dem darin enthaltenen tiefen Grundwasser“ und „Geringe Karbonatkonzentration im Tiefenwasser“. Auf Grundlage des Referenzdatensatzes Tongestein wird das Kriterium dementsprechend für alle identifizierten Gebiete des Wirtsgesteins Tongestein mit „günstig“ bewertet.

Anhang 2.2 Bewertung der Kriterien nach dem Referenzdatensatz für kristallines Wirtsgestein

Tabelle A. 32: *Bewertung des Kriteriums „Transport radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich“ aus Anlage 1 (zu § 24 Abs. 3) StandAG nach Referenzdatensatz für kristallines Wirtsgestein*

Bewertung des Kriteriums „Transport radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich“ nach Referenzdatensatz für kristallines Wirtsgestein
Die Bewertung des Kriteriums aus der Anlage 1 (zu § 24 Abs. 3) StandAG ergibt sich aus den Einzelbewertungen der Indikatoren „Grundwasserangebot“ („günstig“), „Grundwasserströmung“ („günstig“) und „Diffusionsgeschwindigkeit“ („günstig“). Auf Grundlage des Referenzdatensatzes für kristalline Wirtsgesteine wird das Kriterium für alle identifizierten Gebiete kristalliner Wirtsgesteine mit „günstig“ bewertet.

Tabelle A. 33: *Bewertung des Kriteriums „Bewertung der räumlichen Charakterisierbarkeit“ aus Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG nach Referenzdatensatz für kristallines Wirtsgestein*

Bewertung des Kriteriums „Bewertung der räumlichen Charakterisierbarkeit“ nach Referenzdatensatz für kristallines Wirtsgestein
Die Bewertung des Kriteriums aus Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG ergibt sich aus den Einzelbewertungen der Indikatoren „Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich“ („günstig“), „Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften“ („günstig“), „Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit“ („günstig“) und „Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)“ (Intrusivgesteine: „günstig“, Metamorphe Gesteine: „bedingt günstig“). Metamorphe Gesteine wurden aufgrund ihrer typischen Wechsellagerungen für den Indikator „Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)“ als „bedingt günstig“ bewertet. Diese Wechsellagerung ist jedoch bei einer Standorterkundung gut zu identifizieren und muss die räumliche Charakterisierbarkeit des Gesteins nicht zwangsläufig negativ beeinflussen. Alle weiteren Indikatoren sind bei fehlenden Standortinformation für gering geklüftetes kristallines Wirtsgestein als „günstig“ anzunehmen. Auf Grundlage des Referenzdatensatzes für kristalline Wirtsgesteine wird das Kriterium dementsprechend für alle identifizierten Gebiete kristalliner Wirtsgesteine mit „günstig“ bewertet. Es ist jedoch wichtig anzumerken, dass in Abhängigkeit von der Genese des Gesteins und seiner tektonischen Überprägung für einzelne Standorte aufgrund stark variierender Eigenschaften oder schlechter Erhebbarkeit eine Bewertung als „weniger günstig“ möglich ist. Diese Bewertung kann jedoch erst bei genauerem Kenntnisstand von einem Standort und nicht im Rahmen eines Referenzdatensatzes erfolgen.

Tabelle A. 34: *Bewertung des Kriteriums „Langfristige Stabilität der günstigen Verhältnisse“ aus Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG nach Referenzdatensatz für kristallines Wirtsgestein*

Bewertung des Kriteriums „Langfristige Stabilität der günstigen Verhältnisse“ nach Referenzdatensatz für kristallines Wirtsgestein
Die Bewertung des Kriteriums aus Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG ergibt sich aus den Einzelbewertungen der Indikatoren „Zeitspanne über die sich die Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht wesentlich verändert hat“ („günstig“), „Zeitspanne über die sich die Ausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht wesentlich verändert hat“ („günstig“) und „Zeitspanne über die sich die Gebirgsdurchlässigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht wesentlich verändert hat“ („günstig“). Alle Indikatoren werden als „günstig“ bewertet. Demnach wird das Kriterium auf Grundlage des Referenzdatensatzes für kristallines Wirtsgestein für alle identifizierten Gebiete kristalliner Wirtsgesteine mit „günstig“ bewertet.

Tabelle A. 35: *Bewertung des Kriteriums „günstige gebirgsmechanische Eigenschaften“ aus Anlage 5 (zu § 24 Abs. 4) StandAG nach Referenzdatensatz für kristallines Wirtsgestein*

Bewertung des Kriteriums „Günstige gebirgsmechanische Eigenschaften“ nach Referenzdatensatz für kristallines Wirtsgestein
Da für die Bewertung des Kriteriums aus Anlage 5 (zu § 24 Abs. 4) StandAG beide Indikatoren als „günstig“ bewertet werden, wird das Kriterium auf Grundlage des Referenzdatensatzes für kristallines Wirtsgestein für alle identifizierten Gebiete kristalliner Wirtsgesteine mit „günstig“ bewertet.

Tabelle A. 36: *Bewertung des Kriteriums „Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten“ aus Anlage 6 (zu § 24 Abs. 4) StandAG nach Referenzdatensatz für kristallines Wirtsgestein*

Bewertung des Kriteriums „Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten“ nach Referenzdatensatz für kristallines Wirtsgestein
Die Bewertung des Kriteriums aus Anlage 6 (zu § 24 Abs. 4) StandAG ergibt sich aus den Einzelbewertungen der Indikatoren „Verhältnis repräsentative Gebirgsdurchlässigkeit/repräsentative Gesteinsdurchlässigkeit“ („günstig“), „Erfahrungen über die Barrierewirksamkeit der Gebirgsformationen in folgenden Erfahrungsbereichen“ („günstig“), „Rückbildung der Sekundärpermeabilität durch Risssschließung“ („weniger günstig“) und „Rückbildung der mechanischen Eigenschaften durch Rissverheilung“ („weniger günstig“). Da zwei Indikatoren als „günstig“ und zwei Indikatoren als „weniger günstig“ bewertet werden, wird das Kriterium auf Grundlage des Referenzdatensatzes für kristallines Wirtsgestein für alle identifizierten Gebiete kristalliner Wirtsgesteine mit „bedingt günstig“ bewertet. Die Bewertung „bedingt günstig“ wird getroffen, da die günstige Bewertung zweier Indikatoren nicht zu vernachlässigen ist. Darüber hinaus wird aufgrund fehlender ortsspezifischer Information die Bewertung weg vom schlechtesten Indikator hin zu einer besseren Bewertung getroffen.

Tabelle A. 37: *Bewertung des Kriteriums „Gasbildung“ aus Anlage 7 (zu § 24 Abs. 5) StandAG nach Referenzdatensatz für kristallines Wirtsgestein*

Bewertung des Kriteriums „Gasbildung“ nach Referenzdatensatz für kristallines Wirtsgestein
Die Bewertung des Kriteriums aus Anlage 7 (zu § 24 Abs. 5) StandAG ergibt sich aus der Bewertung des Indikators „Wasserangebot im Einlagerungsbereich“ („günstig“). Demnach wird das Kriterium auf Grundlage des Referenzdatensatzes für kristallines Wirtsgestein für alle identifizierten Gebiete kristalliner Wirtsgesteine mit „günstig“ bewertet.

Tabelle A. 38: *Bewertung des Kriteriums „Temperaturverträglichkeit“ aus Anlage 8 (zu § 24 Abs. 5) StandAG nach Referenzdatensatz für kristallines Wirtsgestein*

Bewertung des Kriteriums „Temperaturverträglichkeit“ nach Referenzdatensatz für kristallines Wirtsgestein
Die Bewertung des Kriteriums aus Anlage 8 (zu § 24 Abs. 5) StandAG ergibt sich aus der Bewertung der Indikatoren „Neigung zu wärmeinduzierten Sekundärpermeabilitäten“ („günstig“) und „Temperaturstabilität hinsichtlich Mineralumwandlungen“ („günstig“). Demnach wird das Kriterium auf Grundlage des Referenzdatensatzes für kristallines Wirtsgestein für alle identifizierten Gebiete kristalliner Wirtsgesteine mit „günstig“ bewertet.

Tabelle A. 39: *Bewertung des Kriteriums „Rückhaltevermögen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich“ aus Anlage 9 (zu § 24 Abs. 5) StandAG nach Referenzdatensatz für kristallines Wirtsgestein*

Bewertung des Kriteriums „Rückhaltevermögen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich“ nach Referenzdatensatz für kristallines Wirtsgestein
<p>Die Bewertung des Kriteriums aus zu Anlage 9 (zu § 24 Abs. 5) StandAG ergibt sich aus den Einzelbewertungen der Indikatoren „Sorptionskoeffizienten für die betreffenden langzeitrelevanten Radionuklide“ („bedingt günstig“), „Gehalt an Mineralphasen mit reaktiver Oberfläche“ („nicht günstig“), „Ionenstärke des Grundwassers“ („günstig“) und „Öffnungsweite der Gesteinsporen“ („günstig“). Demnach werden zwei Indikatoren mit „günstig“, ein Indikator mit „nicht günstig“ und ein Indikator mit „bedingt günstig“ bewertet. Da nur zwei Indikatoren der Bewertung „günstig“ entsprechen, diese nicht überwiegen und nicht erwartet wird, dass ortsspezifische Erkundungen zu einer besseren Bewertung führen, lässt sich das gesamte Kriterium nicht mit „günstig“ bewerten. Der Indikator „Gehalt an Mineralphasen mit reaktiver Oberfläche“ lässt jedoch keine Unterscheidung in „weniger günstig“ oder „bedingt günstig“ zu. Eine Bewertung mit „nicht günstig“ schließt beide Bewertungsoptionen „bedingt günstig“ und „weniger günstig“ mit ein, daher wird das Kriterium auf Grundlage des Referenzdatensatzes für kristallines Wirtsgestein für alle identifizierten Gebiete kristalliner Wirtsgesteine mit „nicht günstig“ bewertet.</p>

Tabelle A. 40: *Bewertung des Kriteriums „hydrochemische Verhältnisse“ aus Anlage 10 (zu § 24 Abs. 5) StandAG nach Referenzdatensatz für kristallines Wirtsgestein*

Bewertung des Kriteriums „Hydrochemische Verhältnisse“ nach Referenzdatensatz für kristallines Wirtsgestein
<p>Die Bewertung des Kriteriums aus Anlage 10 (zu § 24 Abs. 5) StandAG ergibt sich aus den Einzelbewertungen der Indikatoren „Chemisches Gleichgewicht zwischen dem Wirtsgestein im Bereich des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und dem darin enthaltenen tiefen Grundwasser“ („nicht günstig“), „Neutrale bis leicht alkalische Bedingungen (pH Wert 7 bis 8) im Bereich des Tiefenwassers“ („günstig“), „Anoxisch reduzierendes Milieu im Bereich des Tiefenwassers“ („günstig“), „Möglichst geringer Gehalt an Kolloiden und Komplexbildnern im Tiefenwasser“ („günstig“) und „Geringe Karbonatkonzentration im Tiefenwasser“ („günstig“). Der Indikator „Chemisches Gleichgewicht zwischen dem Wirtsgestein im Bereich des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und dem darin enthaltenen tiefen Grundwasser“ wird für kristallines Wirtsgestein in der Regel nicht erfüllt. Die Lösungsraten sind für die typischen Minerale des granitischen Grundgebirges jedoch sehr gering. Die Langzeitsicherheit des Endlagersystems wird daher vermutlich nicht durch Lösungsprozesse des Wirtsgesteins gefährdet. Leichter lösliche Minerale, wie Gangmineralisationen, befinden sich dagegen in einem gering geklüfteten kristallinem Wirtsgestein wahrscheinlich in einem Gleichgewichtszustand mit dem Tiefenwasser. Alle weiteren Indikatoren sind bei fehlenden Standortinformation für gering geklüftetes kristallines Wirtsgestein als günstig anzunehmen. Dementsprechend wird das Kriterium auf Grundlage des Referenzdatensatzes für kristallines Wirtsgestein für alle identifizierten Gebiete kristalliner Wirtsgesteine mit „günstig“ bewertet.</p>

Anhang 2.3 Bewertung der Kriterien nach dem Referenzdatensatz Steinsalz

Tabelle A. 41: Bewertung des Kriteriums „Transport radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich“ aus Anlage 1 (zu § 24 Abs. 3) StandAG nach Referenzdatensatz für Steinsalz

Bewertung des Kriteriums „Transport radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich“ nach Referenzdatensatz für Steinsalz

Die Bewertung des Kriteriums aus Anlage 1 (zu § 24 Abs. 3) StandAG ergibt sich aus den Einzelbewertungen der Indikatoren „Grundwasserangebot“ („günstig“), „Grundwasserströmung“ („günstig“) und „Diffusionsgeschwindigkeit“ („günstig“). Dementsprechend erfolgt die Bewertung des Kriteriums auf Grundlage des Referenzdatensatzes Steinsalz für alle identifizierten Gebiete der Wirtsgesteine „Steinsalz in steiler Lagerung“ und „stratiforme Steinsalzformationen“ mit „günstig“.

Tabelle A. 42: Bewertung des Kriteriums „Langfristige Stabilität der günstigen Verhältnisse“ aus Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG nach Referenzdatensatz für Steinsalz

Bewertung des Kriteriums „Langfristige Stabilität der günstigen Verhältnisse“ nach Referenzdatensatz für Steinsalz

Die Bewertung des Kriteriums aus Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG ergibt sich aus den Einzelbewertungen der Indikatoren „Zeitspanne, über die sich die Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht wesentlich verändert hat“ („günstig“), „Zeitspanne, über die sich die Ausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht wesentlich verändert hat“ („günstig“) und „Zeitspanne, über die sich die Gebirgsdurchlässigkeit nicht wesentlich verändert hat“ („günstig“). Da alle der drei Indikatoren mit „günstig“ bewertet werden, erfolgt eine Bewertung des Kriteriums auf Grundlage des Referenzdatensatzes Steinsalz für alle identifizierten Gebiete der Wirtsgesteine „Steinsalz in steiler Lagerung“ und „stratiforme Steinsalzformationen“ mit „günstig“.

Tabelle A. 43: *Bewertung des Kriteriums „günstige gebirgsmechanische Eigenschaften“ aus Anlage 5 (zu § 24 Abs. 4) StandAG nach Referenzdatensatz für Steinsalz*

Bewertung des Kriteriums „Günstige gebirgsmechanische Eigenschaften“ nach Referenzdatensatz für Steinsalz
Da für die Bewertung des Kriteriums aus Anlage 5 (zu § 24 Abs. 4) StandAG beide Indikatoren („günstig“) gemeinsam betrachtet werden, erfolgt die Bewertung des Kriteriums auf Grundlage des Referenzdatensatzes Steinsalz für alle identifizierten Gebiete der Wirtsgesteine „Steinsalz in steiler Lagerung“ und „stratiforme Steinsalzformationen“ mit „günstig“.

Tabelle A. 44: *Bewertung des Kriteriums „Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten“ aus Anlage 6 (zu § 24 Abs. 4) StandAG nach Referenzdatensatz für Steinsalz*

Bewertung des Kriteriums „Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten“ nach Referenzdatensatz für Steinsalz
Die Bewertung des Kriteriums aus Anlage 6 (zu § 24 Abs. 4) StandAG ergibt sich aus den Einzelbewertungen der Indikatoren „Verhältnis repräsentative Gebirgsdurchlässigkeit/repräsentative Gesteinsdurchlässigkeit“ („günstig“), „Erfahrungen über die Barrierewirksamkeit der Gebirgsformationen in folgenden Erfahrungsbereichen“ („günstig“), „Rückbildung der Sekundärpermeabilität durch Risschließung“ („günstig“) und „Rückbildung der mechanischen Eigenschaften durch Rissverheilung“ („günstig“). Da alle Indikatoren als „günstig“ bewertet werden, ergibt sich eine Bewertung des Kriteriums auf Grundlage des Referenzdatensatzes Steinsalz für alle identifizierten Gebiete der Wirtsgesteine „Steinsalz in steiler Lagerung“ und „stratiforme Steinsalzformationen“ mit „günstig“.

Tabelle A. 45: *Bewertung des Kriteriums „Gasbildung“ aus Anlage 7 (zu § 24 Abs. 5) StandAG nach Referenzdatensatz für Steinsalz*

Bewertung des Kriteriums „Gasbildung“ nach Referenzdatensatz für Steinsalz
Die Bewertung des Kriteriums aus Anlage 7 (zu § 24 Abs. 5) StandAG ergibt sich aus der Bewertung des Indikators „Wasserangebot im Einlagerungsbereich“ („günstig“). Daraus ergibt sich eine Bewertung des Kriteriums auf Grundlage des Referenzdatensatzes Steinsalz für alle identifizierten Gebiete der Wirtsgesteine „Steinsalz in steiler Lagerung“ und „stratiforme Steinsalzformationen“ mit „günstig“.

Tabelle A. 46: *Bewertung des Kriteriums „Temperaturverträglichkeit“ aus Anlage 8 (zu § 24 Abs. 5) StandAG nach Referenzdatensatz für Steinsalz*

Bewertung des Kriteriums „Temperaturverträglichkeit“ nach Referenzdatensatz für Steinsalz
Die Bewertung des Kriteriums aus Anlage 8 (zu § 24 Abs. 5) StandAG ergibt sich aus der Bewertung der Indikatoren „Neigung zu wärmeinduzierten Sekundärpermeabilitäten“ („günstig“) und „Temperaturstabilität hinsichtlich Mineralumwandlungen“ („günstig“). Demnach ergibt sich eine Bewertung des Kriteriums auf Grundlage des Referenzdatensatzes Steinsalz für alle identifizierten Gebiete der Wirtsgesteine „Steinsalz in steiler Lagerung“ und „stratiforme Steinsalzformationen“ mit „günstig“.

Tabelle A. 47: *Bewertung des Kriteriums „Rückhaltevermögen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich“ aus Anlage 9 (zu § 24 Abs. 5) StandAG nach Referenzdatensatz für Steinsalz*

Bewertung des Kriteriums „Rückhaltevermögen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich“ nach Referenzdatensatz für Steinsalz
Die Bewertung des Kriteriums aus Anlage 9 (zu § 24 Abs. 5) StandAG ergibt sich aus den Einzelbewertungen der Indikatoren „Sorptionskoeffizienten für die betreffenden langzeitrelevanten Radionuklide“ („weniger günstig“), „Gehalt an Mineralphasen mit reaktiver Oberfläche“ („nicht günstig“), „Ionenstärke des Grundwassers“ („günstig“) und „Öffnungsweite der Gesteinsporen“ („günstig“). Da nur zwei Indikatoren der Bewertung „günstig“ entsprechen, diese nicht überwiegen und nicht erwartet wird, dass gebietsspezifische Erkundungen zu einer besseren Bewertung führen, lässt sich das gesamte Kriterium nicht mit „günstig“ bewerten. Der Indikator „Gehalt an Mineralphasen mit reaktiver Oberfläche“ lässt jedoch keine Unterscheidung in „weniger günstig“ oder „bedingt günstig“ zu. Eine Bewertung mit „nicht günstig“ schließt beide Bewertungsoptionen „bedingt günstig“ und „weniger günstig“ mit ein, daher wird das Kriterium auf Grundlage des Referenzdatensatzes Steinsalz für alle identifizierten Gebiete der Wirtsgesteine „Steinsalz in steiler Lagerung“ und „stratiforme Steinsalzformationen“ mit „nicht günstig“ bewertet.

Tabelle A. 48: *Bewertung des Kriteriums „hydrochemische Verhältnisse“ aus Anlage 10 (zu § 24 Abs. 5) StandAG nach für Referenzdatensatz Steinsalz*

Bewertung des Kriteriums „Hydrochemische Verhältnisse“ nach Referenzdatensatz für Steinsalz
<p>Die Bewertung des Kriteriums aus Anlage 10 (zu § 24 Abs. 5) StandAG ergibt sich aus den Einzelbewertungen der Indikatoren „Chemisches Gleichgewicht zwischen dem Wirtsgestein im Bereich des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und dem darin enthaltenen tiefen Grundwasser“ („günstig“), „Neutrale bis leicht alkalische Bedingungen (pH-Wert 7 bis 8) im Bereich des Tiefenwassers“ („nicht günstig“), „Anoxisch-reduzierendes Milieu im Bereich des Tiefenwassers“ („günstig“), „Möglichst geringer Gehalt an Kolloiden und Komplexbildnern im Tiefenwasser“ („günstig“) und „Geringe Karbonatkonzentration im Tiefenwasser“ („günstig“). Es ist nicht wahrscheinlich, dass sich pH-Wert-Angaben im Steinsalz durch spätere Erkundungen ändern. Daher sind die pH-Werte für die Gesamtbewertung des hydrochemischen Verhältnisses nicht zu vernachlässigen und es kann keine Gesamtbewertung als „günstig“ durchgeführt werden. Das Kriterium wird somit auf Grundlage des Referenzdatensatzes Steinsalz für alle identifizierten Gebiete der Wirtsgesteine „Steinsalz in steiler Lagerung“ und „stratiforme Steinsalzformationen“ mit „nicht günstig“ bewertet. Es ist anzumerken, dass „nicht günstig“ jegliche Bewertung zulässt – nur dass der momentanen Stand des Wissens kein „günstig“ zu erwarten lässt.</p>

Anhang 3 Ergänzungen zur Vorgehensweise der Bewertung von Anlage 2 (zu § 24 Abs. 3) StandAG (ArcGIS-Workflow für die Wirtsgesteine Tongestein, stratiformes Steinsalz sowie das kristalline Wirtsgestein)

Anhang 3.1 Indikator „Barrierenmächtigkeit [m]“

Tabelle A. 49: Wertungsgruppen und Mächtigkeitsbereiche nach Anlage 2 (zu § 24 Abs. 3) StandAG. Die Werte wurden hier verdoppelt, da die gesamte Mächtigkeit betrachtet wurde, siehe Kapitel 5.6.1.1.

günstig	bedingt günstig	weniger günstig
> 300 m	200 – 300 m	100 – 200 m

1. ASCII-Datensatz aus 3D-Modell durch Interpolation rastern und auf die Fläche des identifizierten Gebiets zuschneiden
 - a. Sicherstellen, dass IG-Fläche als ein einzelnes Shapefile vorliegt (Polygon)
 - i. Falls nicht: IG in Attributtabelle auswählen, sicherstellen, dass sonst nichts ausgewählt ist
 - ii. Rechtsklick auf Layer: Features exportieren
 - iii. Kopie des Layers enthält jetzt nur Auswahl, mit IG-Name benennen
 - b. Falls ASCII-Datensatz nicht ganzes IG abdeckt:
 - iv. IG kopieren (Rechtsklick auf Layer: Features exportieren)
 - v. neuen Layer benennen: IG_000_00_X_y_XYZ_ASCIIextent
 - vi. Reiter „Bearbeiten“: Werkzeug „Teilen“ benutzen, um IG-Fläche auf Ausdehnung ASCII-Datensatz zu beschneiden
 - vii. Dabei grob eine Grenze um die Punkte aus dem ASCII-Datensatz ziehen, das Werkzeug teilt die ausgewählte Fläche in zwei Features
 - viii. Alle neu abgeteilten Features, die außerhalb der ASCII-Abdeckung liegen, auswählen und löschen
 - c. Geoverarbeitung: IDW (3D Analyst)
 - i. Reiter Parameter: ASCII-Datensatz als Eingabe-Punkt-Features wählen
 - ii. Z-Wert-Feld: Mächtigkeit
 - iii. Ausgaberraster: Dateiname festlegen (IDW_Mächtigkeit_000_00IG_X_y_XYZ)
 - iv. Ausgabe-Zellengröße: 100
 - v. Reiter Umgebung:
 - vi. Kachelgröße: 100 x 100
 - vii. Maske: Polygon-Feature-Layer IG_XX
 - viii. Ausgabekoordinaten: Aktuelle Karte
2. Interpoliertes Raster als TIF speichern
 - a. Im Layer IDW_000_00IG_X_y_XYZ Rechtsklick
 - i. Daten -> Raster exportieren
 - ii. Dateiname IDW_000_00IG_X_y_XYZ.tif

- iii. Pixeltyp: 32-bit ohne Vorzeichen
3. Raster aus TIF-File in Polygon konvertieren (Grund: Fläche in Raster nicht zu berechnen)
 - a. Geoverarbeitung: Raster in Polygon
 - i. Raster aus TIF-File als Eingaberaster (IDW_Maechtigk_000_00IG_X_y_XYZ.tif)
 - ii. Dateiname: Konv_Maechtigk_000_00IG_X_y_XYZ
 - iii. Polygone vereinfachen „aus“
 - iv. Multipart „an“
 4. Mächtigkeitsklasse „günstig“ aus konvertiertem Raster extrahieren
 - a. Reiter „Karte“
 - i. Auswahl aufheben (zur Sicherheit)
 - ii. Nach Attributen auswählen
 - iii. Eingabefeature Konv_Maechtigk_000_00IG_X_y_XYZ
 - iv. Neue Auswahl
 - v. Klausel hinzufügen
 - 1) Gridcode größer als 300
 - vi. Ausführen
 - b. Rechtsklick auf Layer Konv_Maechtigk_000_00IG_X_y_XYZ
 - i. Features exportieren
 - ii. Kopie des Layers enthält nur Flächen mit Mächtigkeit größer als 300 m
 - iii. Layer benennen: Konv_Maechtigk_000_00IG_X_y_XYZ_mehrals300
 5. Flächenprüfung für Mächtigkeit >300m
 - a. Reiter „Karte“ – Auswahl aufheben (zur Sicherheit)
 - b. Reiter „Bearbeiten“: Werkzeug: „Zusammenführen“
 - i. Eingabelayer: Konv_Maechtigk_000_00IG_X_y_XYZ_mehrals300
 - ii. Attributtabelle öffnen
 - iii. Auswahl umkehren (wählt alle Features im Layer aus)
 - iv. Zusammenführen
 - v. Änderungen speichern
 - c. Attributtabelle:
 - i. Feld hinzufügen
 - ii. Feldname und Alias: Flaeche oder qkm
 - iii. Datentyp double, Zahlenformat numerisch
 - iv. Speichern (Reiter „Felder“)
 - d. Rechtsklick auf neues Feld
 - i. Geometrie berechnen
 - ii. Eigenschaft Fläche
 - iii. Flächeneinheit Quadratkilometer
 - iv. Koordinatensystem Aktuelle Karte
 - v. Berechnen

- vi. Speichern (Reiter „Bearbeiten“)
- e. Gesamtfläche für Mächtigkeit größer als 300 m in Excel-Tabelle notieren
- 6. Teilflächenprüfung
 - a. Layer Konv_Maechtigk_000_00IG_X_y_XYZ_mehrals300 kopieren
 - b. neuer Layer: Konv_Maechtigk_000_00IG_X_y_XYZ_mehrals300_Teilflae-
chen
 - c. Reiter „Karte“: Auswahl aufheben (zur Sicherheit)
 - d. Reiter „Bearbeiten“: Werkzeug „Trennen“
 - e. Eingabelayer Konv_Maechtigk_000_00IG_X_y_XYZ_mehrals300_Teilflae-
chen
 - f. Attributtabelle: Auswahl umkehren oder Feature durch Anklicken auswählen
(sollte nur eines sein)
 - g. Trennen
 - h. Änderungen speichern
 - i. Attributtabelle: Feld „Flaeche“ oder „qkm“ aus Schritt iv
 - j. Rechtsklick: Geometrie berechnen, wie d
 - k. Anzahl Teilflächen in Excel-Tabelle notieren
 - l. Anzahl Teilflächen mit Fläche größer einfacher Flächenbedarf notieren
(Salz: 3 km², Ton: 10 km²)

Falls keine Teilfläche bei Mächtigkeit größer als 300 m den Flächenbedarf erfüllt, muss auf „bedingt günstige“ Bedingungen geprüft werden. Der Workflow ist ab 4 zu wiederholen, mit zweiteiliger Klausel „Gridcode größer als 200“ und Gridcode kleiner gleich 300“ (siehe 1).

Falls keine Teilfläche bei Mächtigkeit 200 – 300 m den Flächenbedarf erfüllt, muss auf „weniger günstige“ Bedingungen geprüft werden. Der Workflow ist ab 4 zu wiederholen, mit zweiteiliger Klausel „Gridcode größer als 100“ und Gridcode kleiner gleich 200“ (siehe 1).

Anhang 3.2 Indikator „Teufe der oberen Begrenzung des erforderlichen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs [m unter Geländeoberfläche]“

Annahme: Da in der Regel nur die Basisfläche aus dem Modell zur Verfügung steht, bezieht sich die Auswertung auf die Basisfläche unter Annahme, dass die Mindestmächtigkeit von 100 m erfüllt sein muss. Die im StandAG geforderte Teufe der oberen Begrenzung von größer als 500 m im günstigen Fall ist durch eine Teufe von größer als 600 m der Basis bei Mindestmächtigkeit gegeben.

Tabelle A. 50: Wertungsgruppen und Mächtigkeitsbereiche für den Indikator "Teufe der oberen Begrenzung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs" aus Anlage 2 (zu § 24 Abs. 3) StandAG

günstig	bedingt günstig	weniger günstig
> 600 m	400 – 600 m	-

Bei der Teufe muss keine Teilflächenprüfung erfolgen! Die Bewertung erfolgt nach dem Schema "(Maximale Teufe abzüglich Mindestmächtigkeit) größer als 600 m ist günstig", da hier nicht die Topfläche der Formation, sondern nur die Oberseite des (potentiellen) 100 m mächtigen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs betrachtet wird.

Sollte die maximale Tiefe der Basis im identifizierten Gebiet die günstigen Teufenbedingungen nicht erfüllen (größer als 600 m) wird auf bedingt günstige Teufen geprüft. Sollte die Tiefenlage der Basis im identifizierten Gebiet die bedingt günstige Teufe (400 – 600 m) nicht erfüllen wird mit weniger günstig bewertet.

Prüfung auf Überschneidung Fläche günstige Mächtigkeit/Fläche günstige Teufe

Der Workflow zur Ermittlung der Flächen mit günstiger/bedingt günstiger Teufe ist identisch dem zur Mächtigkeit bis Schritt 5.d.

In Schritt ii (Anhang 3.1) wird die Tiefenlage Basis als Z-Wert gewählt.

In Schritt 4 wird nach "Gridcode größer als 600" ausgewählt, um die günstigen Teufen zu extrahieren; nach zweiteiliger Klausel "Gridcode größer als 400" und "Gridcode kleiner gleich 600", um die bedingt günstigen Teufen zu wählen.

1. Shapefile der zuletzt angewandten Bewertungsstufe Mächtigkeit (z. B. wenn keine Flächen mit Mächtigkeit größer als 300 m den einfachen Flächenbedarf erfüllten das Shapefile mit Mächtigkeiten 200 – 300 m)
2. Shapefile der zuletzt angewandten Bewertungsstufe Teufe (z.B. wenn es keine Flächen mit der günstigen Teufenlage gab das Shapefile mit Teufen 400 – 600 m)
3. Flächen verschneiden:
 - a. Werkzeug „Ausschneiden“/„Clip“ (Analysis Tools)
 - i. Eingabe-Features: Teufe
 - ii. Clip-Features: Mächtigkeit
 - iii. Ausgabebayer sinnvoll benennen
(Clip_TiefeBasis600_Maecht200b300_000_00IG_X_y_XYZ)
4. Teilflächen erzeugen:
 - a. Reiter "Bearbeiten", Werkzeug "Trennen"
 - b. Alle Features im Layer (sollte nur eins sein) auswählen
 - c. Trennen
5. Das Feld Fläche sollte im neuen Layer enthalten sein
 - a. Rechtsklick und Geometrie berechnen wie zuvor
 - b. Flächenwert in Excel-Tabelle notieren (Erläuterung "Auf einer Fläche von X liegen Überschneidungen von günstiger Mächtigkeit (beste Bewertung im identifizierten Gebiet) und bedingt günstiger Teufe (beste Bewertung im identifizierten Gebiet) in Y Teilflächen vor. Davon erfüllen Z den einfachen Flächenbedarf.")

Anhang 3.3 Indikator „Flächenhafte Ausdehnung bei gegebener Mächtigkeit (Vielfaches des Mindestflächenbedarfs)“

Tabelle A. 51: Wertungsgruppen und Größen für den Indikator "Flächenhafte Ausdehnung" aus Anlage 2 (zu § 24) StandAG, beispielhaft für Tongestein

günstig	bedingt günstig	weniger günstig
Viel größer als 2-fach größer gleich 30 km ²	Etwa 2-fach größer gleich 20 bis 30 km ²	Viel kleiner als 2-fach 10 bis 20 km ²

Hier kann die Gesamtfläche des identifizierten Gebiets aus dem „IG-Steckbrief“ übernommen werden (vgl. Kapitel 5.6.1.1).

Anhang 4 Ergänzungen zur Vorgehensweise der Bewertung von Anlage 3 und 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG im Tongestein

Anhang 4.1 Tertiär

Anhang 4.1.1 Miozän (Jüngere Untere Meeresmolasse – Voralpines Molassebecken)

Das identifizierte Gebiet 046_00IG_T_f_tUMj ist Teil der Miozänen jüngeren Unteren Meeresmolasse des Voralpinen Beckens und wurde als Teilgebiet 003_00TG_046_00IG_T_f_tUMj ermittelt.

Anhang 4.1.1.1 Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG

Die räumliche Charakterisierung der wesentlichen geologischen Barrieren, die direkt oder indirekt den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle gewährleisten, insbesondere des vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs oder des Einlagerungsbereichs, soll möglichst zuverlässig möglich sein. Bewertungsrelevante Eigenschaften hierfür sind die Ermittelbarkeit der relevanten Gesteinstypen und ihrer Eigenschaften sowie die Übertragbarkeit dieser Eigenschaften aus Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG.

Die Sedimente der nordalpinen Molasse können aufgrund großräumiger Transgressionen und Regressionen in sechs lithostratigraphische Gruppen eingeteilt werden: die Untere Meeresmolasse (UMM) im Oligozän, die Untere Brackwassermolasse (UBM) im Oberen Oligozän und Unteren Miozän, die Untere Süßwassermolasse (USM) im Oberen Oligozän, die Obere Meeresmolasse (OMM) im Unteren Miozän, die Obere Brackwassermolasse (OBM) am Ende des Unteren Miozäns und die Obere Süßwassermolasse (OSM) im Mittleren und Oberen Miozän (Doppler et al. 2005). Alle Stufen sind in der nordalpinen Molasse Bayerns verbreitet, oftmals unter einer Überdeckung von quartären glazialen und fluvio-glazialen Sedimenten. Als relevantes Tongestein werden Tonmergel der Unteren Meeresmolasse betrachtet (Kapitel 8.2, BGE 2020j). Diese wurde bei der Bearbeitung in ältere und jüngere Untere Meeresmolasse geteilt, dabei sind jedoch in beiden auch Formationen enthalten, die nicht als relevant eingestuft wurden. Im Folgenden wird das identifizierte Gebiet der jüngeren UMM bewertet. Das identifizierte Gebiet befindet sich in der Region Voralpines Molassebecken und liegt im Bundesland Bayern. Das identifizierte Gebiet besteht aus mehreren Einzelflächen.

Das Molassebecken ist das orogene Vorlandbecken der Alpen, in dem deren Abtragungsschutt als Sedimente abgelagert werden. Raum für diese Sedimente wurde durch die Auflast der nach Norden auf die mitteleuropäische Kruste geschobenen alpinen Decken geschaffen. Das Ablagerungsmilieu des Molassebeckens änderte sich vom Oberen Eozän bis zum Oberen Miozän mehrfach von marin, über brackisch zu lakustrin-fluvial. Die verschiedenen Ablagerungsniveaus wurden maßgeblich durch die tektonische Entwicklung der Alpen bestimmt.

*Indikatoren „Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich“
„Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften“
und „Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)“:*

Neben der tektonischen Aktivität hatten auch globale Faktoren wie eustatische Meeresspiegelschwankungen Auswirkungen auf das Ablagerungsmilieu (Haq et al. 1988). Im Tertiär herrschte tektonische Aktivität im Molassebecken. Teils war dies fortgesetzter Versatz an älteren Lineamenten, teils nach Norden einfallende sekundäre Brüche. Durch den zunehmenden Druck von Süden wurden alte Lineamente verbogen, während die Vorlandmolasse sich einmuldete (Freudenberger & Schwerd 1996). Die Verbreitung der jüngeren Unteren Meeremolasse (UMM) ist in Bayern auf den Süden des Landes begrenzt. Die Vorlandmolasse ist in drei Ablagerungsbereiche geteilt: die westliche Vorlandmolasse westlich der Iller, die mittlere Vorlandmolasse zwischen Iller und Lech und die östliche Vorlandmolasse östlich des Lech (Doppler et al. 2005).

In der Westmolasse umfasst die UMM einen voll ausgeprägten Sedimentationszyklus von Transgression und Regression, in der Ostmolasse zwei schwächere Zyklenabfolgen (Freudenberger & Schwerd 1996). Die jüngere UMM ist eine parallele marine Bildung in der östlichen Molasse zur USM und UBM der westlichen Molasse. Nach einer Regression im Chattium, die zur Ablagerung der „Chatt“-Sande führte, erfolgte eine erneute Transgression und die Ablagerung der Hangenden Tonmergel im höheren Chattium. Diese werden gefolgt von der „Aquitane“-Sand-Mergel-Folge und dem „Aquitane“-Fischschiefer, womit die Folgen der UMM durch eine großflächige Regression beendet wurden, auf die ein Hiatus folgte. Als Wirtsgestein werden die Tonstein- und Tonmergelschichten der UMM betrachtet.

Die Hangenden Tonmergel der östlichen Vorlandmolasse sind bis 1500 m mächtig (Doppler et al. 2005). Die „Aquitane“-Sand-Mergel-Folge erreicht bis 1000 m Mächtigkeit, der „Aquitane“-Fischschiefer bis 200 m (Freudenberger & Schwerd 1996). Weitere Details über die bundesland-spezifischen Entwicklungen der Sedimentabfolge der jüngeren Unteren Meeremolasse können den Protokollen des Datenberichtes (BGE 2020I) entnommen werden.

Indikator „Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit“:

Die Stärke der tektonischen Aktivität bestimmte die Sedimentmenge, welche wiederum das Ablagerungsmilieu, marin oder terrestrisch, beeinflusste (Kuhlemann & Kempf 2002)

Die nordalpine Molasse wird in die ungefaltete, autochthone Vorlandmolasse und die allochthone Faltenmolasse untergliedert (Doppler et al. 2005). Die Sedimente der Faltenmolasse (größtenteils UMM und USM) sind in die Orogenese der Alpen mit einbezogen und überschoben und verformt worden (Meschede 2018). Große Teile der UMM befinden sich heutzutage südlich der Alpenen Deformationsfront (Kuhlemann & Kempf 2002). Die Vorlandmolasse ist dagegen weitgehend unverformt. Sie ist zwischen dem heutigen Alpennordrand im Süden, dem Schwarzwald, dem Südwestdeutschen Schichtstufenland und der Bayerisch-Böhmischen Masse im Norden im Gebiet der heutigen Schweiz, Deutschland und Österreich verbreitet.

Anhang 4.1.1.2 Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG

Indikator „Zeitspanne, über die sich die Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht wesentlich verändert hat“:

Das identifizierte Gebiet 046_00_IG_T_f_tUMj weist eine minimale Basis von 400 m unter Geländeoberkante (Basiswert) auf. Eine Veränderung durch den Einschnitt subglazialer Rinnen ist somit möglich. Da die Lage des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs jedoch nicht bekannt ist, müssen standortspezifische Untersuchungen durchgeführt werden müssen, um Veränderungen der Mächtigkeit, der Ausdehnung des Gebietes und der Gebirgsdurchlässigkeit festzustellen.

Anhang 4.1.2 Miozän (Ältere Untere Meeresmolasse - Voralpines Molassebecken)

Das identifizierte Gebiet 044_00IG_T_f_tUMa ist Teil der Miozänen älteren Unteren Meeresmolasse des Voralpines Beckens und wurde als Teilgebiet 002_00TG_044_00IG_T_f_tUMa ermittelt.

Anhang 4.1.2.1 Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG

Die Sedimente der nordalpinen Molasse können aufgrund großräumiger Transgressionen und Regressionen in sechs lithostratigraphische Gruppen eingeteilt werden: die Untere Meeresmolasse (UMM) im Oligozän, die Untere Brackwassermolasse (UBM) im Oberen Oligozän und Unteren Miozän, die Untere Süßwassermolasse (USM) im Oberen Oligozän, die Obere Meeresmolasse (OMM) im Unteren Miozän, die Obere Brackwassermolasse (OBM) am Ende des Unteren Miozäns und die Obere Süßwassermolasse (OSM) im Mittleren und Oberen Miozän (Doppler et al. 2005). Alle Stufen sind in der nordalpinen Molasse Bayerns verbreitet, oftmals unter einer Überdeckung von quartären glazialen und fluvio-glazialen Sedimenten. Als relevantes Tongestein (Kapitel 8.2, BGE 2020j) werden Tonmergel der Unteren Meeresmolasse betrachtet. Diese wurde bei der Bearbeitung in ältere und jüngere Untere Meeresmolasse geteilt, dabei sind jedoch in beiden auch Formationen enthalten, die nicht als relevant eingestuft wurden. Im Folgenden wird das identifizierte Gebiet der älteren UMM bewertet. Das identifizierte Gebiet befindet sich in der Region Voralpines Molassebecken und liegt im Bundesland Bayern und besteht aus mehreren Einzelflächen.

Das Molassebecken ist das orogene Vorlandbecken der Alpen, in dem deren Abtragungsschutt als Sedimente abgelagert wurden. Raum für diese Sedimente wurde durch die Auflast der nach Norden auf die mitteleuropäische Kruste geschobenen alpinen Decken geschaffen. Das Ablagerungsmilieu des Molassebeckens änderte sich vom Oberen Eozän bis zum Oberen Miozän mehrfach von marin, über brackisch zu lakustrin-fluviatil. Die verschiedenen Ablagerungsniveaus wurden maßgeblich durch die tektonische Entwicklung der Alpen bestimmt.

Indikator „Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit“:

Die Stärke der tektonischen Aktivität bestimmte die Sedimentmenge, welche wiederum das Ablagerungsmilieu, marin oder terrestrisch, beeinflusste (Kuhlemann & Kempf 2002). Neben der tektonischen Aktivität hatten auch globale Faktoren wie eustatische Meeresspiegelschwankungen Auswirkungen auf das Ablagerungsmilieu (Haq et al. 1988).

Im Tertiär herrschte tektonische Aktivität im Molassebecken. Teils war dies fortgesetzter Versatz an älteren Lineamenten, teils nach Norden einfallende sekundäre Brüche. Durch den zunehmenden Druck von Süden wurden alte Lineamente verbogen, während die Vorlandmolasse sich einmuldete (Freudenberger & Schwerd 1996).

Die Verbreitung der älteren Unteren Meeresmolasse (UMM) ist in Bayern auf den Süden des Landes begrenzt. Die nordalpine Molasse wird in die ungefaltete, autochthone Vorlandmolasse und die allochthone Faltenmolasse untergliedert (Doppler et al. 2005). Die Sedimente der Faltenmolasse (größtenteils UMM und USM) sind in die Orogenese der Alpen mit einbezogen und überschoben und verformt worden (Meschede 2018). Große Teile der UMM befinden sich heutzutage südlich der Alpenen Deformationsfront (Kuhlemann & Kempf 2002). Die Vorlandmolasse ist dagegen weitgehend unverformt. Sie ist zwischen dem heutigen Alpennordrand im Süden, dem Schwarzwald, dem Südwestdeutschen Schichtstufenland und der Bayerisch-Böhmischen Masse im Norden im Gebiet der heutigen Schweiz, Deutschland und Österreich verbreitet. Die Vorlandmolasse ist in drei Ablagerungsbereiche geteilt: die westliche Vorlandmolasse westlich der Iller, die mittlere Vorlandmolasse zwischen Iller und Lech und die östliche Vorlandmolasse östliche des Lech (Doppler et al. 2005).

*Indikatoren „Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich“
„Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften“
und „Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)“:*

Die Stärke der tektonischen Aktivität bestimmte die Sedimentmenge, welche wiederum das Ablagerungsmilieu, marin oder terrestrisch, beeinflusste (Kuhlemann & Kempf 2002). Neben der tektonischen Aktivität hatten auch globale Faktoren wie eustatische Meeresspiegelschwankungen Auswirkungen auf das Ablagerungsmilieu (Haq et al. 1988).

In der Westmolasse umfasst die UMM einen voll ausgeprägten Sedimentationszyklus von Transgression und Regression, in der Ostmolasse zwei schwächere Zyklenabfolgen (Freudenberger & Schwerd 1996). In der gesamten UMM wurden ab dem frühen Rupelium die Schöneck-Formation (ehemals Fischeschiefer) abgelagert, folgend vom Hellen Mergelkalk und Bändermergeln, dann in größerer Mächtigkeit die Tonmergelschichten in mariner Fazies (Doppler et al. 2005).

In der Ostmolasse lag dagegen durchgehend ein mariner Ablagerungsraum vor. Dort gehen die Tonmergelschichten im höheren Rupelium in den „Rupel“-Tonmergel über.

Mit den faziell nicht vom „Rupel“-Tonmergel differenzierten Liegenden Tonmergeln endet die ältere UMM (Freudenberger & Schwerd 1996). Als Wirtsgestein werden die Tonstein- und Tonmergelschichten der UMM betrachtet.

Die Tonmergel-Schichten der westlichen Vorlandmolasse erreichen im Süden bis zu 1800 m Mächtigkeit (Doppler et al. 2005). Die Tonmergel-Schichten/„Rupel“-Tonmergel/Liegende Tonmergel der mittleren Vorlandmolasse sind ca. 800 m mächtig (Freudenberger & Schwerd 1996). Weitere Details über die bundesland-spezifischen Entwicklungen der Sedimentabfolge der älteren Unteren Meeresmolasse können den Protokollen des Datenberichtes entnommen werden (BGE 2020).

Anhang 4.1.2.2 Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG

Indikator „Zeitspanne, über die sich die Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht wesentlich verändert hat“:

Das IG 044_00_IG_T_f_tUMa weist eine minimal erbohrte Basis in einer Tiefe von 400 m unter Geländeoberkante (Basiswert) auf. Eine Veränderung durch den Einschnitt subglazialer Rinnen ist somit möglich.

Indikator „Zeitspanne, über die sich die Gebirgsdurchlässigkeit nicht wesentlich verändert hat“:

Da die Lage des einschlusswirksamen Gebirgsbereich jedoch nicht bekannt ist, müssen standortspezifische Untersuchungen durchgeführt werden müssen, um Veränderungen der Mächtigkeit, der Ausdehnung des Gebietes und der Gebirgsdurchlässigkeit festzustellen.

Anhang 4.1.3 Eozän (Oberrheingraben – Landau Formation)

Das identifizierte Gebiet 031_00IG_T_f_t ist Teil der Eozänen Landau Formation im Oberrheingraben und wurde nicht als Teilgebiet ermittelt.

Anhang 4.1.3.1 Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG

Indikator „Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit“:

Der Oberrheingraben ist Teil des „Europäischen Känozoischen Rift Systems“ (European Cenozoic Rift System ECRIS), welches sich von der Nordsee bis zum Mittelmeer erstreckt (Ziegler & Dèzes 2007). Die Riftentwicklung begann im mittleren bis späten Eozän und ist geprägt durch mehrere Subsidenzphasen (Brun et al. 1992). Im Zuge der Grabenbildung kam es zur Ablagerung von fluviatil-limnischen terrestrischen und brackisch-marinen Sedimenten (Grimm et al. 2011a).

*Indikatoren „Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich“
„Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften“
und „Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)“:*

Die Landau-Formation (Ober-Oligozän bis Unter-Miozän) im nördlichen und mittleren Oberrheingraben wird als relevantes Tongestein betrachtet (siehe BGE 2020j). Die Sedimente der Landau Formation wurden in einem limnisch bis brackisch-marinen Setting im Zuge kurzzeitiger mariner Transgressionen während des Chattium bis Burdigalium (Ober-Oligozän bis Unter-Miozän) abgelagert (Wirth 1954; Straub 1962).

Das identifizierte Gebiet befindet sich im nördlichen und mittleren Oberrheingraben und erstreckt sich über die Bundesländer Baden-Württemberg, Rheinland-Pfalz und Hessen. Das identifizierte Gebiet besteht aus mehreren Einzelflächen.

Die Verbreitung der Landau-Formation beschränkt sich auf den mittleren und nördlichen Oberrheingraben, sowie die Übergangsbereiche zum Mainzer Becken und endet in südlicher Richtung auf der Linie Lauer-Rastatt. Die Sedimente der Landau-Formation wurden in einem lakustrinen bis marinen Milieu abgelagert (Geyer et al. 2011) und sind überwiegend durch Tonsteine und Tonmergel mit eingeschalteten Dolomitbänken charakterisiert: An der Basis besteht die Formation aus grauschwarzen, bituminösen, pyritführenden Mergeln. Darüber folgen feingeschichtete bis laminierte Ton-, Tonmergel und Mergelsteine mit grüngrauer bis dunkelgrauer Farbe, die teilweise bituminös sind. Die Formation enthält häufig Kalk- und Dolomitsteinbänke mit einer Mächtigkeit von bis zu 2 m. Darüber hinaus lassen sich lokale Häufungen von Anhydritknollen beobachten (Grimm et al. 2011a). An Grabenrändern treten vermehrt Sandsteinbänke, Kalkoolithe und Algenkalke auf (Geyer et al. 2011). Die Mächtigkeit der Landau-Formation reicht bis etwa 1000 m bei Frankenthal (Grimm et al. 2011a). Weitere Details über die bundeslandspezifischen Entwicklungen der Sedimentabfolge der tertiären Grabenfüllung des Oberrheingrabens können den Protokollen des Datenberichtes (BGE 2020i) entnommen werden.

Anhang 4.1.3.2 Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG

Indikator „Zeitspanne, über die sich die Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht wesentlich verändert hat“:

Die Tiefenlage der Unterkante der Landau Formation liegt innerhalb des identifizierten Gebiets in einer Tiefenlage von 630 m bis 1500 m unter Geländeoberkante. Eine Beeinflussung durch subglaziale Rinnen kann ausgeschlossen werden (Reinhardt et al. 2017). Bewertung der Zeitspanne, über die für die Betrachtungsmerkmale „Mächtigkeit“ und flächenhafte bzw. räumliche „Ausdehnung“ Änderungen auftreten, muss die Grabenentwicklung in Betracht gezogen werden. Die letzte bedeutende Subsidenzphase fand im Pliozän/Quartär statt (Ziegler 1992; Schumacher 2002). Jedoch wird angenommen, dass sich die Mächtigkeit und Ausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durch die pliozänen und quartären Ablagerungen nicht wesentlich geändert hat. Es wird daher angenommen, dass seit mehr als zehn Millionen Jahren keine wesentlichen Änderungen

der Mächtigkeit und der Ausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs aufgetreten sind.

Indikator „Zeitspanne, über die sich die Gebirgsdurchlässigkeit nicht wesentlich verändert hat“:

Vor allem der südliche Oberrheingraben ist durch eine hohe seismische Aktivität charakterisiert. Jedoch auch im nördlichen und mittleren Oberrheingraben ist rezente tektonische Aktivität zu verzeichnen, wie die Vielzahl an (innerhalb der letzten eine Million Jahren) aktiven Störungen belegt. Es muss davon ausgegangen werden, dass die Gebirgsdurchlässigkeit durch jüngste tektonische Prozesse (unter einer Million Jahren) und die dadurch entstandenen (Fluid-) Wegsamkeiten, insbesondere in Störungsnähe, beeinflusst wurde.

Für die Bewertung der Zeitspanne, über die für die Betrachtungsmerkmale „Mächtigkeit“ und flächenhafte bzw. räumliche „Ausdehnung“ Änderungen auftreten, muss die Grabenentwicklung in Betracht gezogen werden. Die letzte bedeutende Subsidenzphase fand im Pliozän/Quartär statt (Ziegler 1992; Schumacher 2002). Jedoch wird angenommen, dass sich die Mächtigkeit und Ausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durch die pliozänen und quartären Ablagerungen nicht wesentlich geändert hat. Es wird daher angenommen, dass seit mehr als zehn Millionen Jahren keine wesentlichen Änderungen der Mächtigkeit und der Ausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs aufgetreten sind.

Anhang 4.1.4 Paläogen (Tertiär Norddeutsches Becken)

Das identifizierte Gebiet 053_00IG_T_f_tpg ist Teil des Tertiärs im Norddeutschen Becken und wurde als Teilgebiet 004_00TG_053_00IG_T_f_tpg ermittelt.

Anhang 4.1.4.1 Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG

Die räumliche Charakterisierung der wesentlichen geologischen Barrieren, die direkt oder indirekt den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle gewährleisten, insbesondere des vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs oder des Einlagerungsbereichs, soll möglichst zuverlässig möglich sein. Bewertungsrelevante Eigenschaften hierfür sind die Ermittelbarkeit der relevanten Gesteinstypen und ihrer Eigenschaften sowie die Übertragbarkeit dieser Eigenschaften aus Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG.

Das Paläogen oder Alttertiär wird international in folgende Serien gegliedert: Paläozän, Eozän und Oligozän (Janssen et al. 2018). Alle Serien sind im Betrachtungsraum des Norddeutschen Beckens verbreitet. Als relevantes Tongestein (Kapitel 8.2, BGE 2020j) werden in Niedersachsen die Stufen des Thanetium aus dem oberen Paläozän und des Ypresium aus dem unteren Eozän betrachtet.

Das identifizierte Gebiet befindet sich in der Region Norddeutsches Becken und erstreckt sich über die Bundesländer Niedersachsen, Bremen, Hamburg, Schleswig-Holstein, Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg, Berlin und Sachsen-Anhalt. Das identifizierte Gebiet besteht aus mehreren Einzelflächen.

*Indikatoren „Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich“
„Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften“
und „Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)“:*

Die tertiären Ablagerungen im Norddeutschen Becken stammen aus dem Nordseebecken, das sich als Nachfolger des Deutschen Zechsteinbeckens entwickelte. Nach einem Zurückweichen der Küstenlinie bis etwa Höhe Bremen im mittleren Paläozän erfolgte im Thanetium die erste Transgression des Tertiärs (Gürs 2006). Mit dieser wechselte die Sedimentation im Nordseebecken von hauptsächlich kalkig zu hauptsächlich klastisch, im Beckeninneren wurden Tonabfolgen abgelagert (Gürs et al. 2008). Durch eine spätpaläozäne Regression wurde das Thanetium in Nordostdeutschland teilweise wieder erodiert und blieb vor allem in Salinarrandsenken erhalten (Von Bülow & Müller 2004; Stackebrandt 2010).

Das Eozän begann wiederum mit einer weiten Transgression von Westen, mit der das Nordseebecken im Ypresium seine größte Ausdehnung erreichte. Der Thule-Vulkanismus im Zuge der Öffnung des Nordatlantiks führte zu einer Vielzahl von Aschelagen, die in die Tone des beginnenden Eozäns eingeschaltet wurden (Gürs et al. 2008). Die Sedimentschüttung im Becken erfolgte hauptsächlich von Süden, Herkunftsgebiet war die Mitteldeutsche Schwelle (Hinsch 1974; Gürs et al. 2008; Stackebrandt 2010). Der Südrand des tertiären Nordseebeckens ist von sandigen Sedimenten dominiert, die oft mit tonigen Sedimenten verzahnt sind (Blumenstengel & Krutzsch 2008).

Das Thanetium und Ypresium in Norddeutschland erreichen zusammengefasst Mächtigkeiten zwischen 100 m und maximal 1050 m. In Nordwestdeutschland liegen die Mächtigkeiten zwischen 100 m und 450 m, die nach Süden zum Beckenrand hin abnehmen (Schad 1947). Das Paläozän ist in Schleswig-Holstein kaum erhalten, die Mächtigkeiten des Ypresium liegen dort bei etwa 120 m bis 200 m (Schad 1947; Ehlers 2011). In Nordostdeutschland erreichen das Thanetium und Ypresium Mächtigkeiten von 170 m bis 420 m, in Salinarrandsenken können lokal vor allem im Raum der Elbe bis 1000 m Mächtigkeit auftreten (Katzung 2004; Standke 2015; Von Bülow & Müller 2004). Weitere Details über die bundesland-spezifischen Entwicklungen der Sedimentabfolge des Paläozäns können den Protokollen des Datenberichtes entnommen werden.

Indikator „Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit“:

Das tektonische Fernfeld der einsetzenden Alpenorogenese führte ab der Oberkreide zu erneut einsetzender Halokinese des Zechsteinsalzes, sodass auf alten Salzkissen nun Salzdiapire aufstiegen (Maystrenko et al. 2006). Vor allem im Norden des Niedersächsischen Beckens und in Schleswig-Holstein sind die Sedimentmächtigkeiten des Tertiärs von den halokinetischen Prozessen abhängig. Hier bestehen verringerte Mächtigkeiten über den Salzstrukturen und zum Teil stark erhöhten Mächtigkeiten in den Randsenken (Maystrenko et al. 2006; Von Bülow & Müller 2004; Stackebrandt 2010).

Anhang 4.1.4.2 Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG

Indikator „Zeitspanne, über die sich die Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht wesentlich verändert hat“:

Das identifizierte Gebiet 053_00IG_T_f_tpg weist eine minimal erbohrte Basis in einer Tiefe von 400 m unter Geländeoberkante auf. Eine Veränderung durch den Einschnitt subglazialer Rinnen ist somit möglich.

Indikator „Zeitspanne, über die sich die Gebirgsdurchlässigkeit nicht wesentlich verändert hat“:

Eine Veränderung der Gebirgsdurchlässigkeit in Folge einer Änderung der Auflast durch lokale Erosion und Sedimentation während der halokinetischen Hebungs- und Senkungsprozesse im Norddeutschen Becken ist möglich (Hinsch 1974; Maystrenko et al. 2006; Lehné & Sirocko 2010). Der flächenhafte Einfluss des Absinkens des Norddeutschen Beckens ist nicht abschätzbar. Tektonische Aktivität als potentieller Faktor für die Änderung der Mächtigkeit und Gebirgsdurchlässigkeit im Zuge des Absinkens des Norddeutschen Beckens um bis zu 400 m ist möglich (z. B. Stackebrandt 2010; Scheck et al. 2003). Damit sind wesentliche und unwesentliche versenkungsbedingte Veränderungen der Gebirgsdurchlässigkeit möglich. Eine Veränderung der Ausdehnung durch Auflast ist nicht zu erwarten.

Anhang 4.2 Jura

Anhang 4.2.1 Mittlerer Jura (Dogger Norddeutsches Becken)

Das identifizierte Gebiet 055_00IG_T_f_jm ist Teil des Doggers im Norddeutschen Becken und wurde als Teilgebiet 005_00TG_055_00IG_T_f_jm ermittelt.

Anhang 4.2.1.1 Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG

Der Mittlere Jura, der mit der informellen Bezeichnung Dogger in Norddeutschland vertreten ist (Mönnig et al. 2018), kann in folgende Stufen untergliedert werden: Aalenium, Bajocium, Bathonium und Callovium. Alle Stufen sind im Betrachtungsraum Norddeutsches Becken verbreitet. Als relevantes Tongestein (Kapitel 8.2, BGE 2020j) werden im Norddeutschen Becken alle Stufen betrachtet. In Brandenburg und Berlin wird das Bathonium nicht als relevant betrachtet. In Mecklenburg-Vorpommern treten im Aalenium und Bajocium keine geeigneten Tongesteine auf. In Nordrhein-Westfalen wird das Bathonium nicht, in Sachsen-Anhalt lediglich das Aalenium und Bajocium betrachtet. Da jedoch der überwiegende Teil des Mittleren Juras aus tonigen Einheiten besteht, werden bei der Bearbeitung der Mindestanforderungen die Stufen des Doggers als eine Einheit untersucht. Das identifizierte Gebiet befindet sich in der Region Norddeutsches Becken und erstreckt sich über die Bundesländer Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen, Sachsen-Anhalt, Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg und Berlin. Das Gebiet besteht aus mehreren Einzelflächen.

Das Norddeutsche Becken stellt ein Teilbecken des Mitteleuropäischen Beckensystems dar, das sich bereits gegen Ende des Perm aufgrund des Auseinanderbrechens Pangäas herauszubilden begann (Barth et al. 2018). Im Mittleren Jura öffneten sich der

Zentralatlantik und der Penninische Ozean. Das Nordmeer drang nach Mitteleuropa vor. Global betrachtet trennte sich Gondwana von Laurasien endgültig ab. Bis in den Unteren Jura hinein herrschten regional triassische aktive Gräben als Sedimentationsbecken. Im Mittleren Jura gliederte sich das mitteleuropäische Becken auf und Senkungsstrukturen in NW-SE Richtung etablierten sich (z. B. das Niedersächsische Becken, Lausitzer Becken) (Meschede 2018; Beutler & Mönning 2008). Mitteleuropa war zu diesem Zeitpunkt infolge von globalen Meeresspiegelanstiegen und thermischer Subsidenz von einem flachen Epikontinentalmeer überflutet (Meschede 2018). Im Süden bestand eine Verbindung zur Neotethys und das Norddeutsche und Süddeutsche Becken waren über die Hessische Senke miteinander verbunden (Mönning et al. 2018). Marine Einflüsse kamen neben den westlichen Richtungen auch aus dem Nordosten (z. B. Zentrum der Dänisch-Polnischen Senke; (Petzka et al. 2004)).

Indikatoren „Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich“, „Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften“ und „Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)“:

Es kam zu einem Wechsel von marinen und brackischen Bedingungen, wobei der marine Anteil deutlich zunahm (Petzka et al. 2004). Durchweg marine Tonsteine markieren den Höhepunkt der Meeresausbreitung im Callovium (Schudack & Tessin 2015).

Insgesamt ist der Mittlere Jura durch eine Abfolge mariner Transgressionen und Regressionen gekennzeichnet. Zunächst setzte sich die tonige Sedimentation des Unteren Jura (Lias) im Mittleren Jura fort. Jedoch führten ab dem Ober-Aalenium und Bajocium Sandschüttungen aus Norden zu Unterbrechungen der tonigen Sedimentation und erzeugten häufige lithofazielle Wechsel von fluviatil-deltaischen Sandsteinen und mächtigen marinen Ton- und Siltsteinen mit Einschaltungen von Toneisensteinlagen, Sideritoiden und kalkigen Sedimenten (Mönning 2008; Petzka et al. 2004). Die Schüttungsrichtung änderte sich von Ost zu Nord (z. B. Ringköbing-Fünen-Hoch, Nordwestmecklenburg-Schwelle) (Petzka et al. 2004). Im Bathonium kommt es verstärkt zu Sandschüttungen von Fein- bis Mittelsandsteinen sowie Kalk- bis Kalksandsteinen („Cornbrash“; (Schudack & Tessin 2015). Ab dem Callovium dominieren wiederum tonige Ablagerungen (Ornatenton-Formation). Zusammenfassend kann der Westteil des Norddeutschen Beckens im Mittleren Jura zu großen Teilen einem marinen Faziesraum zugeordnet werden, welcher durch die Ablagerung vorwiegend toniger Sedimente gekennzeichnet ist (Ausnahme z. B. der „Cornbrash“ im Bathonium). Im Ostteil dominierten neben marinen zeitweise vornehmlich limnisch-brackische Bedingungen. Dieser Ablagerungsraum wurde durch den Eintrag sandiger, terrigener Sedimente über Deltasysteme beeinflusst. Generell ist das Norddeutsche Becken im Mittleren Jura durch eine tonigere Westfazies und eine teilweise sandigere Ostfazies gekennzeichnet (Hoth et al. 2007; Feldrappe 2006).

Die Mächtigkeiten betragen zwischen 10 m und mehr als 1000 m (Feldrappe 2006). Im östlichen Norddeutschen Becken sind die Mächtigkeiten der Abfolgen geringer als im westlichen Teil (durchschnittlich 400 m) (Feldrappe 2003), z.B. beträgt die Mächtigkeit

in Vorpommern und Ostbrandenburg lediglich ca. 100 m (Schudack & Tessin 2015; Feldrappe 2003). Zudem weisen die Abfolgen im östlichen Teil häufig Lücken auf wie z.B. im östlichen und nordöstlichen Brandenburg (Schudack & Tessin 2015).

Indikator „Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit“:

Ab der Wende Oberer Jura-Untere Kreide entwickelte sich das Norddeutsche Becken in Folge der Öffnung des Atlantiks zu einem Transtensionsbecken (Franke & Stackebrandt 2015), was lokal zu Hebung und tiefgreifender Erosion führte.

Anhang 4.2.1.2 Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG

Indikator „Zeitspanne, über die sich die Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht wesentlich verändert hat“:

Die Sedimentgesteine im Untergrund Norddeutschlands sind von der im Perm beginnenden Entwicklung des Norddeutschen Beckens geprägt. Prozesse, die seit dem späten Miozän die Mächtigkeit, Ausdehnung und Gebirgsdurchlässigkeit der Tongesteinsabfolgen des Unterjura Norddeutschlands potentiell beeinflusst haben, werden im Folgenden kurz beschrieben.

In Norddeutschland treten elsterzeitliche subglaziale Rinnen als Erosionsstrukturen mit einer Tiefe von über 500 m unter Geländeoberkante auf (Stackebrandt 2009; Hönemann et al. 1995). Die Teufenlage der Strukturbasis des Unterjura variiert im IG 188_00IG_T_f_ju zwischen 400 m bis 1500 m unter Geländeoberkante. Eine Veränderung durch den Einschnitt subglazialer Rinnen ist somit möglich (Stackebrandt 2009; Hönemann et al. 1995).

Indikator „Zeitspanne, über die sich die Gebirgsdurchlässigkeit nicht wesentlich verändert hat“:

Im Zusammenhang mit aufsteigenden Salzstöcken kam es in unmittelbarer Nähe von Salzdiapiren bzw. Salzkissen im Norddeutschen Becken zu jungen halokinetischen Bewegungen. Eine Veränderung der Gebirgsdurchlässigkeit in Folge einer Änderung der Auflast durch lokale Erosion und Sedimentation während der halokinetischen und halotektonischen Hebungs- und Senkungsprozesse im Norddeutschen Becken ist möglich (Hinsch 1974; Maystrenko et al. 2006; Lehné & Sirocko 2010). Der flächenhafte Einfluss auf lokale Gebiete sowie das Norddeutsche Becken ist nicht abschätzbar.

Das Norddeutsche-Becken gehört zur neotektonisch aktiven Mitteleuropäischen Senkungszone (Garetsky et al. 2001). Tektonische Aktivität als potentieller Faktor für die Änderung der Mächtigkeit und Gebirgsdurchlässigkeit im Zuge des Absinkens des Norddeutschen Beckens um bis zu 400 m ist möglich (z. B. Stackebrandt 2010; Scheck et al. 2003). Damit sind wesentliche und unwesentliche versenkungsbedingte Veränderungen der Gebirgsdurchlässigkeit möglich. Eine Veränderung der Ausdehnung durch Auflast ist nicht zu erwarten.

Anhang 4.2.2 Mittlerer Jura Opalinuston-Formation Süddeutschland)

Das identifizierte Gebiet 032_01IG_T_f_jmOPT ist Teil der Opalinuston-Formation in Süddeutschland und wurde als Teilgebiet 001_00TG_032_01IG_T_f_jmOPT ermittelt.

Anhang 4.2.2.1 Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG

Der Mittlere Jura, der in Süddeutschland auch unter der Bezeichnung „Braunjura-Gruppe“ bekannt ist (Mönnig et al. 2018), kann (vom Älteren zum Jüngeren) in folgende Stufen untergliedert werden: Aalenium, Bajocium, Bathonium und Callovium. Als relevantes Tongestein (siehe Kapitel 2 Mindestanforderungen – Methoden und Ergebnisse) wird die Opalinuston-Formation (Dogger α) an der Basis der Aalenium-Stufe betrachtet.

Das identifizierte Gebiet befindet sich in der Region Hochrhein bis Schwäbische-Fränkische Alb und erstreckt sich über die Bundesländer Baden-Württemberg und Bayern. Das identifizierte Gebiet besteht aus mehreren Einzelflächen. Es erstreckt sich vom Hochrhein-Gebiet bis zur Schwäbisch-Fränkischen Alb, wo es flach nach Südosten einfällt, und im Süden von jüngeren Schichten des Molassebeckens überlagert wird.

Das süddeutsche Jurameer war Teil eines Epikontinentalmeeres, das weite Teile Europas bedeckte. Die Wassertiefen des flachen Nebenmeeres, welches sich bis zum ozeanischen Golf der Tethys im Südosten erstreckte, lagen meist zwischen 20 m und 150 m. Im Aalenium fanden starke weiträumige Senkungseignisse im Süden Deutschlands statt und führten zur Ablagerung der über 100 m mächtigen Opalinuston-Formation, die überwiegend aus leicht schluffigen Tonsteinen besteht (Geyer & Gwinner 2011). Die Tonsteine sind wenig gegliedert, jedoch unterscheiden sich die Abschnitte der Formation im Feinsandanteil oder im Kalkgehalt.

Indikatoren „Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich“ „Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften“ und „Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)“:

Die laterale Variabilität der Fazies und der Lithologie wird insgesamt als sehr gering beschrieben und das Gestein als überaus homogen charakterisiert (Allia 1996; Nagra 2002; Hoth et al. 2007). Die Hauptgemengteile der Opalinuston-Formation sind Illit, Kaolinit und Chlorit, die Nebengemengteile Quarz sowie ein quellfähiges Illit-Montmorillonit-Wechselagerungsmineral (Merklein-Lempp 1985; Henke & Hiller 1985). Schmidt (1996) gibt den Wassergehalt der Opalinuston-Formation (ausgenommen der Wassergehalt innerhalb der Minerale) in einem Bereich zwischen 4 % und 12 % an. Die dunkelgraue bis schwarze Farbe ist auf feinverteilten Pyrit und geringe Mengen (größer 3 %) organisches Material zurückzuführen (Geyer & Gwinner 2011; Hoth et al. 2007).

Die Mächtigkeit der Opalinuston-Formation nimmt kontinuierlich von dem südwestlich-nordöstlich verlaufendem Ausbiss zwischen München-Landshut-Staubingen in Bayern in nordwestliche Richtung zu und erreicht im Bereich der Schwäbischen Alb westlich von Ulm den Maximalwert mit ca. 150 m (Meyer & Schmidt-Kaler 1996; Hoth et al. 2007).

Die Opalinuston-Formation weist eine deutliche Zweiteilung auf, die für Baden-Württemberg gut beschrieben wurde, und besteht im unteren Bereich aus der Teufelsloch-Subformation und im oberen Bereich aus der Zillhausen-Subformation. Die Mächtigkeit der

Teufelsloch-Subformation variiert im Ausstrichgebiet zwischen 90 m und 100 m, nach Tiefbohrungen im Raum Bruchsal wird eine Mächtigkeit bis über 120 m erreicht (Franz & Nitsch 2009). Die Zillhausen-Subformation als oberer Teil der Opalinuston-Formation zeigt kleinräumig stark wechselnde Mächtigkeiten zwischen 11 m und 40 m (Franz & Nitsch 2009). Faziell lassen sich darin folgende Unterschiede feststellen: Die Teufelsloch-Subformation im Liegenden besteht aus vollmarin-subtidalen Schlammgrund-Ablagerungen mit geringer Bodenströmung. Massenaufreten von Bositra und teilweise geringe Bioturbation deuten auf zeitweilig dysoxische Bedingungen in Bodennähe hin. In der hangenden Zillhausen-Subformation findet sich ein zunehmender Übergang in Sandgrund-Ablagerungen mit geringmächtigen subtidalen Sandbänken (Wasserfallbänke, Zopfplatten mit Wühlgefügen) und örtlich eingeschalteten tempestitischen Aufarbeitungslagen (Geröllkalkbänke, Belemnitenbrekzien) (Franz & Nitsch 2009). Weitere Details über die bundesland-spezifischen Entwicklungen der Sedimentabfolge des Mittleren Jura (Opalinuston-Formation) können den Protokollen des Datenberichtes entnommen werden.

Anhang 4.2.2.2 Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG

Indikator „Zeitspanne, über die sich die Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht wesentlich verändert hat“:

Das identifizierte Gebiet 032_01IG_T_f_jmOPT erstreckt sich vom Oberrhein bis zur Schwäbischen-Fränkischen Alb. Der Mittlere Jura, mit der Opalinuston-Formation an der Basis, wird von einem bedeutenden Karstgrundwasserleiter im Oberen Jura überlagert, der im Miozän und Pliozän verstärkt tiefer griff (Hoth et al. 2007; Geyer et al. 2011). Der südliche Bereich des identifizierten Gebietes südlich von Tuttlingen liegt laut Reinhardt et al. (2017) teilweise innerhalb der Verbreitung der D3-Haupt-Diskontinuität, die ein glaziales Erosionsniveau der Hoßkirch-Vergletscherung darstellt. Das Erosionsniveau erreicht nicht den Mittleren Jura, da im Landesmodell Baden-Württemberg sowohl die Tertiär- als auch Oberer Jura-Basisflächen in diesem Bereich flächendeckend vorhanden sind (Rupf & Nitsch 2008).

Anhang 4.2.3 Mittlerer Jura (Opalinuston-Formation Süddeutschland)

Das identifizierte Gebiet 032_02IG_T_f_jmOPT ist Teil der Opalinuston-Formation in Süddeutschland und wurde nicht als Teilgebiet ermittelt.

Anhang 4.2.3.1 Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG

Der Mittlere Jura, der in Süddeutschland auch unter der Bezeichnung „Braunjura-Gruppe“ bekannt ist (Mönnig et al. 2018), kann (vom Älteren zum Jüngeren) in folgende Stufen untergliedert werden: Aalenium, Bajocium, Bathonium und Callovium. Als relevantes Tongestein (Kapitel 8.2, BGE 2020j) wird die Opalinuston-Formation (Dogger α) an der Basis der Aalenium-Stufe betrachtet.

Das identifizierte Gebiet befindet sich in der Region Oberrheingraben und liegt vollständig in dem Bundesland Baden-Württemberg. Das identifizierte Gebiet besteht aus mehreren Einzelflächen.

Das süddeutsche Jurameer war Teil eines Epikontinentalmeeres, das weite Teile Europas bedeckte. Die Wassertiefen des flachen Nebenmeeres, welches sich bis zum ozeanischen Golf der Tethys im Südosten erstreckte, lagen meist zwischen 20 m und 150 m.

Indikatoren „Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich“, „Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften“ und „Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)“:

Im Aalenium fanden starke weiträumige Senkungsereignisse im Süden Deutschlands statt und führten zur Ablagerung der über 100 m mächtigen Opalinuston-Formation, die überwiegend aus leicht schluffigen Tonsteinen besteht (Geyer et al. 2011). Die Tonsteine sind wenig gegliedert, jedoch unterscheiden sich die Abschnitte der Formation im Feinsandanteil oder im Kalkgehalt.

Die laterale Variabilität der Fazies und der Lithologie wird insgesamt als sehr gering beschrieben und das Gestein als überaus homogen charakterisiert (Allia 1996; Nagra 2002; Hoth et al. 2007). Die Hauptgemengteile der Opalinuston-Formation sind Illit, Kaolinit und Chlorit, die Nebengemengteile Quarz sowie ein quellfähiges Illit-Montmorillonit-Wechselagerungsmineral (Merklein-Lempp 1985; Henke & Hiller 1985). Schmidt (1996) gibt den Wassergehalt der Opalinuston-Formation (ausgenommen der Wassergehalt innerhalb der Minerale) in einem Bereich zwischen 4 % und 12 % an. Die dunkelgraue bis schwarze Farbe ist auf feinverteilten Pyrit und geringe Mengen (größer als 3 %) organisches Material zurückzuführen (Geyer et al. 2011; Hoth et al. 2007).

Die Mächtigkeit der Opalinuston-Formation nimmt kontinuierlich von dem südwestlich-nordöstlich verlaufendem Ausbiss zwischen München-Landshut-Staubingen in Bayern in nordwestliche Richtung zu und erreicht im Bereich der Schwäbischen Alb westlich von Ulm den Maximalwert mit ca. 150 m (Hoth et al. 2007).

Die Opalinuston-Formation weist eine deutliche Zweiteilung auf, die für Baden-Württemberg gut beschrieben wurde, und besteht im unteren Bereich aus der Teufelsloch-Subformation und im oberen Bereich aus der Zillhausen-Subformation. Die Mächtigkeit der Teufelsloch-Subformation variiert im Ausstrichgebiet zwischen 90 m und 100 m, nach Tiefbohrungen im Raum Bruchsal wird eine Mächtigkeit bis über 120 m erreicht (Franz & Nitsch 2009). Die Zillhausen-Subformation, als oberer Teil der Opalinuston-Formation, zeigt kleinräumig stark wechselnde Mächtigkeiten zwischen 11 m und 40 m (Franz & Nitsch 2009). Faziell lassen sich darin folgende Unterschiede feststellen: Die Teufelsloch-Subformation im Liegenden besteht aus vollmarin-subtidalen Schlammgrund-Ablagerungen mit geringer Bodenströmung. Massenaufreten von Bositra und teilweise geringe Bioturbation deuten auf zeitweilig dysoxische Bedingungen in Bodennähe hin. In der hangenden Zillhausen-Subformation findet sich ein zunehmender Übergang in Sandgrund-Ablagerungen mit geringmächtigen subtidalen Sandbänken (Wasserfall-

bänke, Zopfplatten mit Wühlgefügen) und örtlich eingeschalteten tempestitischen Aufarbeitungsstadien (Geröllkalkbänke, Belemnitenbrekzien) (Franz & Nitsch 2009). Weitere Details über die bundesland-spezifischen Entwicklungen der Sedimentabfolge des Mittleren Jura (Opalinuston-Formation) können den Protokollen des Datenberichtes (BGE 2020i) entnommen werden.

Anhang 4.2.3.2 Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG

Indikator „Zeitspanne, über die sich die Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht wesentlich verändert hat“:

Das identifizierte Gebiet 032_02IG_T_f_jmOPT erstreckt sich im Oberrheingraben von Freiburg bis Kehl. Eine Beeinflussung durch subglaziale Rinnen kann ausgeschlossen werden (Reinhardt et al. 2017). Vor allem der südliche Oberrheingraben ist durch eine hohe seismische Aktivität charakterisiert. Jedoch auch im nördlichen und mittleren Oberrheingraben ist rezente tektonische Aktivität zu verzeichnen, wie die Vielzahl an (innerhalb der letzten eine Million Jahren) aktiven Störungen belegt. Es muss davon ausgegangen werden, dass die Gebirgsdurchlässigkeit durch jüngste tektonische Prozesse (unter eine Million Jahren) und die dadurch entstandenen (Fluid-) Wegsamkeiten, insbesondere in Störungsnähe, beeinflusst wurde.

Für die Bewertung der Zeitspanne, über die für die Betrachtungsmerkmale „Mächtigkeit“ und flächenhafte bzw. räumliche „Ausdehnung“ Änderungen auftreten, muss die Grabenentwicklung in Betracht gezogen werden. Die letzte bedeutende Subsidenzphase fand im Pliozän/Quartär statt (Ziegler 1992; Schumacher 2002). Jedoch wird angenommen, dass sich die Mächtigkeit und Ausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durch die pliozänen und quartären Ablagerungen nicht wesentlich geändert hat. Daher wird davon ausgegangen, dass seit mehr als zehn Millionen Jahren keine wesentlichen Änderungen der Mächtigkeit und der Ausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs aufgetreten ist.

Anhang 4.2.4 Unterjura (Lias-Norddeutsches Becken)

Das identifizierte Gebiet 188_00IG_T_f_ju ist Teil des Lias im Norddeutschen Becken und wurde als Teilgebiet 006_00TG_188_00IG_T_f_ju ermittelt.

Anhang 4.2.4.1 Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG

Die räumliche Charakterisierung der wesentlichen geologischen Barrieren, die direkt oder indirekt den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle gewährleisten, insbesondere des vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs oder des Einlagerungsbereichs, soll möglichst zuverlässig möglich sein. Bewertungsrelevante Eigenschaften hierfür sind die Ermittelbarkeit der relevanten Gesteinstypen und ihrer Eigenschaften sowie die Übertragbarkeit dieser Eigenschaften aus Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG.

Der Unterjura, welcher mit der informellen Bezeichnung Lias in Norddeutschland vertreten ist, kann in folgende Stufen untergliedert werden: Hettangium, Sinemurium, Pliensbachium und Toarcium. Alle Stufen sind im Betrachtungsraum Norddeutsches Becken

verbreitet. Als relevantes Tongestein (Kapitel 8.2, BGE 2020j) werden im Norddeutschen Becken mit Einschränkungen alle Stufen betrachtet. Die Einschränkungen betreffen in Brandenburg und Berlin die Abfolgen des Hettangium, welche in diesen zwei Bundesländern nicht als Wirtsgestein identifiziert wurden. In Mecklenburg-Vorpommern und Nordrhein-Westfalen treten im Unter-Sinemurium keine geeigneten Tongesteinsformationen auf. In Niedersachsen sind im Ober-Toarcium keine geeigneten Tongesteine vorhanden. Insgesamt wurde jedoch der überwiegende Teil des Unterjura als potentielles Wirtsgestein identifiziert.

Das identifizierte Gebiet befindet sich in der Region Norddeutsches Becken und erstreckt sich über die Bundesländer Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen, Sachsen-Anhalt und Schleswig-Holstein. Das identifizierte Gebiet besteht aus mehreren Einzelflächen.

Zum Zeitpunkt der Ablagerung der Sedimentabfolgen des Lias im Norddeutschen Becken, bildete dieses einen Teil eines epikontinentalen Flachmeers, welches große Teile Zentraleuropas bedeckte (Meschede 2018). Während der Obertrias und des Unterjura entstanden aufgrund Ost-West gerichteter Dehnungstektonik im Norddeutschen Becken stark eingetiefte Tröge, als Teil Nordwest-Südost verlaufender Grabensysteme (Barth et al. 2018). Infolge eines globalen Meeresspiegelanstiegs und regionaler thermischer Subsidenz erfolgen am Übergang der Trias zum Jura marine Transgressionen aus westlicher Richtung in das Norddeutsche Becken, welche ihre größte ostwärts gerichtete Ausdehnung im Pliensbachium erreichen (Barth et al. 2018).

Indikatoren „Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich“, „Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften“ und „Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)“:

Insgesamt ist der Lias gekennzeichnet durch eine Abfolge mariner Transgressionen und Regressionen. Der Westteil des Norddeutschen Beckens stellt im Lias größtenteils einen marinen Faziesraum dar, welcher durch die Ablagerung vorwiegend toniger Sedimente gekennzeichnet ist. Im Ostteil dominierten vornehmlich limnisch-brackische Bedingungen. Dieser Ablagerungsraum wurde durch den Eintrag sandiger, terrigener Sedimente des Fennoskandischen Schilds (Petzka et al. 2004), und des Böhmisches Massivs beeinflusst (Paul et al. 2008). Generell ist das Norddeutsche Becken im Lias geprägt durch eine vorwiegend tonige Beckenfazies im Westen sowie durch die Ablagerung sandiger Sedimente im Ostteil des Beckens und in Küstennähe, als Teil der Beckenrandfazies (Hoth et al. 2007).

Die Gesamtmächtigkeit der Gesteinsserien des Lias beträgt in Norddeutschland maximal ca. 1500 m (Hoth et al. 2007). Hohe Mächtigkeiten treten in Nordwestdeutschland in den Beckenzentren des Norddeutschen Beckens und des Niedersächsischen Beckens auf. In Randsenken wie dem Gifhorner Trog, deren Entstehung auf halokinetische Prozesse zurückzuführen ist, weisen die Sedimentgesteinsabfolgen des Lias ebenfalls bedeutende Mächtigkeiten auf. Aufgrund regional unterschiedlicher Abtragungsraten ist die Gesamtmächtigkeit des Lias in Niedersachsen und Schleswig-Holstein gebietsweise

deutlich reduziert oder die Sedimentgesteine wurden teils vollständig erodiert (Hoth et al. 2007). Im östlichen Teil Norddeutschlands schwankt die Gesamtmächtigkeit des Lias in der Regel zwischen 100 m bis 400 m, nur lokal stark begrenzt werden auch wesentlich höhere Mächtigkeiten von bis zu 800 m angetroffen (Hoth et al. 2007). Weitere Details über die bundeslandspezifischen Entwicklungen der Sedimentgesteinsabfolgen des Lias können den Protokollen des Datenberichtes entnommen werden.

Anhang 4.2.4.2 Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG

Indikator „Zeitspanne, über die sich die Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht wesentlich verändert hat“:

Die Sedimentgesteine im Untergrund Norddeutschlands sind von der im Perm beginnenden Entwicklung des Norddeutschen Beckens geprägt. Prozesse, die seit dem späten Miozän die Mächtigkeit, Ausdehnung und Gebirgsdurchlässigkeit der Tongesteinsabfolgen des Unterjura Norddeutschlands potentiell beeinflusst haben, werden im Folgenden kurz beschrieben.

In Norddeutschland treten elsterzeitliche subglaziale Rinnen als Erosionsstrukturen mit einer Tiefe von über 500 m unter Geländeoberkante auf (Stackebrandt 2009; Hönemann et al. 1995). Die Teufenlage der Strukturbasis des Unterjura variiert im IG 188_00IG_T_f_ju zwischen 400 m bis 1500 m unter Geländeoberkante. Eine Veränderung durch den Einschnitt subglazialer Rinnen ist somit möglich (Stackebrandt 2009; Hönemann et al. 1995).

Indikator „Zeitspanne, über die sich die Gebirgsdurchlässigkeit nicht wesentlich verändert hat“:

Im Zusammenhang mit aufsteigenden Salzstöcken kam es in unmittelbarer Nähe von Salzdiapiren bzw. Salzkissen im Norddeutschen Becken zu jungen halokinetischen Bewegungen. Eine Veränderung der Gebirgsdurchlässigkeit in Folge einer Änderung der Auflast durch lokale Erosion und Sedimentation während der halokinetischen und halotektonischen Hebungs- und Senkungsprozesse im Norddeutschen Becken ist möglich (Hinsch 1974; Maystrenko et al. 2006; Lehné & Sirocko 2010). Der flächenhafte Einfluss auf lokale Gebiete sowie das Norddeutsche Becken ist nicht abschätzbar.

Das Norddeutsche-Becken gehört zur neotektonisch aktiven Mitteleuropäischen Senkungszone (Garetsky et al. 2001). Tektonische Aktivität als potentieller Faktor für die Änderung der Mächtigkeit und Gebirgsdurchlässigkeit im Zuge des Absinkens des Norddeutschen Beckens um bis zu 400 m ist möglich (Stackebrandt 2010; Scheck et al. 2003). Damit sind wesentliche und unwesentliche versenkungsbedingte Veränderungen der Gebirgsdurchlässigkeit möglich. Eine Veränderung der Ausdehnung durch Auflast ist nicht zu erwarten.

Anhang 4.3 Kreide

Anhang 4.3.1 Oberkreiden (Ostbrandenburg-Senke und Nordsudetische Senke)

Das identifizierte Gebiet 204_01IG_T_f_kro ist Teil der Oberkreide in der Ostbrandenburg-Senke und Nordsudetischen Senke und wurde als Teilgebiet 008_01TG_204_01IG_T_f_kro ermittelt.

Anhang 4.3.1.1 Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG

Die räumliche Charakterisierung der wesentlichen geologischen Barrieren, die direkt oder indirekt den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle gewährleisten, insbesondere des vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs oder des Einlagerungsbereichs, soll möglichst zuverlässig möglich sein. Bewertungsrelevante Eigenschaften hierfür sind die Ermittelbarkeit der relevanten Gesteinstypen und ihrer Eigenschaften sowie die Übertragbarkeit dieser Eigenschaften aus Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG.

Stratigraphisch ist die Oberkreide in die Stufen Cenomanium, Turonium, Coniacium, Santonium, Campanium und Maastrichtium (vom Älteren zum Jüngeren) gegliedert. Alle Stufen sind in Brandenburg vorhanden. In der Ostbrandenburg-Senke und der nordwestlichen Nordsudetischen Senke treten jedoch nur Ablagerungen des Cenomanium bis Santonium auf. Als relevante Tongesteine (Kapitel 8.2, BGE 2020j) werden in Brandenburg die Emscher-Formation, welche die Stufen Coniacium bis Campanium umfasst, und in Sachsen die Stufen Turonium bis Santonium betrachtet. Das identifizierte Gebiet 204_01IG_T_f_kro befindet sich im Süden Brandenburgs in der Ostbrandenburg-Senke und reicht bis nach Sachsen in den nordwestlichen Teil der Nordsudetischen Senke. Das identifizierte Gebiet besteht aus mehreren Einzelflächen.

Zu Beginn der Oberkreide war Brandenburg flächenhaft überflutet, was im Oberturon durch die Hebung des Prignitz-Lausitzer Walls und der Flechtingen-Roßlau-Scholle beendet wurde. Im Coniacium bis Campanium wurden ältere Sedimente aus den Hebungsgebieten in die benachbarten Beckenbereiche umgelagert.

Indikatoren „Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich“, „Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften“ und „Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)“:

Die flachmarinen Sedimente des Maastrichtium sind nur noch in isolierten Becken vorhanden (Voigt 2015). Die postkretazische Entwicklung hatte durch die Hebung des Prignitz-Lausitz-Walls und halokinetische Aktivitäten einen wesentlichen Einfluss auf die heutige Mächtigkeit und Verbreitung der Sedimente der Oberkreide (Reich 2000).

Das Verbreitungsgebiet der Oberkreide in Brandenburg erstreckt sich über die Nord- und Ostbrandenburg-Senke und setzt sich im Süden nach Sachsen in die Nordsudetische Senke fort. Von diesem Gebiet, durch den Prignitz-Lausitzer Wall getrennt, finden sich im Westen an der Grenze zu Sachsen-Anhalt die Oberkreide-Vorkommen des Altmark-Beckens (Voigt 2015). Während die nördlichen Gebiete in Schreibkreide-Fazies abgelagert wurden, traten in den südlichen Bereichen verschiedene Sedimentationsbedingungen während der Oberkreide auf, die zu lithologisch variablen Ablagerungen geführt haben. (Musstow 1976a, 1976c, 1976b).

Die Emscher-Formation ist in Brandenburg aus monotonen siltigen Mergeln und Tonmergelsteinen aufgebaut, die außer Bioturbation keine Schichtungsmerkmale aufweisen. Im Südosten von Brandenburg treten erhöhte Sandgehalte auf. Im Norden besteht die Emscher-Formation aus Schreibkreide, die sich zwischen Berlin, Bad Freienwalde und Frankfurt/Oder mit Tonmergeln verzahnt. Im Süden der Ostbrandenburg-Senke finden sich Tonmergelsteine des relativ flachen Schelfbereichs. Im Südwesten Brandenburgs treten neben Sand- und Siltsteinen siltige Tonmergelsteine auf (Voigt 2015; Reich 2000).

In der Nordsudetischen Senke in Sachsen wurden vom Mittleren Turonium bis Mittleren Santonium Tonmergelsteine und kalkhaltige Tonsteine abgelagert. Im Osten treten zudem im Coniacium und Santonium Sandsteine und Siltsteine auf, die den Wechsel von mariner und terrestrischer Sedimentation im Küstengebiet widerspiegeln (Musstow 1976c, 1976b; Voigt 2015; Tröger 2011).

Indikator „Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit“:

Die postkretazische Entwicklung hatte durch die Hebung des Prignitz-Lausitz-Walls und halokinetische Aktivitäten einen wesentlichen Einfluss auf die heutige Mächtigkeit und Verbreitung der Sedimente der Oberkreide (Reich 2000). Neotektonische Beanspruchung des nordmitteleuropäischen Intraplattenbereichs, wo das Norddeutsche Becken sich befindet, haben bis heute Auswirkungen auf die regionale Tektonik. Faltungsimpulse aus den Westkarpaten bewirken eine dilatative Beanspruchung an Nordwest-Südost orientierten Störungen und Faltungsimpulse aus den Alpen bewirken transpressive Dynamik an Störungen (Stackebrandt & Franke 2015). Die Nordwest-Südost orientierten Störungen gehören zum System der Mitteldeutschen Hauptabbrüche und sind durch die neotektonische Beanspruchung reaktiviert worden (Abschnitte der Innerlausitzer Störung, des Lausitzer Hauptabbruchs). Die Versatzbeträge überschreiten selten 70 m (Stackebrandt 2010).

Die Mächtigkeit der Emscher-Formation nimmt in Brandenburg von Norden nach Südosten von ca. 200 m auf ca. 300 m zu. Maximal treten Mächtigkeiten von 470 m auf (Voigt 2015). In der Nordsudetischen Senke können die Sedimente des Turonium, Coniacium und Santonium jeweils Mächtigkeiten von mehr als 200 m, maximal 470 m, erreichen (Tröger 2011).

Anhang 4.3.1.2 Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG

Indikatoren „Zeitspanne, über die sich die Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht wesentlich verändert hat“ und „Zeitspanne, über die sich die Gebirgsdurchlässigkeit nicht wesentlich verändert hat“:

Im identifizierten Gebiet 204_01IG_T_f_kro liegt die Tiefe der Basisfläche der Oberkreide zwischen 400 m und 1200 m unter Geländeoberkante. Eine Veränderung durch den Einschnitt subglazialer Rinnen ist somit möglich. Hohe Mächtigkeiten der känozoischen Schichten sind lediglich im Nordwesten des identifizierten Gebiets als mögliche Auflast zu verzeichnen (Stackebrandt 2010). Seit Beginn des Oligozän kam es in Teilen

des identifizierten Gebiets zu einer Senkung von weniger als 100 m. Nur im nördlichen Teil trat eine stärkere Senkung von größtenteils 100 m bis 200 m auf (Stackebrandt 2010).

Anhang 4.3.2 Oberkreide (Münsterländer Kreidebecken)

Das identifizierte Gebiet 204_02IG_T_f_kro ist Teil der Oberkreide des Münsterländer Kreidebeckens und wurde als Teilgebiet 008_02TG_204_02IG_T_f_kro ermittelt.

Anhang 4.3.2.1 Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG

Die Oberkreide ist in sechs Stufen untergliedert: Cenomanium, Turonium, Coniacium, Santonium, Campanium und Maastrichtium. Alle Stufen kommen in Nordrhein-Westfalen vor, jedoch sind keine vollständigen Profile der Oberkreide-Abfolge vorhanden. Die Ablagerungen der Oberkreide beschränken sich in Nordrhein-Westfalen auf das Münsterländer Kreidebecken und den Raum Aachen und sind größtenteils an der Geländeoberfläche oder unter geringmächtiger Überdeckung zu finden (Hiß & Schönfeld 2000). Im Münsterländer Kreidebecken treten die Stufen Coniacium bis Campanium auf. Als relevantes Tongestein (Kapitel 8.2, BGE 2020j) wird in Nordrhein-Westfalen die Emscher-Formation im Münsterländer Kreidebecken betrachtet. Das identifizierte Gebiet 204_02IG_T_f_kro liegt in Nordrhein-Westfalen im Münsterländer Kreidebecken und reicht südlich von Osnabrück bis nach Niedersachsen, wo es jedoch nur eine sehr kleine Fläche einnimmt. Das identifizierte Gebiet besteht aus einer einzelnen Fläche.

*„Indikatoren „Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich“
„Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften“
und „Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)“:*

Zu Beginn der Oberkreide war das Münsterland vollständig vom Meer bedeckt. Es kam zur Bildung eines subsequenten Randtrogs mit mächtigen Sedimentablagerungen, der dem Niedersächsischen Tektogen südlich vorgelagert ist (Hiß & Seibertz 2000). Die Konfiguration der Oberkreide in der Münsterländer Bucht blieb während der darauffolgenden Epochen unverändert (Grabert 1998). Das Münsterländer Kreidebecken ist faziell zweigeteilt in einen östlichen Teil, der von den monotonen Tonmergel- und Mergelsteinablagerungen der Emscher-Formation dominiert wird, und einen zentralen und südlichen Teil mit vielfältigeren und meist nicht flächenhaft erhaltenen Schichtenfolgen (Hiß et al. 2018).

Die Emscher-Formation enthält im Nordost-Münsterland vorwiegend Tonmergelstein, was unter anderem in der lithologischen Gliederung der „Emscher-Formation in tonig-schluffiger Fazies Harsewinkel“ (GD NRW, DokID 11842255) deutlich wird. Untergeordnet treten auch Kalkmergel- und Mergelkalksteine auf (Hiß 2018). In den Schichtenverzeichnissen der Bohrungen in Nordrhein-Westfalen, die jedoch nur für den nördlichen Teil der ausgewiesenen Fläche vorhanden waren, finden sich Abfolgen von Tonmergelstein und Tonstein. Insgesamt ist im Münsterland von Osten nach Westen und zum Teil vom Liegenden zum Hangenden ein Übergang von reinem Tonmergelstein in siltigen und sandigen Tonmergelstein und letztlich in Grünsand auszumachen (Hiß & Seibertz

2000) Im zentralen Münsterland treten auch vereinzelt Kalksteinbänke auf (Hiß & Seibertz 2000). Im Ruhrgebiet sind Siltmergelsteine und gelegentlich Feinsandmergelsteine zu finden. Die Emscher-Formation kann im Nordost-Münsterland (Raum Emsdetten-Ladbergen) Mächtigkeiten von mehr als 2000 m, im zentralen Münsterland (Raum Münster-Gütersloh) bis 1000 m und im südlichen Münsterland und östlichen Ruhrgebiet bis 500 m erreichen (Hiß 2018).

Anhang 4.3.2.2 Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG

Indikatoren „Zeitspanne, über die sich die Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht wesentlich verändert hat“ und „Zeitspanne, über die sich die Gebirgsdurchlässigkeit nicht wesentlich verändert hat“:

Die Emscher-Formation liegt im identifizierten Gebiet 204_02IG_T_f_kro in Tiefen zwischen 400 m und 1500 m unter Geländeoberkante (Basisfläche). Eine Veränderung durch den Einschnitt subglazialer Rinnen ist somit möglich. Im identifizierten Gebiet sind kaum känozoische Sedimente als Auflast zu verzeichnen. Durch die saxonisch-tertiären Bewegungen wurden zwar die Randgebiete des Münsterländer Kreidebeckens betont, jedoch blieben die Oberkreide-Ablagerungen des Beckens selbst in seiner ursprünglichen Konfiguration erhalten (Grabert 1998).

Anhang 4.3.3 Unterkreide (Norddeutschland)

Das identifizierte Gebiet 202_01IG_T_f_kru ist Teil der Unterkreide in Norddeutschland und wurde nicht als Teilgebiet ermittelt.

Anhang 4.3.3.1 Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG

Unterkreideablagerungen sind vor allem im norddeutschen Raum und im Süddeutschen Molassebecken ausgebildet. Als relevante Tongesteine treten sie jedoch nur in Norddeutschland auf, wo sie die Mindestanforderungen gebietsweise erfüllen.

Während der Unterkreide erstreckte sich ein Festlandgebiet von Schottland über die Ardennisch-Rheinische Masse bis hin zum Ostsudetischen Becken, wodurch im Raum Aachen, der Münsterländer Kreidebucht, dem Niedersächsischen Becken, dem Sächsischen Kreidebecken, im Raum Regensburg sowie in der Oberpfalz vorwiegend siliziklastische Sedimente wie Sand- und Tonsteine und vermindert kalkige Siltsteine, Mergel und Kalksteine abgelagert wurden (Meschede 2018).

Der Übergang vom Oberjura zur Unterkreide (Berriasium) ist in Norddeutschland durch die Absenkung des Niedersächsischen Beckens infolge der kimmerischen Orogenese, eine nahezu vollständige Abtrennung vom offenen Meer und einen Meeresspiegelanstieg, geprägt. Während dieser Regressionsphase wurde die Münderformation abgelagert, die durch einen Wechsel in einen lagunär-limnisch dominierten Ablagerungsraum in den „Deutschen Wealden“ (Bückeberg-Formation) übergeht (Meschede 2018; Hoth et al. 2007).

*Indikatoren „Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich“
„Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften“
und „Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)“:*

Typische Ablagerungen sind sapropelische Tonsteine im zentralen Teil des Beckens („tonige Beckenfazies“) sowie sand-dominierte Randbereiche („Randfazies“) (Hoth et al. 2007; Reinhold et al. 2011). Während der restlichen Unterkreide stellt das Niedersächsische Becken hauptsächlich einen marinen Sedimentationsbereich dar, wobei jedoch abwechselnde Regressions- und Transgressionszyklen (max. 1300 m bis 2000 m) in den siliziklastischen Ablagerungen auftreten und Korngrößenwechsel verursachen (Tonsteine, Tonmergelsteine, Mergelsteine mit Einschaltungen von Sandlagen) (Meschede 2018; Hoth et al. 2007; Filbert et al. 2004).

Das identifizierte Gebiet 202_01IG_T_f_kru befindet sich auf der Pompeckj-Schwelle, die sich während des Berriasiums bildete und sich über die Bundesländer Hamburg, Schleswig-Holstein und Teile Niedersachsens erstreckt. Während der gesamten Unterkreide stellt die Pompeckj'sche Schwelle ein ausgeprägtes Hochgebiet dar, das während des ältesten Abschnitts der Unterkreide noch vollständig terrestrisch war und sich anschließend immer mehr zum Ablagerungsraum entwickelte (Kockel et al. 1969). Ablagerungen des Berriasiums sind lediglich im Nordwesten Schleswig-Holsteins und in durch halokinetische Vorgänge geprägten Bereichen zu finden, in denen lokale Senken einen limnisch-terrestrischen Ablagerungsraum bilden (Stets et al. 1969). Im Valanginium setzte eine langsame, schrittweise Überflutung der Pompeckj'schen Schwelle von Nord/Nordwesten ein (Kockel et al. 1969). Insbesondere im Nordwesten und Westen der Pompeckj'schen Schwelle wechselte das Ablagerungsmilieu von limnisch-terrestrisch mit verstärkten Sandeinlagerungen hin zu vollmarin mit hohen Tongehalten (Kockel et al. 1969). Die größten Mächtigkeiten werden in halokinetischen Randsenken erreicht (Kockel et al. 1969). Während des Hauteriviums setzte sich die im Valanginium beginnende Transgression der Schwellenregion in südlich/südöstliche Richtung fort, sodass lediglich die westlichen Randbereiche der Ostholsteinischen-Nordmecklenburgischen Schwelle sowie der südlichste Abschnitt der Schwelle weiterhin festländisch dominiert waren (Kockel et al. 1969). Auch während des Barremiums herrschten im nordwestlichen und mittleren Teil der Pompeckj'schen Schwelle flachmarine Verhältnisse, die die Ablagerung von Ton- und Tonmergelsteinen zur Folge hatten (Stets et al. 1969). Eine erneut einsetzende Transgression während des Aptium führte zur Erhaltung des flachmarinen Sedimentationsbeckens im nordwestlichen und zentralen Teil der Pompeckj'schen Scholle (Stets et al. 1969). Verbreitete Sedimente dieser Einheit sind ebenfalls dominierend Ton- und Tonmergelsteine und zum ersten Mal sind auch Kalksteine zu finden (Stets et al. 1969). Während des Albiums fand eine verstärkte Ausweitung des Meeres statt, die eine Ablagerung von Tonsteinen im Unteralbium und von Tonmergelsteinen im Mittel- und Oberalbium zur Folge hatte (Stets et al. 1969).

Das identifizierte Gebiete 202_01IG_T_f_kru erstreckt sich über die Bundesländer Hamburg, Niedersachsen und Schleswig-Holstein und besteht aus mehreren Einzelflächen. Weitere Details über die bundeslandspezifischen Entwicklungen der Sedimentabfolge

der Unterkreide können den Protokollen des Datenberichtes (BGE 2020I) entnommen werden.

Indikator „Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit“:

Starke halokinetische Aktivität ist während der gesamten Unterkreide zu verzeichnen, die insbesondere über aufsteigenden Diapirstrukturen zu Erosion und damit verbunden Hiaten führt. In Bereichen ohne Salzaktivität ist die Lagerung der Unterkreideschichten annähernd horizontal (Filbert et al. 2004).

Anhang 4.3.3.2 Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG

Indikator „Zeitspanne, über die sich die Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht wesentlich verändert hat“:

Sedimentgesteine im Untergrund Norddeutschlands sind von der im Perm beginnenden Entwicklung des Norddeutschen Beckens geprägt. Prozesse, die seit dem späten Miozän die Mächtigkeit, Ausdehnung und Gebirgsdurchlässigkeit der Tongesteinsabfolgen der Unterkreide Norddeutschlands potentiell beeinflusst haben, werden im Folgenden kurz beschrieben.

In Norddeutschland treten elsterzeitliche subglaziale Rinnen als Erosionsstrukturen mit einer Tiefe von über 500 m unter Geländeoberkante auf (Stackebrandt 2009; Hönemann et al. 1995). Die Teufenlage der Strukturbasis des Unterjura variiert im IG 202_02IG_T_f_kru zwischen 400 – 1400 m unter Geländeoberkante. Eine Veränderung durch den Einschnitt subglazialer Rinnen ist somit möglich, da in Norddeutschland subglaziale Rinnen bis in Tiefen von über 500 m auftreten (Stackebrandt 2009; Hönemann et al. 1995).

Indikator „Zeitspanne, über die sich die Gebirgsdurchlässigkeit nicht wesentlich verändert hat“:

Im Zusammenhang mit aufsteigenden Salzstöcken kam es in unmittelbarer Nähe von Salzdiapiren bzw. Salzkissen im Norddeutschen Becken zu jungen halokinetischen Bewegungen. Eine Veränderung der Gebirgsdurchlässigkeit in Folge einer Änderung der Auflast durch lokale Erosion und Sedimentation während der halokinetischen und halotektonischen Hebungs- und Senkungsprozesse im Norddeutschen Becken ist möglich (Hinsch 1974; Maystrenko et al. 2006; Lehné & Sirocko 2010). Der flächenhafte Einfluss auf lokale Gebiete sowie das Norddeutsche Becken ist nicht abschätzbar.

Das Norddeutsche-Becken gehört zur neotektonisch aktiven Mitteleuropäischen Senkungszone (Garetsky et al. 2001). Tektonische Aktivität als potentieller Faktor für die Änderung der Mächtigkeit und Gebirgsdurchlässigkeit im Zuge des Absinkens des Norddeutschen Beckens um bis zu 400 m ist möglich (z. B. Stackebrandt 2010; Scheck et al. 2003). Damit sind wesentliche und unwesentliche versenkungsbedingte Veränderungen der Gebirgsdurchlässigkeit möglich. Eine Veränderung der Ausdehnung durch Auflast ist nicht zu erwarten.

Anhang 4.3.4 Unterkreide (Norddeutschland)

Das identifizierte Gebiet 202_02IG_T_f_kru ist Teil der Unterkreide in Norddeutschland und wurde als Teilgebiet 007_00TG_202_02IG_T_f_kru ermittelt.

Anhang 4.3.4.1 Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG

Unterkreideablagerungen sind vor allem im norddeutschen Raum und im Süddeutschen Molassebecken ausgebildet. Als relevantes Tongestein treten sie jedoch nur in Norddeutschland auf, wo sie die Mindestanforderungen gebietsweise erfüllen.

Während der Unterkreide erstreckte sich ein Festlandgebiet von Schottland über die Ardennisch-Rheinische Masse bis hin zum Ostsudetischen Becken, wodurch im Raum Aachen, der Münsterländer Kreidebucht, dem Niedersächsischen Becken, dem Sächsischen Kreidebecken, im Raum Regensburg sowie in der Oberpfalz vorwiegend siliziklastische Sedimente wie Sand- und Tonsteine und vermindert kalkige Siltsteine, Mergel und Kalksteine abgelagert wurden (Meschede 2018).

Der Übergang vom Oberjura zur Unterkreide (Berriasium) ist in Norddeutschland durch die Absenkung des Niedersächsischen Beckens infolge der kimmerischen Orogenese, eine nahezu vollständige Abtrennung vom offenen Meer und einen Meeresspiegelanstieg geprägt. Während dieser Regressionsphase wurde die Münderformation abgelagert, die durch einen Wechsel in einen lagunär-limnisch dominierten Ablagerungsraum in den „Deutschen Wealden“ (Bückeberg-Formation) übergeht (Meschede 2018; Hoth et al. 2007).

Indikatoren „Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich“, „Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften“ und „Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)“:

Typische Ablagerungen sind sapropelische Tonsteine im zentralen Teil des Beckens („tonige Beckenfazies“) sowie sand-dominierte Randbereiche („Randfazies“) (Hoth et al. 2007; Reinhold et al. 2011). Während der restlichen Unterkreide stellt das Niedersächsische Becken hauptsächlich einen marinen Sedimentationsbereich dar, wobei jedoch abwechselnde Regressions- und Transgressionszyklen (max. 1300 m bis 2000 m) in den siliziklastischen Ablagerungen auftreten und Korngrößenwechsel verursachen (Tonsteine, Tonmergelsteine, Mergelsteine mit Einschaltungen von Sandlagen) (Meschede 2018; Hoth et al. 2007; Filbert et al. 2004).

Das identifizierte Gebiet 202_02IG_T_f_kru ist Teil des Niedersächsischen Beckens, einem W-E gestreckten permanenten Sedimentationsraum während der gesamten Unterkreide. Zu Beginn der Unterkreide setzte eine flächenhafte Ingression ein, die durch eine geringmächtige Wechselfolge brackischer und vollmariner Horizonte belegt ist (Kockel et al. 1969). Während des Wealden ist das Niedersächsische Becken aufgrund fazieller Unterschiede in drei Teilgebiete zu unterteilen (Jaritz et al. 1969). Das Hauptbecken zwischen der Ostholländischen Triasplatte im Westen und der Hildesheimer Halbinsel im Osten ist vorwiegend durch tonige Ablagerungen geprägt, wohingegen im mittleren Bereich stark zunehmende sandige Ablagerungen Richtung Osten zu verzeichnen sind und

im östlichen Teil vorwiegend sandige Fazies vorherrscht (Jaritz et al. 1969). Die im Berriasium erstellte Dreiteilung des Beckens ist auch im Valanginium erkennbar, die sich nun auch in Mächtigkeitsunterschieden zwischen den einzelnen Bereichen widerspiegeln (Kockel et al. 1969). Im Hauptbecken treten Mächtigkeiten von über 300 m bis zu 500 m mit vorwiegend toniger- und tonmergeliger Fazies und einer Zunahme des Sandgehaltes in den Randbereichen auf (Kockel et al. 1969). Maximale Mächtigkeiten der sandigen Ablagerungen betragen im mittleren Teilbecken bis zu 100 m und im östlichen Bereich werden bis zu 200 m erreicht (Kockel et al. 1969). Im Hauterivium kam es unter unveränderten Sedimentationsbedingungen zur Ablagerung einer Wechselfolge aus Ton- und Mergelsteinen, die im Beckenzentrum Gesamtmächtigkeiten von bis zu 300 m erreichen (Hiß & Mutterlose 2000). Das Barremium ist im westlichen Teilbecken nahezu vollständig erodiert, wohingegen im östlichen Bereich nahezu vollständige Serien zu finden sind (Stets et al. 1969). Die einheitliche Ausbildung von Ton- und Tonmergelsteinen ist auf das weiterhin marine Ablagerungsmilieu zurückzuführen (Stets et al. 1969). Die im Aptium verstärkte Transgression resultiert im Niedersächsischen Becken weiterhin in einer Ablagerung tonig bis tonmergeliger Fazies mit erhöhten Mächtigkeiten im östlichen Beckenabschnitt (Stets et al. 1969). Während des Albiums wird der im Aptium beginnende Vorstoß des Meeres intensiv fortgesetzt. Ablagerungen des Unteralbiums sind vorwiegend Tonsteine und während des Mittel- und Oberalbiums wurden hauptsächlich Tonmergelsteine abgelagert (Stets et al. 1969).

Das identifizierte Gebiet 202_021G_T_f_kru erstreckt sich über die Bundesländer Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen und Sachsen-Anhalt und besteht aus mehreren Einzelflächen. Weitere Details über die bundeslandspezifischen Entwicklungen der Sedimentabfolge der Unterkreide können den Protokollen des Datenberichtes (BGE 2020I) entnommen werden.

Indikator „Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit“:

Starke halokinetische Aktivität ist während der gesamten Unterkreide zu verzeichnen, die insbesondere über aufsteigenden Diapirstrukturen zu Erosion und damit verbunden zu Hiaten führt. In Bereichen ohne Salzaktivität ist die Lagerung der Unterkreideschichten annähernd horizontal (Filbert et al. 2004).

Anhang 4.3.4.2 Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG

Indikator „Zeitspanne, über die sich die Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht wesentlich verändert hat“:

Sedimentgesteine im Untergrund Norddeutschlands sind von der im Perm beginnenden Entwicklung des Norddeutschen Beckens geprägt. Prozesse, die seit dem späten Miozän die Mächtigkeit, Ausdehnung und Gebirgsdurchlässigkeit der Tongesteinsabfolgen der Unterkreide Norddeutschlands potentiell beeinflusst haben, werden im Folgenden kurz beschrieben.

In Norddeutschland treten elsterzeitliche subglaziale Rinnen als Erosionsstrukturen mit einer Tiefe von über 500 m unter Geländeoberkante auf (Stackebrandt 2009; Hönemann

et al. 1995). Die Teufenlage der Strukturbasis des Unterjura variiert im IG 202_02IG_T_f_kru zwischen 400 – 1400 m unter Geländeoberkante. Eine Veränderung durch den Einschnitt subglazialer Rinnen ist somit möglich, da in Norddeutschland subglaziale Rinnen bis in Tiefen von über 500 m auftreten (Stackebrandt 2009; Hönemann et al. 1995).

Indikator „Zeitspanne, über die sich die Gebirgsdurchlässigkeit nicht wesentlich verändert hat“:

Im Zusammenhang mit aufsteigenden Salzstöcken kam es in unmittelbarer Nähe von Salzdiapiren bzw. Salzkissen im Norddeutschen Becken zu jungen halokinetischen Bewegungen. Eine Veränderung der Gebirgsdurchlässigkeit in Folge einer Änderung der Auflast durch lokale Erosion und Sedimentation während der halokinetischen und halotektonischen Hebungs- und Senkungsprozesse im Norddeutschen Becken ist möglich (Hinsch 1974; Maystrenko et al. 2006; Lehné & Sirocko 2010). Der flächenhafte Einfluss auf lokale Gebiete sowie das Norddeutsche Becken ist nicht abschätzbar.

Das Norddeutsche-Becken gehört zur neotektonisch aktiven Mitteleuropäischen Senkungszone (Garetsky et al. 2001). Tektonische Aktivität als potentieller Faktor für die Änderung der Mächtigkeit und Gebirgsdurchlässigkeit im Zuge des Absinkens des Norddeutschen Beckens um bis zu 400 m ist möglich (z. B. Stackebrandt 2010; Scheck et al. 2003). Damit sind wesentliche und unwesentliche versenkungsbedingte Veränderungen der Gebirgsdurchlässigkeit möglich. Eine Veränderung der Ausdehnung durch Auflast ist nicht zu erwarten.

Anhang 5 Ergänzungen zur Vorgehensweise der Bewertung von Anlage 3 und 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG in stratiformen Salzformationen

Anhang 5.1 Tertiär

In Folge der seit Beginn der Kreide anhaltenden Entwicklung der Alpen kam es im Tertiär zu einer starken tektonischen Beanspruchung des südwestdeutschen Raumes. Im Mittleren Eozän bildeten sich zwei großräumige Senken, das Molassebecken und der Oberrheingraben. Letzterer war zunächst als Dehnungsbruch ausgebildet und entwickelte sich später durch die anhaltende alpidische Orogenese als Teil einer transkontinentalen Scherzone zu einer kompliziert gebauten Beckenstruktur, unter der es dadurch zu einer Verdünnung der Erdkruste und einer Aufwölbung der Kruste-Mantel-Grenze (Moho) kam („passive rifting“). Dadurch wurde der zentrale Bereich des Beckens stark abgesenkt, was zu zeitweisen Meereseinbrüchen der zu der Zeit bestehenden Meere in Norddeutschland und im Molassebecken führte. Durch Sedimentation und vor allem im südlichen Bereich des Oberrheingrabens begünstigt durch Hangrutschungen und Geröllschüttungen kam es zur Bildung eines Grabensees. In trockenen Klimaphasen verlandete dieser zunehmend und entwickelte sich zu abflusslosen Salzseen. In diesen wurden durch Verdampfung des Wassers Evaporite (Steinsalz, Kalisalz, Anhydrit) abgelagert. Da das Dehnungsregime weiter anhielt, kam es weiterhin zur Absenkung des Beckeninneren, was zu einer zyklischen Wiederholung der Evaporitbildung führte (Geyer et al. 2011). Die Phasen marinen Zuflusses in das Becken scheinen dabei sehr kurz gewesen zu sein, da sich kaum Spuren stärkeren marinen Einflusses (z. B. Fossilien) finden lassen.

Indikator „Zeitspanne, über die sich die Gebirgsdurchlässigkeit nicht wesentlich verändert hat“:

Spätestens ab dem frühen Miozän kam es zu einer starken Hebung des süddeutschen Raumes, wodurch die Gebiete des Oberrheingrabens und des Molassebeckens über den Meeresspiegel gehoben wurden. Seitdem findet in dieser Region keine marin bedingte Sedimentation mehr statt (Geyer et al. 2011). Die Steinsalzlager des Eozän sind vorwiegend im südlichen und mittleren Oberrheingraben verbreitet (Reinhold et al. 2014).

Anhang 5.1.1 Tertiär (Oberrheingraben)

Das identifizierte Gebiet 196_00IG_S_f_t ist Teil des Tertiärs des Oberrheingrabens und wurde nicht als Teilgebiet ermittelt.

Anhang 5.1.1.1 Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG

Im Oberrheingraben sind mächtige salinare, stratiforme Ablagerungen des Tertiärs in der Wittelsheim- und Pechelbronn -Formation mit Wirtsgesteinspotential bekannt. Die Pechelbronn-Formation enthält salinar geprägte Schichtenfolgen bis in den mittleren Oberrheingraben (Geyer et al. 2011; Grimm et al. 2011b).

Indikator „Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften“:

Die Wittelsheim-Formation erreicht eine Mächtigkeit von mehr als 1000 m bei Buggingen. Diese Formation wird in 3 Salzzonen gegliedert. Die untere und mittlere Zone wird ca. 300 m mächtig. Die Obere Salzfolge kann bis zu 2 Zonen mit Kalisalzen enthalten. Sonst bestehen die Folgen aus Halit-führenden Schichten und Tonmergelgesteinen mit Anhydritlagen und -knollen (Reinhold et al. 2014).

Die Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen, ihre räumliche Verteilung im Endlagerbereich einschließlich ihrer Eigenschaften sowie die Gesteinsfazies sind im Falle von Sedimentgesteinen bzw. Steinsalz primär von der Morphologie des Sedimentbeckens und den darin vorherrschenden geochemischen Bedingungen, vom Eintrag an terrigenen Sedimenten und von der Tektonik im Becken abhängig.

Indikator „Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich“:

Der für die halokinetischen Prozesse günstige duktile Charakter des Steinsalzes ermöglicht eine Verheilung von Klüften und Verminderung der Porosität, sodass von sehr niedrigen Durchlässigkeitsbeiwerten beim Steinsalz generell auszugehen ist (Wieczorek et al. 2014; Borchert & Muir 1964; Fischbeck & Bornemann 1993; Bornemann et al. 2003).

Indikator „Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)“:

Aufgrund der synsedimentär-tektonischen und späteren halokinetischen Prozesse variieren die Mächtigkeit und Fazies der salinaren Schichtenfolge. Dabei schwankt die Mächtigkeit der einzelnen Steinsalzlagen, sowie die Wechsellagerung von Steinsalz und Sulfaten sowie terrigenen Einträgen.

Indikator „Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit“:

Da es sich um stratiformes Steinsalz handelt, ist es als weitgehend ungestört anzusehen. Lokal begrenzt können flachwellige Deformationsstrukturen vorkommen. Es wurden nur lokal in stratiformen Salzen verfaltete Intrasalinarstrukturen beobachtet, die häufig auf das Abpuffern von Störungen zurückzuführen sind (Reinhold et al. 2014)

Anhang 5.1.1.2 Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG

Das Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit und der damit einhergehenden Distanz zu Störungen wird maßgeblich von der paläotektonischen Entwicklung des Ablagerungsbereichs geprägt. Salztektonische Überprägung im Steinsalz in Folge halokinetischer Bewegungen kann mit kleinräumiger Faltung und Auflösung des ursprünglichen salinaren Schichtverbandes von Gesteinskörpern mit unterschiedlichen felsmechanischen und hydraulischen Eigenschaften verbunden sein.

Andererseits können dadurch mächtige Gesteinspakete mit weitgehend einheitlichen Gesteinseigenschaften entstehen. Die Auswirkungen der salztektonischen Überprägung des ursprünglichen Gesteinsverbandes in Salzstrukturen sind differenziert und standortspezifisch zu beurteilen (Alfarra et al. 2020a, S. 154). Des Weiteren kann die genaue

räumliche Lage des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, auf welchen sich der Indikator bezieht, im Moment noch nicht ausgewiesen werden. Tektonisch aktive Störungen wurden durch die Anwendung der Ausschlusskriterien ausgeschlossen.

Indikatoren „Zeitspanne, über die sich die Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht wesentlich verändert hat“ und „Zeitspanne, über die sich die Gebirgsdurchlässigkeit nicht wesentlich verändert hat“:

Im Quartär veränderten Gletscher und Schmelzwässer die Morphologie in Norddeutschland. Es kam durch die Entwässerung von Gletschern zur Bildung von subglazialen Rinnen, diese können bis zu 500 m (Stackebrandt 2009) in die Tiefe reichen (z. B. (Stackebrandt 2010). Dieses identifizierte Gebiet liegt außerhalb der sich gebildeten subglazialen Rinnen (vergl. Keller 2009).

Anhang 5.2 Malm

Während des Malm bedeckte das Malm-Meer im Norden den Norddeutschen Raum und im Süden, durch das Rheinische und Böhmisches Massiv getrennt, weite Teile Frankreichs (Pariser Becken) und den Voralpinen (Süddeutsches Becken) und Alpenen Raum (Helvetischer Schelf). Im Norden hatte das Meer eine Verbindung zum Nordmeer (Nordsee-Becken) und war über die schmale Sächsische Straße mit dem Tethysozean verbunden. Hierdurch wurde ein Austausch mariner Stoffe ermöglicht (Grabert 1998). Durch synsedimentäre Bewegungen wurden Becken und Schwellen gebildet, durch welche die Mächtigkeit und die Zusammensetzung der Malm-Ablagerungen lokal stark variieren können (Reinhold et al. 2014). Im Oberen Malm haben sich die Sedimentationsbedingungen im Malm-Meer wieder beruhigt und es hat sich ein ostwest-verlaufendes Becken, das Niedersächsische-Becken gebildet.

Anhang 5.2.1 Malm (Nordost Deutschland)

Das identifizierte Gebiet 192_00IG_S_f_jo ist Teil des Malm in Nordost Deutschland und wurde als Teilgebiet 077_00TG_192_00IG_S_f_jo ermittelt.

Anhang 5.2.1.1 Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG

Indikatoren „Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich“, „Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften“ und „Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)“:

Es sind mächtige saline, stratiforme Ablagerungen des Malm bekannt. Während der Ablagerungen des Eimbecker Plattenkalks und des Unteren Münder Mergels (Münder-Formation) kam es zum einen durch Meeresspiegelschwankungen durch eine Verengung des Sedimentationsraumes im westlichen Niedersächsischen Becken, wo sich hypersalinare Verhältnisse etablierten (Gramann et al. 1997). In dieser Zeit war das Niedersächsische-Becken durch hohe Subsidenzraten gekennzeichnet, sodass sich in den vormals synsedimentär aktiven Senken Steinsalzlager in einer Schichtenfolge mit Tonmergelsteinen und Anhydrit abgelagert haben (Reinhold et al. 2014). Im zentralen und westlichen Niedersächsischen Becken beträgt die durchschnittliche Mächtigkeit der

stratiform lagernden salinaren Schichtfolge in den Zentren der Teilsenken ca. 800 m (Trusheim 1971). In einzelnen Senken im westlichen Niedersächsischen Becken kann die primäre Mächtigkeit sogar 1000 m betragen, wie z. B. im zentralen Bereich der Menslage-Alfhausen-Lembruch-Senke (Boigk 1981). In Richtung des Beckenrandes im Norden und Westen nimmt die Mächtigkeit der Schichtfolge ab (Boigk 1981). Westlich ist die salinare Schichtenfolge nur geringmächtig. Sie ist dort nur auf lokale Senken beschränkt und z. T. lediglich durch sulfatische Gesteine repräsentiert (Kockel & Krull 1995; Herrmann & Kunz 1999; Krull et al. 2004).

Indikator „Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit“:

Während der Oberkreide haben halokinetische Prozesse zu sekundären Akkumulationsprozessen geführt, wodurch es in Teilen des Niedersächsischen Beckens zur Bildung von Salzkissen gekommen ist. Diese können Mächtigkeiten von teilweise über 2000 m erreichen, in denen reine Steinsalzschichten mit mehr als 150 m Mächtigkeit vorkommen können (Kockel & Krull 1995).

Anhang 5.2.1.2 Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG

Das Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit und der damit einhergehenden Distanz zu Störungen wird maßgeblich von der paläotektonischen Entwicklung des Ablagerungsbereichs geprägt.

Salztektonische Überprägung im Steinsalz in Folge halokinetischer Bewegungen kann mit kleinräumiger Faltung und Auflösung des ursprünglichen salinaren Schichtverbandes von Gesteinskörpern mit unterschiedlichen felsmechanischen und hydraulischen Eigenschaften verbunden sein.

Andererseits können dadurch mächtige Gesteinspakete mit weitgehend einheitlichen Gesteinseigenschaften entstehen. Die Auswirkungen der salttektonischen Überprägung des ursprünglichen Gesteinsverbandes in Salzstrukturen sind differenziert und standortspezifisch zu beurteilen (Alfarra et al. 2020a, S. 154). Des Weiteren kann die genaue räumliche Lage des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, auf welchen sich der Indikator bezieht, im Moment noch nicht ausgewiesen werden.

Tektonisch aktive Störungen wurden durch die Anwendung der Ausschlusskriterien ausgeschlossen.

Indikator „Zeitspanne, über die sich die Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht wesentlich verändert hat“ und „Zeitspanne, über die sich die Ausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht wesentlich verändert hat“:

Seit der Oberkreide-Inversion unterliegt das Norddeutsche Becken neotektonischen Senkungsprozessen, die seit dem Tertiär auf das Niedersächsische Becken einwirken. Diese werden durch die einsetzenden Dehnungsbewegungen als Folge der Alpidischen Orogenese verstärkt und nehmen somit auch Einfluss auf die Diapirbildungsrate (von Goerne et al. 2016). Für das damit verbundene Diapirstadium wird ein Ende im Tertiär angenommen. Somit kann davon ausgegangen werden, dass, im Gegensatz zu den

Salzstöcken, das stratiforme Salz bisher noch nicht halokinetisch mobilisiert worden ist (Reinhold et al. 2014).

Durch die von der Oberkreide bis ins Paläogen reichende Inversion des Niedersächsischen Beckens (Betz et al. 1987; Voigt et al. 2008) wurden die vormals tiefer liegenden salinarführenden Schichten der Münder-Formation bis nahe an die Erdoberfläche gehoben, sodass es dort zur Subrosion kam (Reinhold et al. 2014).

Indikator „Zeitspanne, über die sich die Gebirgsdurchlässigkeit nicht wesentlich verändert hat“:

Im Quartär veränderten Gletscher und Schmelzwässer die Morphologie in Norddeutschland. Es kam durch die Entwässerung von Gletschern zur Bildung von subglazialen Rinnen, diese können bis zu 500 m (Stackebrandt 2009) in die Tiefe reichen (z. B. Stackebrandt 2010). Heute liegt die Basisfläche der Salzsichten wieder tiefer als 390 m unter Geländeoberkante. Durch die Verbreitung des identifizierten Gebietes ergibt sich eine mögliche Beeinflussung durch subglaziale Rinnen, die für eine Bewertung standortspezifisch untersucht werden muss.

Anhang 5.3 Keuper

In der Trias kommt es zur Entstehung eines riesigen Beckens innerhalb des Superkontinents Pangäa: Das Germanische Becken. Das Vordringen des Urozeans, der Tethys, aus dem Osten sowie des Ozeans aus dem arktischen Ozean im Norden hatte zur Folge, dass das Germanische Becken episodische Transgressionen erfuhr (Beutler & Szulc 1999). Durch die Dehnungstektonik kam es zu Horst- und Grabenbildungen, sodass der Mittlere Keuper in einigen Gebieten unmittelbar auf dem Zechstein abgelagert wurde (z. B. Burchardt 1990). Das Relief des Beckens hat Einfluss auf die Mächtigkeit und die Fazies des Mittleren Keuper genommen (Beutler & Nitsch 2005).

Man unterscheidet den Unteren, Mittleren und Oberen Keuper. Keuper-Salinare entstanden im Mittleren Keuper in der Grabfeld- und Weser-Formation, getrennt durch die Stuttgart-Formation, unter playa-ähnlichen Bedingungen. Dadurch kommen neben Steinsalz auch Tone, Mergel, Sulfate und Dolomite vor (Beutler & Tessin 2005; Nitsch 2005).

Die Keuper-Salinare entstanden während der verstärkten Krustenextension mit gleichzeitiger Änderung des Bewegungssinnes an Störungssystemen, die seit dem Karbon/Perm wirksam waren (Baldschuhn et al. 1991).

In der Grabfeld-Formation kam es zur Ablagerung von 5 Steinsalzlager (A-E) und drei weiteren in der Weser-Formation (F-H). Die Mächtigkeiten der Steinsalzlager sind ebenfalls starken Schwankungen ausgesetzt. Das Steinsalzlager „A“ erreicht in Nordwestdeutschland die größte Mächtigkeit. Steinsalzlager „D“ und „E“ erreichen als Doppelsalinar eine Mächtigkeit bis zu 70 m und Steinsalzlager „H“ kann als Salzkissen mehrere 100 m Mächtigkeit erreichen (vergl. Reinhold et al. 2014). Die Tiefenlage der Oberfläche von Keuper-Salzkissen beträgt stets mehr als 1200 m unter Geländeoberkante (Reinhold et al. 2014). Insgesamt sind die höchsten Keuper-Salinar-Mächtigkeiten in

Nordwest-Deutschland zu erwarten. In Ost-Deutschland sind die Steinsalzlager geringmächtiger, unreiner und in größerer Tiefe verbreitet (Beutler 2004; Franz 2008; Beutler 2008; Hoth & Schretzenmayr 1993).

Anhang 5.3.1 Keuper (Glückstadt-Graben und nördliches Norddeutsches Becken)

Das identifizierte Gebiet 189_01IG_S_f_km ist Teil des Keupers im Glückstadt-Graben im nördlichen Norddeutschen Becken und wurde als Teilgebiet 075_01TG_189_01IG_S_f_km ermittelt.

Anhang 5.3.1.1 Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG

Indikatoren „Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich“, „Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften“ und „Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)“:

Die Grabfeld-Formation besteht in Niedersachsen aus einer zyklischen Pelit-Evaporit Abfolge, aus feinschichtigem Wechsel von Tonsteinen, Dolomitsteinmergeln und Gipsen. Weiter nördlich kommen sulfatärmere Ton-Steinsalz-Fazies mit Knollenanhydrit vor. Die mittlere Mächtigkeit beträgt 100 bis 200 m (Beutler et al. 2005; Beutler & Tessin 2005).

In der Weser-Formation kommen rotbunte und grüne Tongesteine (dolomitische Tonsteine und Tonmergelsteine), meist mit Sulfatknollen und dünnen Dolomitbänken, vor. In mehreren Horizonten kommt es zur Einschaltung von knolligen, teilweise auch geschichteten Sulfatbänken, in Norddeutschland mit erheblicher Mächtigkeit, in der Norddeutschen Senke mit drei Steinsalzlager. Die mittlere Mächtigkeit beträgt hier bis über 200 m (Beutler et al. 2005; Beutler & Tessin 2005).

Die Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen, ihre räumliche Verteilung im Endlagerbereich einschließlich ihrer Eigenschaften sowie die Gesteinsfazies sind im Falle von Sedimentgesteinen bzw. Steinsalz primär von der Morphologie des Sedimentbeckens und den darin vorherrschenden geochemischen Bedingungen, vom Eintrag an terrigenen Sedimenten und von der Tektonik im Becken abhängig.

Der für die halokinetischen Prozesse günstige duktile Charakter des Steinsalzes ermöglicht eine Verheilung von Klüften und Verminderung der Porosität, sodass von sehr niedrigen Durchlässigkeitsbeiwerten beim Steinsalz generell auszugehen ist (Wieczorek et al. 2014; Borchert & Muir 1964; Fischbeck & Bornemann 1993; Bornemann et al. 2003).

Indikator „Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit“:

Aufgrund der synsedimentär-tektonischen und späteren halokinetischen Prozesse variieren die Mächtigkeit und Fazies der salinaren Schichtenfolge. Dabei schwankt die Mächtigkeit der einzelnen Steinsalzlagen, sowie die Wechsellagerung von Steinsalz und Sulfaten sowie terrigenen Einträgen.

Da es sich um stratiformes Steinsalz handelt, ist es als weitgehend ungestört anzusehen. Lokal begrenzt können flachwellige Deformationsstrukturen vorkommen. Es wurden nur lokal in stratiformen Salzen verfaltete Intrasalinarstrukturen beobachtet, die häufig auf das Abpuffern von Störungen zurück zu führen sind (Reinhold et al. 2014).

Anhang 5.3.1.2 Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG

Indikator „Langfristige Stabilität der Gebirgsdurchlässigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“:

Das Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit und der damit einhergehenden Distanz zu Störungen wird maßgeblich von der paläotektonischen Entwicklung des Ablagerungsbereichs geprägt.

Salztektonische Überprägung im Steinsalz in Folge halokinetischer Bewegungen kann mit kleinräumiger Faltung und Auflösung des ursprünglichen salinaren Schichtverbandes von Gesteinskörpern mit unterschiedlichen felsmechanischen und hydraulischen Eigenschaften verbunden sein.

Andererseits können dadurch mächtige Gesteinspakete mit weitgehend einheitlichen Gesteinseigenschaften entstehen. Die Auswirkungen der salztektonischen Überprägung des ursprünglichen Gesteinsverbandes in Salzstrukturen sind differenziert und standortspezifisch zu beurteilen (Alfarra et al. 2020a, S. 154). Des Weiteren kann die genaue räumliche Lage des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, auf welchen sich der Indikator bezieht, im Moment noch nicht ausgewiesen werden.

Tektonisch aktive Störungen wurden durch die Anwendung der Ausschlusskriterien ausgeschlossen.

Seit der Oberkreide-Inversion unterliegt das Norddeutsche Becken neotektonischen Senkungsprozessen, die seit dem Tertiär auf das Niedersächsische-Becken einwirken. Diese werden durch die einsetzenden Dehnungsbewegungen als Folge der Alpidischen Orogenese verstärkt und nehmen somit auch Einfluss auf die Diapirbildungsrate (von Goerne et al. 2016). Für das damit verbundene Diapistadium wird ein Ende im Tertiär angenommen. Somit kann davon ausgegangen werden, dass, im Gegensatz zu den Salzstöcken, das stratiforme Salz bisher noch nicht halokinetisch mobilisiert worden ist (Reinhold et al. 2014).

Im Quartär veränderten Gletscher und Schmelzwässer die Morphologie in Norddeutschland. Es kam durch die Entwässerung von Gletschern zur Bildung von subglazialen Rinnen, diese können bis zu 500 m (Stackebrandt 2009) in die Tiefe reichen (z. B. Stackebrandt 2010).

Durch die Verbreitung des identifizierten Gebietes ergibt sich keine mögliche Beeinflussung durch subglaziale Rinnen, die für eine Bewertung standortspezifisch untersucht werden muss. Die Tiefenlage der Oberfläche von Keuper-Salzkissen beträgt mehr als 1200 m unter Geländeoberkante (Reinhold et al. 2014).

Anhang 5.3.2 Keuper (Östliches Niedersächsisches Becken)

Das identifizierte Gebiet 189_02IG_S_f_km ist Teil des Keupers im östlichen Niedersächsischen Becken und wurde nicht als Teilgebiet ermittelt.

Anhang 5.3.2.1 Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG

Im östlichen Niedersächsischen Becken können mächtige stratiforme Ablagerungen des Keupers mit Wirtsgesteinspotential nicht ganz ausgeschlossen werden.

Indikatoren „Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich“ und „Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich“:

Die Grabfeld-Formation startet in Sachsen-Anhalt an der Basis mit Grundgips, dolomitischen Tonsteinen mit Sulfatknollen und -horizonten, überlagert von den Unteren Hauptgipsschichten, Tonsteinen mit zahlreichen Sulfatknollen und -bänken (10 bis 30 %) und Dolomitbänken. Darauf folgen die Oberen Hauptgipsschichten, Tonsteine mit Sulfat- und Dolomitlagen und die Steinsalz-Lager „D“ und „E“, die lokal bis 80 m mächtig werden (Bachmann et al. 2008).

In der Weser-Formation kommt Steinsalz (Lager F bis H) mit einer Mächtigkeit von bis zu 50 m neben Gipsknollenhorizonten und Sulfatlagen (Heldburg-Gipsmergel), rotbunte, sulfatführende Tonsteine (Schwellenburg-Mergel), Tonmergelsteine, 1 bis 3 Dolomitbänke (Lehrbergschichten) und rotbraune massige Tonsiltsteine mit Sulfatknollen in einigen Lagen (Rote Wand) vor (Bachmann et al. 2008).

Die Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen, ihre räumliche Verteilung im Endlagerbereich einschließlich ihrer Eigenschaften sowie die Gesteinsfazies sind im Falle von Sedimentgesteinen bzw. Steinsalz primär von der Morphologie des Sedimentbeckens und den darin vorherrschenden geochemischen Bedingungen, vom Eintrag an terrigenen Sedimenten und von der Tektonik im Becken abhängig.

Der für die halokinetischen Prozesse günstige duktile Charakter des Steinsalzes ermöglicht eine Verheilung von Klüften und Verminderung der Porosität, sodass von sehr niedrigen Durchlässigkeitsbeiwerten beim Steinsalz generell auszugehen ist (Wieczorek et al. 2014; Borchert & Muir 1964; Fischbeck & Bornemann 1993; Bornemann et al. 2003).

Indikator „Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)“:

Aufgrund der synsedimentär-tektonischen und späteren halokinetischen Prozesse variieren die Mächtigkeit und Fazies der salinaren Schichtenfolge. Dabei schwankt die Mächtigkeit der einzelnen Steinsalzlagen, sowie die Wechsellagerung von Steinsalz und Sulfaten sowie terrigenen Einträgen.

Indikator „Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit“:

Da es sich um stratiformes Steinsalz handelt, ist es als weitgehend ungestört anzusehen. Lokal begrenzt können flachwellige Deformationsstrukturen vorkommen. Es wurden nur lokal in stratiformen Salzen verfaltete Intrasalinarstrukturen beobachtet, die häufig auf das Abpuffern von Störungen zurück zu führen sind (Reinhold et al. 2014).

Anhang 5.3.2.2 Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG

Indikator „Langfristige Stabilität der Gebirgsdurchlässigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“:

Das Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit und der damit einhergehenden Distanz zu Störungen wird maßgeblich von der paläotektonischen Entwicklung des Ablagerungsbereichs geprägt.

Salztektonische Überprägung im Steinsalz in Folge halokinetischer Bewegungen kann mit kleinräumiger Faltung und Auflösung des ursprünglichen salinaren Schichtverbandes von Gesteinskörpern mit unterschiedlichen felsmechanischen und hydraulischen Eigenschaften verbunden sein.

Andererseits können dadurch mächtige Gesteinspakete mit weitgehend einheitlichen Gesteinseigenschaften entstehen. Die Auswirkungen der salttektonischen Überprägung des ursprünglichen Gesteinsverbandes in Salzstrukturen sind differenziert und standortspezifisch zu beurteilen (Alfarra et al. 2020a, S. 154). Des Weiteren kann die genaue räumliche Lage des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, auf welchen sich der Indikator bezieht, im Moment noch nicht ausgewiesen werden.

Tektonisch aktive Störungen wurden durch die Anwendung der Ausschlusskriterien ausgeschlossen.

Seit der Oberkreide-Inversion unterliegt das Norddeutsche Becken neotektonischen Senkungsprozessen, die seit dem Tertiär auf das Niedersächsische-Becken einwirken. Diese werden durch die einsetzenden Dehnungsbewegungen als Folge der Alpidischen Orogenese verstärkt und nehmen somit auch Einfluss auf die Diapirbildungsrate (von Goerne et al. 2016). Für das damit verbundene Diapistadium wird ein Ende im Tertiär angenommen. Somit kann davon ausgegangen werden, dass, im Gegensatz zu den Salzstöcken, das stratiforme Salz bisher noch nicht halokinetisch mobilisiert worden ist (Reinhold et al. 2014).

Im Quartär veränderten Gletscher und Schmelzwässer die Morphologie in Norddeutschland. Es kam durch die Entwässerung von Gletschern zur Bildung von subglazialen Rinnen, diese können bis zu 500 m (Stackebrandt 2009) in die Tiefe reichen (z. B. Stackebrandt 2010).

Durch die Verbreitung des identifizierten Gebietes ergibt sich keine mögliche Beeinflussung durch subglaziale Rinnen, die für eine Bewertung standortspezifisch untersucht werden muss. Die Tiefenlage der Oberfläche von Keuper-Salzkissen beträgt mehr als 1200 m unter Geländeoberkante (Reinhold et al. 2014).

Anhang 5.3.3 Keuper (Westschleswig-Block)

Das identifizierte Gebiet 189_03IG_S_f_km ist Teil des Keupers im Westschleswig-Block und wurde als Teilgebiet 075_02TG_189_03IG_S_f_km ermittelt.

Anhang 5.3.3.1 Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG

Im Glückstadt-Graben und im Westschleswig-Block sind mächtige saline, stratiforme Ablagerungen des Keupers in der Weser-Formation mit Wirtsgesteinspotential bekannt.

Indikatoren „Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich“ „Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften“ und „Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)“:

In der Weser-Formation kommen drei Steinsalzlager mit unterschiedlichen Mächtigkeit vor. Steinsalzlager F ist kompakt und schwach gegliedert ausgebildet mit einer Mächtigkeit von 30 m bis 40 m, Steinsalzlager „G“ ist geringmächtig und Steinsalzlager „H“ kann eine Mächtigkeit von mehreren 100 m erreichen (Beutler et al. 2005).

Daneben sind rotbunte und grüne Tongesteine (dolomitische Tonsteine und Tonmergelsteine), meist mit Sulfatknollen, und dünnen Dolomitbänken ausgebildet. In mehreren Horizonten kommen Einschaltung von knolligen, teilweise auch geschichteten Sulfatbänken, mit erheblicher Mächtigkeit in Norddeutschland vor.

Die Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen, ihre räumliche Verteilung im Endlagerbereich einschließlich ihrer Eigenschaften sowie die Gesteinsfazies sind im Falle von Sedimentgesteinen bzw. Steinsalz primär von der Morphologie des Sedimentbeckens und den darin vorherrschenden geochemischen Bedingungen, vom Eintrag an terrigenen Sedimenten und von der Tektonik im Becken abhängig.

Der für die halokinetischen Prozesse günstige duktile Charakter des Steinsalzes ermöglicht eine Verheilung von Klüften und Verminderung der Porosität, sodass von sehr niedrigen Durchlässigkeitsbeiwerten beim Steinsalz generell auszugehen ist (Wieczorek et al. 2014; Borchert & Muir 1964; Fischbeck & Bornemann 1993; Bornemann et al. 2003)

Indikator „Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit“:

Aufgrund der synsedimentär-tektonischen und späteren halokinetischen Prozesse variieren die Mächtigkeit und Fazies der salinaren Schichtenfolge. Dabei schwankt die Mächtigkeit der einzelnen Steinsalzlagen, sowie die Wechsellagerung von Steinsalz und Sulfaten sowie terrigenen Einträgen.

Da es sich um stratiformes Steinsalz handelt, ist es als weitgehend ungestört anzusehen. Lokal begrenzt können flachwellige Deformationsstrukturen vorkommen. Es wurden nur lokal in stratiformen Salzen verfaltete Intrasalinarstrukturen beobachtet, die häufig auf das Abpuffern von Störungen zurück zu führen sind (Reinhold et al. 2014).

Anhang 5.3.3.2 Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG

Indikator „Langfristige Stabilität der Gebirgsdurchlässigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“:

Das Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit und der damit einhergehenden Distanz zu Störungen wird maßgeblich von der paläotektonischen Entwicklung des Ablagerungsbereichs geprägt.

Salztektonische Überprägung im Steinsalz in Folge halokinetischer Bewegungen kann mit kleinräumiger Faltung und Auflösung des ursprünglichen salinaren Schichtverbandes von Gesteinskörpern mit unterschiedlichen felsmechanischen und hydraulischen Eigenschaften verbunden sein.

Andererseits können dadurch mächtige Gesteinspakete mit weitgehend einheitlichen Gesteinseigenschaften entstehen. Die Auswirkungen der salztektonischen Überprägung des ursprünglichen Gesteinsverbandes in Salzstrukturen sind differenziert und standortspezifisch zu beurteilen (Alfarra et al. 2020a, S. 154). Des Weiteren kann die genaue räumliche Lage des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, auf welchen sich der Indikator bezieht, im Moment noch nicht ausgewiesen werden.

Tektonisch aktive Störungen wurden durch die Anwendung der Ausschlusskriterien ausgeschlossen.

Seit der Oberkreide-Inversion unterliegt das Norddeutsche Becken neotektonischen Senkungsprozessen, die seit dem Tertiär auf das Niedersächsische-Becken einwirken. Diese werden durch die einsetzenden Dehnungsbewegungen als Folge der Alpidischen Orogenese verstärkt und nehmen somit auch Einfluss auf die Diapirbildungsrate (von Goerne et al. 2016). Für das damit verbundene Diapistadium wird ein Ende im Tertiär angenommen. Somit kann davon ausgegangen werden, dass, im Gegensatz zu den Salzstöcken, das stratiforme Salz bisher noch nicht halokinetisch mobilisiert worden ist (Reinhold et al. 2014).

Im Quartär veränderten Gletscher und Schmelzwässer die Morphologie in Norddeutschland. Es kam durch die Entwässerung von Gletschern zur Bildung von subglazialen Rinnen, diese können bis zu 500 m (Stackebrandt 2009) in die Tiefe reichen (z. B. Stackebrandt 2010). Durch die Verbreitung des identifizierten Gebietes ergibt sich keine mögliche Beeinflussung durch subglaziale Rinnen, die für eine Bewertung standortspezifisch untersucht werden muss. Die Tiefenlage der Oberfläche von Keuper-Salzkissen beträgt mehr als 1200 m unter Geländeoberkante (Reinhold et al. 2014).

Anhang 5.4 Muschelkalk

Nach dem Zusammenstoß der beiden Großkontinente Laurussia und Gondwana im Oberperm kam es zur Neuentstehung des Superkontinents Pangäa. In der Trias folgte die Entstehung eines riesigen Beckens innerhalb Pangäa: Das Germanische Becken. Das Vordringen des Urozeans, der Tethys, aus dem Osten sowie des Ozeans aus dem arktischen Ozean im Norden hatte zur Folge, dass das Germanische Becken episodische Transgressionen erfuhr (Beutler & Szulc 1999).

Zu einem dieser transgressiven Meere gehörte u. a. auch das Muschelkalkmeer. Während des Muschelkalks (MK) in der Mittleren Trias gab es episodische Meeresspiegelschwankungen (M1 & M2), die zu unterschiedlichen marinen Sedimentablagerungen führten. Die marinen Sequenzen M1 & M2 wurden von einer Regression unterbrochen, die einen Evaporationsprozess zur Folge hatte. (Röhling 2002).

So ist der gesamte Muschelkalk in drei verschiedene stratigraphische Einheiten zu unterteilen: Unterer Muschelkalk (UMK) (Anisium), Mittlerer Muschelkalk (MMK) (Anisium) und Oberer Muschelkalk (OMK) (Anisium-Ladinium). Während UMK und OMK überwiegend durch marine Ablagerungen dominiert werden, ist der MMK von einer Evaporitserie charakterisiert. Der UMK wird geprägt von der Jena-Formation und der typischen Ablagerung von Wellen- und Schaumkalk. Im MMK sind in chronostratigraphischer Reihenfolge Dolomit-, Gips-, Anhydrit- und Steinsalzvorkommen verbreitet, wobei Dolomit die Karlstadt-Formation und die Sulfate und Chloride die Heilbronn-Formation zusammensetzen. Mit dem Beginn der zweiten marinen Sequenz (M2) und der erneuten Ablagerung von Karbonaten (überwiegend Dolomit) kam es zu der Entstehung der Diemel-Formation. Im anschließenden OMK lagerten sich Ceratitenschichten und Trochitenkalkbänke unter transgressiven Bedingungen ab (Röhling 2002).

Die Evaporitserie im MMK wird durch 9 Zyklen bestimmt (Brückner-Röhling 1999). Zyklus 1 wird in die Jena-Formation eingeordnet, Zyklen 2 bis 8 in die Heilbronn-Formation und Zyklus 9 in die Diemel-Formation. Steinsalzführende Schichten sind in der Heilbronn-Formation zu erwarten (Beutler 2004).

Die Verbreitung der Muschelkalk-Evaporite reicht von Norddeutschland über Thüringen und Hessen bis Baden-Württemberg und die Nord-Schweiz (Reinhold et al. 2014, S. 44). In Deutschland sind die Evaporite unterschiedlich mächtig (Röhling 2002). So ist z. B. das Zeitfenster für das Muschelkalk-Salinar in Nordwest-Deutschland am größten (Gärtner & Röhling 1993), wogegen es in Hessen gar nicht vorkommt (Busse & Horn 1982). Außerdem kommt das Muschelkalk-Salinar noch in der Scholle von Calvörde (Schulze 1964), Nordost-Deutschland (Althen et al. 1980), Thüringen (Reinhold et al. 2014), Südniedersachsen (Dünkel & Vath 1990), Nordbayern (Freudenberger & Schwerd 1996), Baden-Württemberg (Simon 1988) und im Hochrhein (Widmer 1991; Hauber 1993) vor. Es sind bis zu sechs Halitlager in den Gräben von Norddeutschland sowie des deutschen Nordsee-Sektors bekannt, die der evaporitischen Heilbronn-Formation zuzuordnen sind (Röhling 2002; Hagdorn et al. 2019). Mächtige Steinsalze im Süden von Niedersachsen sind jedoch unbekannt. Im Norddeutschen Becken erreicht der MMK bis zu 150 m Mächtigkeiten (Röhling 2002), im Westdorf-Graben und in Schleswig-Holstein ca. 700 m, in Mecklenburg-Vorpommern 140 m und das Steinsalz in Baden-Württemberg bei Heilbronn eine Mächtigkeit von 100 m. Die Salinare im Norddeutschen Becken haben in den Zyklen 3 und 4 die größte Flächenausdehnung, im Zyklus 3 die größte Mächtigkeit.

Der Mittlere Muschelkalk ist überall in Niedersachsen verbreitet (Reinhold et al. 2014, S. 40, Abbildung 15), wobei über maximale Mächtigkeiten der Steinsalzhorizonte keine expliziten Angaben existieren (Dünkel & Vath 1990; Röhling 2002). Am weitesten verbreitet sind die Steinsalzlager der Salinar-Zyklen 3 und 4, die auch die größte Mächtigkeit aufweisen (Reinhold et al. 2014, S. 46).

In Norddeutschland nimmt die Anzahl der Halit-führenden Salinar-Zyklen als auch die Mächtigkeit der Steinsalzlager in Richtung Nordwesten zu (Reinhold et al. 2014, S. 51).

Die Tiefenlage mächtiger Steinsalzlager des Mittleren Muschelkalks ist im Norddeutschen Becken durch Tiefen unterhalb von 2000 m gekennzeichnet (Reinhold et al. 2014). Im Gebiet der Altmark-Schwelle und im Topbereich von Salzkissen in der Region Schwerin werden Tiefen zwischen 1500 und 2000 m beobachtet (Hoth & Schretzenmayr 1993; Doornenbal & Stevenson 2010; Gast & Röhling 2012). Weiterhin ist die Tiefenlage der Steinsalzlager durch die Entwicklung von Salzdiapir-Strukturen im Norddeutschen Becken überprägt. An deren Flanken können die Salinare des Mittleren Muschelkalk auch in geringeren Tiefen als 1500 m auftreten (Reinhold et al. 2014, S. 51).

Anhang 5.4.1 Muschelkalk (Südliches Norddeutsches Becken)

Das identifizierte Gebiet 190_01IG_S_f_mm ist Teil des Muschelkalks im südlichen Norddeutschen Becken und wurde nicht als Teilgebiet ermittelt.

Anhang 5.4.1.1 Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG

Im Südlichen Norddeutschen Becken sind mächtige saline stratiforme Ablagerungen des Muschelkalks in der Heilbronn-Formation bekannt.

Die Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen, ihre räumliche Verteilung im Endlagerbereich einschließlich ihrer Eigenschaften sowie die Gesteinsfazies sind im Falle von Sedimentgesteinen bzw. Steinsalz primär von der Morphologie des Sedimentbeckens und den darin vorherrschenden geochemischen Bedingungen, vom Eintrag an terrigenen Sedimenten und von der Tektonik im Becken abhängig.

Indikator „Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich“:

Der für die halokinetischen Prozesse günstige duktile Charakter des Steinsalzes ermöglicht eine Verheilung von Klüften und Verminderung der Porosität, sodass von sehr niedrigen Durchlässigkeitsbeiwerten beim Steinsalz generell auszugehen ist (Wieczorek et al. 2014; Borchert & Muir 1964; Fischbeck & Bornemann 1993; Bornemann et al. 2003).

Indikator „Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)“:

Aufgrund der synsedimentär-tektonischen und späteren halokinetischen Prozesse variieren die Mächtigkeit und Fazies der salinaren Schichtenfolge. Dabei schwankt die Mächtigkeit der einzelnen Steinsalzlagen, sowie die Wechsellagerung von Steinsalz und Sulfaten sowie terrigenen Einträgen.

Indikator „Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit“:

Da es sich um stratiformes Steinsalz handelt, ist es als weitgehend ungestört anzusehen. Lokal begrenzt können flachwellige Deformationsstrukturen vorkommen. Es wurden nur lokal in stratiformen Salzen verfaltete Intrasalinarstrukturen beobachtet, die häufig auf das Abpuffern von Störungen zurück zu führen sind (Reinhold et al. 2014).

Anhang 5.4.1.2 Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG

Das Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit und der damit einhergehenden Distanz zu Störungen wird maßgeblich von der paläotektonischen Entwicklung des Ablagerungsbereichs geprägt.

Indikator „Langfristige Stabilität der Gebirgsdurchlässigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“:

Salztektonische Überprägung im Steinsalz in Folge halokinetischer Bewegungen kann mit kleinräumiger Faltung und Auflösung des ursprünglichen salinaren Schichtverbandes von Gesteinskörpern mit unterschiedlichen felsmechanischen und hydraulischen Eigenschaften verbunden sein.

Andererseits können dadurch mächtige Gesteinspakete mit weitgehend einheitlichen Gesteinseigenschaften entstehen. Die Auswirkungen der salztektonischen Überprägung des ursprünglichen Gesteinsverbandes in Salzstrukturen sind differenziert und standortspezifisch zu beurteilen (Alfarra et al. 2020a, S. 154). Des Weiteren kann die genaue räumliche Lage des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, auf welchen sich der Indikator bezieht, im Moment noch nicht ausgewiesen werden.

Tektonisch aktive Störungen wurden durch die Anwendung der Ausschlusskriterien ausgeschlossen.

Seit der Oberkreide-Inversion unterliegt das Norddeutsche Becken neotektonischen Senkungsprozessen, die seit dem Tertiär auf das Niedersächsische-Becken einwirken. Diese werden durch die einsetzenden Dehnungsbewegungen als Folge der Alpidischen Orogenese verstärkt und nehmen somit auch Einfluss auf die Diapirbildungsrate (von Goerne et al. 2016). Für das damit verbundene Diapistadium wird ein Ende im Tertiär angenommen. Somit kann davon ausgegangen werden, dass, im Gegensatz zu den Salzstöcken, das stratiforme Salz bisher noch nicht halokinetisch mobilisiert worden ist (Reinhold et al. 2014).

Im Quartär veränderten Gletscher und Schmelzwässer die Morphologie in Norddeutschland. Es kam durch die Entwässerung von Gletschern zur Bildung von subglazialen Rinnen, diese können bis zu 500 m (Stackebrandt 2009) in die Tiefe reichen (z. B. (Stackebrandt 2010). Durch die Tiefenlage und Verbreitung des identifizierten Gebietes ergibt sich keine mögliche Beeinflussung durch subglaziale Rinnen. Da die regionale Lage des Salinars des Mittleren Muschelkalkes nicht bekannt ist, ist eine qualitative Angabe zu Tiefen der jeweiligen stratiformen Steinsalzlager mit Wirtsgesteinspotential von standortspezifischen Untersuchungen abhängig.

Anhang 5.4.2 Muschelkalk (Münsterländer Tieflandsbucht)

Das identifizierte Gebiet 190_02IG_S_f_mm ist Teil des Muschelkalks in der Münsterländer Tieflandsbucht und wurde nicht als Teilgebiet ermittelt.

Anhang 5.4.2.1 Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG

In der Münsterländer Tieflandsbucht sind mächtige, salinare, stratiforme Ablagerungen des Muschelkalks in der Heilbronn-Formation mit Wirtsgesteinspotential vermutet.

Die Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen, ihre räumliche Verteilung im Endlagerbereich einschließlich ihrer Eigenschaften sowie die Gesteinsfazies sind im Falle von Sedimentgesteinen bzw. Steinsalz primär von der Morphologie des Sedimentbeckens und den darin vorherrschenden geochemischen Bedingungen, vom Eintrag an terrigenen Sedimenten und von der Tektonik im Becken abhängig.

Indikator „Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich“:

Der für die halokinetischen Prozesse günstige duktile Charakter des Steinsalzes ermöglicht eine Verheilung von Klüften und Verminderung der Porosität, sodass von sehr niedrigen Durchlässigkeitsbeiwerten beim Steinsalz generell auszugehen ist (Wieczorek et al. 2014; Borchert & Muir 1964; Fischbeck & Bornemann 1993; Bornemann et al. 2003).

Indikator „Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)“:

Aufgrund der synsedimentär-tektonischen und späteren halokinetischen Prozesse variieren die Mächtigkeit und Fazies der salinaren Schichtenfolge. Dabei schwankt die Mächtigkeit der einzelnen Steinsalzlagen, sowie die Wechsellagerung von Steinsalz und Sulfaten sowie terrigenen Einträgen.

Indikator „Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit“:

Da es sich um stratiformes Steinsalz handelt, ist es als weitgehend ungestört anzusehen. Lokal begrenzt können flachwellige Deformationsstrukturen vorkommen. Es wurden nur lokal in stratiformen Salzen verfaltete Intrasalinarstrukturen beobachtet, die häufig auf das Abpuffern von Störungen zurück zu führen sind (Reinhold et al. 2014).

Anhang 5.4.2.2 Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG

Indikator „Langfristige Stabilität der Gebirgsdurchlässigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“:

Das Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit und der damit einhergehenden Distanz zu Störungen wird maßgeblich von der paläotektonischen Entwicklung des Ablagerungsbereichs geprägt.

Salztektonische Überprägung im Steinsalz in Folge halokinetischer Bewegungen kann mit kleinräumiger Faltung und Auflösung des ursprünglichen salinaren Schichtverbandes von Gesteinskörpern mit unterschiedlichen felsmechanischen und hydraulischen Eigenschaften verbunden sein.

Andererseits können dadurch mächtige Gesteinspakete mit weitgehend einheitlichen Gesteinseigenschaften entstehen. Die Auswirkungen der salztektonischen Überprägung des ursprünglichen Gesteinsverbandes in Salzstrukturen sind differenziert und standortspezifisch zu beurteilen (Alfarra et al. 2020a, S. 154). Des Weiteren kann die genaue räumliche Lage des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, auf welchen sich der Indikator bezieht, im Moment noch nicht ausgewiesen werden.

Tektonisch aktive Störungen wurden durch die Anwendung der Mindestanforderungen ausgeschlossen.

Im Quartär veränderten Gletscher und Schmelzwässer die Morphologie in Norddeutschland. Es kam durch die Entwässerung von Gletschern zur Bildung von subglazialen Rinnen, diese können bis zu 500 m (Stackebrandt 2009) in die Tiefe reichen, z. B. in Stackebrandt (2010). Durch die Verbreitung des identifizierten Gebietes ergibt sich eine mögliche Beeinflussung durch subglaziale Rinnen, die für eine Bewertung standortspezifisch untersucht werden muss.

Anhang 5.4.3 Muschelkalk (Harzvorland)

Das identifizierte Gebiet 190_03IG_S_f_mm ist Teil des Muschelkalks im Harzvorland und wurde nicht als Teilgebiet ermittelt.

Anhang 5.4.3.1 Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG

Im Harzvorland sind saline, stratiforme Ablagerungen des Muschelkalks in der Heilbronn-Formation mit Wirtsgesteinspotential bekannt.

Indikatoren „Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich“ und „Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften“:

In der Region Unterweser (Bremen) werden die zunehmenden Gesamtmächtigkeiten des Steinsalzes durch die Salinar-Zyklen 3 und 4 bestimmt (Röhling 2002).

Die Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen, ihre räumliche Verteilung im Endlagerbereich einschließlich ihrer Eigenschaften sowie die Gesteinsfazies sind im Falle von Sedimentgesteinen bzw. Steinsalz primär von der Morphologie des Sedimentbeckens und den darin vorherrschenden geochemischen Bedingungen, vom Eintrag an terrigenen Sedimenten und von der Tektonik im Becken abhängig.

Der für die halokinetischen Prozesse günstige duktile Charakter des Steinsalzes ermöglicht eine Verheilung von Klüften und Verminderung der Porosität, sodass von sehr niedrigen Durchlässigkeitsbeiwerten beim Steinsalz generell auszugehen ist (Wieczorek et al. 2014; Borchert & Muir 1964; Fischbeck & Bornemann 1993; Bornemann et al. 2003).

Indikator „Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit“:

Aufgrund der synsedimentär-tektonischen und späteren halokinetischen Prozesse variieren die Mächtigkeit und Fazies der salinaren Schichtenfolge. Dabei schwankt die Mächtigkeit der einzelnen Steinsalzlagen, sowie die Wechsellagerung von Steinsalz und Sulfaten sowie terrigenen Einträgen.

Da es sich um stratiformes Steinsalz handelt, ist es als weitgehend ungestört anzusehen. Lokal begrenzt können flachwellige Deformationsstrukturen vorkommen. Es wurden nur lokal in stratiformen Salzen verfaltete Intrasalinarstrukturen beobachtet, die häufig auf das Abpuffern von Störungen zurück zu führen sind (Reinhold et al. 2014).

Anhang 5.4.3.2 Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG

Indikator „Langfristige Stabilität der Gebirgsdurchlässigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“:

Das Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit und der damit einhergehenden Distanz zu Störungen wird maßgeblich von der paläotektonischen Entwicklung des Ablagerungsbereichs geprägt.

Salztektonische Überprägung im Steinsalz in Folge halokinetischer Bewegungen kann mit kleinräumiger Faltung und Auflösung des ursprünglichen salinaren Schichtverbandes von Gesteinskörpern mit unterschiedlichen felsmechanischen und hydraulischen Eigenschaften verbunden sein.

Andererseits können dadurch mächtige Gesteinspakete mit weitgehend einheitlichen Gesteinseigenschaften entstehen. Die Auswirkungen der salttektonischen Überprägung des ursprünglichen Gesteinsverbandes in Salzstrukturen sind differenziert und standortspezifisch zu beurteilen (Alfarra et al. 2020a, S. 154). Des Weiteren kann die genaue räumliche Lage des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, auf welchen sich der Indikator bezieht, im Moment noch nicht ausgewiesen werden. Tektonisch aktive Störungen wurden durch die Anwendung der Ausschlusskriterien ausgeschlossen.

Im Quartär veränderten Gletscher und Schmelzwässer die Morphologie in Norddeutschland. Es kam durch die Entwässerung von Gletschern zur Bildung von subglazialen Rinnen, diese können bis zu 500 m (Stackebrandt 2009) in die Tiefe reichen (z. B. Stackebrandt 2010). Durch die Tiefenlage und Verbreitung des identifizierten Gebietes ergibt sich keine mögliche Beeinflussung durch subglaziale Rinnen. Da die regionale Lage des Salinars des Mittleren Muschelkalkes nicht bekannt ist, ist eine qualitative Angabe zu Tiefen der jeweiligen stratiformen Steinsalzlager mit Wirtsgesteinspotential von standortspezifischen Untersuchungen abhängig.

Anhang 5.4.4 Muschelkalk – Identifiziertes Gebiet 4 (Nordöstliches Niedersächsisches Becken)

Das identifizierte Gebiet 190_04IG_S_f_mm ist Teil des Muschelkalks im nordöstlichen Niedersächsischen Becken und wurde nicht als Teilgebiet ermittelt.

Anhang 5.4.4.1 Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG

Im nordöstlichen Niedersächsischen Becken sind salinare, stratiforme Ablagerungen des Muschelkalks in der Heilbronn-Formation mit Wirtsgesteinspotential lokal in Randsenken bekannt.

Indikator „Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften“:

Die höchsten Mächtigkeiten sind im nordöstlichen Niedersächsischen Becken zu finden. Hier sind z. B. in der Bohrung Westdorf 2A (Westdorf-Graben) sechs Salzlager der Salinar-Zyklen 2 bis 7 ausgeprägt. Diese erreichen eine ungewöhnlich große Mächtigkeit von etwa 400 m (Best et al. 1991; Röhling 2002). Dies verdeutlicht, dass der generelle

Trend in der Mächtigkeitsverteilung durch regionale Schwellen- und Senkenstrukturen, und halokinetische Prozesse überlagert wurde (Gärtner & Röhling 1993).

Die Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen, ihre räumliche Verteilung im Endlagerbereich einschließlich ihrer Eigenschaften sowie die Gesteinsfazies sind im Falle von Sedimentgesteinen bzw. Steinsalz primär von der Morphologie des Sedimentbeckens und den darin vorherrschenden geochemischen Bedingungen, vom Eintrag an terrigenen Sedimenten und von der Tektonik im Becken abhängig.

Indikator „Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich“:

Der für die halokinetischen Prozesse günstige duktile Charakter des Steinsalzes ermöglicht eine Verheilung von Klüften und Verminderung der Porosität, sodass von sehr niedrigen Durchlässigkeitsbeiwerten beim Steinsalz generell auszugehen ist (Wieczorek et al. 2014; Borchert & Muir 1964; Fischbeck & Bornemann 1993; Bornemann et al. 2003).

Indikator „Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)“:

Aufgrund der synsedimentär-tektonischen und späteren halokinetischen Prozesse variieren die Mächtigkeit und Fazies der salinaren Schichtenfolge. Dabei schwankt die Mächtigkeit der einzelnen Steinsalzlagen, sowie die Wechsellagerung von Steinsalz und Sulfaten sowie terrigenen Einträgen.

Indikator „Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit“:

Da es sich um stratiformes Steinsalz handelt, ist es als weitgehend ungestört anzusehen. Lokal begrenzt können flachwellige Deformationsstrukturen vorkommen. Es wurden nur lokal in stratiformen Salzen verfaltete Intrasalinarstrukturen beobachtet, die häufig auf das Abpuffern von Störungen zurück zu führen sind (Reinhold et al. 2014).

Anhang 5.4.4.2 Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG

Indikator „Langfristige Stabilität der Gebirgsdurchlässigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“:

Das Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit und der damit einhergehenden Distanz zu Störungen wird maßgeblich von der paläotektonischen Entwicklung des Ablagerungsbereichs geprägt.

Salztektonische Überprägung im Steinsalz in Folge halokinetischer Bewegungen kann mit kleinräumiger Faltung und Auflösung des ursprünglichen salinaren Schichtverbandes von Gesteinskörpern mit unterschiedlichen felsmechanischen und hydraulischen Eigenschaften verbunden sein.

Andererseits können dadurch mächtige Gesteinspakete mit weitgehend einheitlichen Gesteinseigenschaften entstehen. Die Auswirkungen der salztektonischen Überprägung des ursprünglichen Gesteinsverbandes in Salzstrukturen sind differenziert und standortspezifisch zu beurteilen (Alfarra et al. 2020a, S. 154). Des Weiteren kann die genaue

räumliche Lage des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, auf welchen sich der Indikator bezieht, im Moment noch nicht ausgewiesen werden. Tektonisch aktive Störungen wurden durch die Anwendung der Ausschlusskriterien ausgeschlossen.

Seit der Oberkreide-Inversion unterliegt das Norddeutsche Becken neotektonischen Senkungsprozessen, die seit dem Tertiär auf das Niedersächsische-Becken einwirken. Diese werden durch die einsetzenden Dehnungsbewegungen als Folge der Alpidischen Orogenese verstärkt und nehmen somit auch Einfluss auf die Diapirbildungsrate (von Goerne et al. 2016). Für das damit verbundene Diapistadium wird ein Ende im Tertiär angenommen. Somit kann davon ausgegangen werden, dass, im Gegensatz zu den Salzstöcken, das stratiforme Salz bisher noch nicht halokinetisch mobilisiert worden ist (Reinhold et al. 2014).

Im Quartär veränderten Gletscher und Schmelzwässer die Morphologie in Norddeutschland. Es kam durch die Entwässerung von Gletschern zur Bildung von subglazialen Rinnen, diese können bis zu 500 m (Stackebrandt 2009) in die Tiefe reichen (z. B. Stackebrandt 2010).

Durch die Tiefenlage und Verbreitung des identifizierten Gebietes ergibt sich keine mögliche Beeinflussung durch subglaziale Rinnen. Da die regionale Lage des Salinars des Mittleren Muschelkalkes nicht bekannt ist, ist eine qualitative Angabe zu Tiefen der jeweiligen stratiformen Steinsalzlager mit Wirtsgesteinspotential von standortspezifischen Untersuchungen abhängig.

Anhang 5.4.5 Muschelkalk (Glückstadt-Graben)

Das identifizierte Gebiet 190_05IG_S_f_mm ist Teil des Muschelkalks im Glückstadt-Graben und wurde nicht als Teilgebiet ermittelt.

Anhang 5.4.5.1 Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG

Im Glückstadtgraben sind saline, stratiforme Ablagerungen des Muschelkalks in der Heilbronn-Formation mit Wirtsgesteinspotential bekannt.

Die Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen, ihre räumliche Verteilung im Endlagerbereich einschließlich ihrer Eigenschaften sowie die Gesteinsfazies sind im Falle von Sedimentgesteinen bzw. Steinsalz primär von der Morphologie des Sedimentbeckens und den darin vorherrschenden geochemischen Bedingungen, vom Eintrag an terrigenen Sedimenten und von der Tektonik im Becken abhängig.

Indikator „Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich“:

Der für die halokinetischen Prozesse günstige duktile Charakter des Steinsalzes ermöglicht eine Verheilung von Klüften und Verminderung der Porosität, sodass von sehr niedrigen Durchlässigkeitsbeiwerten beim Steinsalz generell auszugehen ist (Wieczorek et al. 2014; Borchert & Muir 1964; Fischbeck & Bornemann 1993; Bornemann et al. 2003).

Indikator „Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)“:

Aufgrund der synsedimentär-tektonischen und späteren halokinetischen Prozesse variieren die Mächtigkeit und Fazies der salinaren Schichtenfolge. Dabei schwankt die Mächtigkeit der einzelnen Steinsalzlagen, sowie die Wechsellagerung von Steinsalz und Sulfaten sowie terrigenen Einträgen.

Indikator „Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit“:

Da es sich um stratiformes Steinsalz handelt, ist es als weitgehend ungestört anzusehen. Lokal begrenzt können flachwellige Deformationsstrukturen vorkommen. Es wurden nur lokal in stratiformen Salzen verfaltete Intrasalinarstrukturen beobachtet, die häufig auf das Abpuffern von Störungen zurück zu führen sind (Reinhold et al. 2014).

Anhang 5.4.5.2 Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG

Indikator „Langfristige Stabilität der Gebirgsdurchlässigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“:

Das Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit und der damit einhergehenden Distanz zu Störungen wird maßgeblich von der paläotektonischen Entwicklung des Ablagerungsbereichs geprägt.

Salztektonische Überprägung im Steinsalz in Folge halokinetischer Bewegungen kann mit kleinräumiger Faltung und Auflösung des ursprünglichen salinaren Schichtverbandes von Gesteinskörpern mit unterschiedlichen felsmechanischen und hydraulischen Eigenschaften verbunden sein.

Andererseits können dadurch mächtige Gesteinspakete mit weitgehend einheitlichen Gesteinseigenschaften entstehen. Die Auswirkungen der salztektonischen Überprägung des ursprünglichen Gesteinsverbandes in Salzstrukturen sind differenziert und standortspezifisch zu beurteilen (Alfarra et al. 2020a, S. 154). Des Weiteren kann die genaue räumliche Lage des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, auf welchen sich der Indikator bezieht, im Moment noch nicht ausgewiesen werden.

Tektonisch aktive Störungen wurden durch die Anwendung der Ausschlusskriterien ausgeschlossen.

Seit der Oberkreide-Inversion unterliegt das Norddeutsche Becken neotektonischen Senkungsprozessen, die seit dem Tertiär auf das Niedersächsische-Becken einwirken. Diese werden durch die einsetzenden Dehnungsbewegungen als Folge der Alpidischen Orogenese verstärkt und nehmen somit auch Einfluss auf die Diapirbildungsrate (von Goerne et al. 2016). Für das damit verbundene Diapistadium wird ein Ende im Tertiär angenommen. Somit kann davon ausgegangen werden, dass, im Gegensatz zu den Salzstöcken, das stratiforme Salz bisher noch nicht halokinetisch mobilisiert worden ist (Reinhold et al. 2014).

Im Quartär veränderten Gletscher und Schmelzwässer die Morphologie in Norddeutschland. Es kam durch die Entwässerung von Gletschern zur Bildung von subglazialen Rinnen, diese können bis zu 500 m (Stackebrandt 2009) in die Tiefe reichen (z. B. Stackebrandt 2010). Durch die Verbreitung des identifizierten Gebietes ergibt sich eine

mögliche Beeinflussung durch subglaziale Rinnen, die für eine Bewertung standortspezifisch untersucht werden muss. Da die regionale Lage des Salinars des Mittleren Muschelkalkes nicht bekannt ist, ist eine qualitative Angabe zu Tiefen der jeweiligen stratiformen Steinsalzlager mit Wirtsgesteinspotential von standortspezifischen Untersuchungen abhängig.

Anhang 5.5 Buntsandstein

Das Röt-Salinar des Oberen Buntsandsteins ist in nahezu ganz Norddeutschland bis Thüringen verbreitet (siehe Reinhold et al. 2014, S. 40, Abbildung 15; Voigt 2007). Die Röt-Formation und darin enthaltene Salinare haben sich unter epikontinentalen und arid-klimatischen Bedingungen zur Zeit des Kontinents Pangäa in einem Playa See / flachen Meer gebildet. Die Sedimentationsbedingungen waren wechselhaft, teils marin, teils fluviatil. Die Ablagerungen im zentralen Norddeutschen Raum sind geprägt durch eine Beckenfazies und führen marine evaporitisch-halitische Ablagerungsbedingungen. In den Übergangszonen der Sedimentationsräume, wie in Thüringen und Sachsen-Anhalt, sind Sandsteine mit pelitisch dominierten Einlagerungen zu beobachten (Voigt 2007).

Unter ariden Klimaverhältnissen haben sich in einem flachen Meer (Typ Endsee), in Folge von Verdunstung und einem stark eingeschränkten Wasseraustausch hochsalinare Lösungen angereichert, aus denen Steinsalze auskristallisierten (Feist-Burkhardt et al. 2008; Lepper et al. 2013). Das Rötmeer erfuhr eustatische Meeresspiegelschwankungen, gesteuert durch die Schlesische Pforte. Die damit einhergehende Regression hat zur Folge, dass vor allem im Beckenzentrum in Norddeutschland große Mächtigkeiten von Salzhorizonten evaporieren. Dazu gehören u. a. die Steinsalzlager in den Vitzenburg- und Glockenseck-Subformationen, die zusammen in Nordwestdeutschland eine maximale Gesamtmächtigkeit von bis zu 170 m ausmachen können (Frisch & Kockel 2004).

Die Mächtigkeiten des Röt-Salinars sind regional sehr differenziert, bedingt durch die Beeinflussung von paläogeographischen Senken und Schwellen. Die Göschwitz-Subformation formiert sich mit pelitischen Sedimenten als eine Zwischenformation zwischen den Salinaren. Die darauffolgenden Subformationen sind von der Evaporation größtenteils nicht geprägt (Lepper et al. 2013). Das Röt-Salinar im nordwestdeutschen Becken ist in Unteres Röt-Salinar (Röt 1-Subformation) und Oberes Röt-Salinar zu unterteilen (Röt 2-Subformation), die jeweils eine zyklische stratiforme Abfolge aus Basis-Anhydrit, Salinar und Deckanhydrit aufweisen (Röhling 1991). Das Untere Röt-Salinar setzt sich wie folgt zusammen: Röt 1-Basis-Anhydrit, Röt 1-Salinar (Vitzenburg-Steinsalz: abschnittsweise gebändert durch toniges oder anhydritisches Material), Röt 1-Deckanhydrit; Röt-Zwischenmittel: z. T. karbonatische Ton-, Schluff- und Feinsandsteine vorherrschend (Röhling et al. 2018). Im Beckenzentrum sind in den anhydritischen Tonsteinen der Röt-Zwischenmittel bis zu 2 m mächtige Anhydritbänke eingeschaltet. In den beckenrandlicheren Gebieten können bis zu drei Tonmittel auftreten. Zu den Beckenrändern und beckeninternen Schwellen nimmt die Mächtigkeit des Steinsalzes ab, jedoch

nicht die der Tonmittel. Das Obere Röt-Salinar setzt sich wie folgt zusammen: Röt 2-Basis-Anhydrit, Röt 2-Steinsalz, Röt 2-Deckanhydrit; Rotbraune Serie: homogene, z. T. schluffige Tonsteine sowie Schluffsteine, Einschaltungen von geringmächtigen Feinsandsteinen und Anhydriten, im Norden stärker sandig; Röt-Quarzit; Grauviolette Serie (Röhling et al. 2018). Die Röt-Formation kann insgesamt bis zu 300 m mächtig werden. Die Mächtigkeit des Steinsalzes kann 150 m bis 170 m betragen (Röhling et al. 2018). Die Mächtigkeit des Vitzenburg-Steinsalz beträgt 25 m bis 105 m (Radzinski 2008).

Die primäre Mächtigkeit der Röt-Steinsalzlager wurde durch halotektonische Prozesse sowie durch Subrosion verändert. Durch sekundäre Salzmobilisation während der oberkretazischen Inversionsphase drangen Zechsteinsalze in die salinar geprägte Röt-Formation ein und führten zur Zunahme der Mächtigkeit. In diesem Zusammenhang wurden die Röt-Steinsalzlager stark überprägt, ausgequetscht oder dienten als Gleithorizont. Eine sekundäre Mächtigkeitsreduzierung resultiert aus dem schichtparallelen Abwandern des Röt-Salzes aus den Randsenken durch eine Zunahme der sedimentären Auflast (Baldschuhn et al. 1998; Frisch & Kockel 2004).

Anhang 5.5.1 Buntsandstein (Südliches Norddeutsches-Becken)

Das identifizierte Gebiet 191_01IG_S_f_so ist Teil des Buntsandsteins im südlichen Norddeutschen Becken und wurde als Teilgebiet 076_01TG_191_01IG_S_f_so ermittelt.

Anhang 5.5.1.1 Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG

Im Südlichen Norddeutschen Becken sind mächtige, saline, stratiforme Ablagerungen des Buntsandsteins mit Wirtsgesteinspotential bekannt.

Die Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen, ihre räumliche Verteilung im Endlagerbereich einschließlich ihrer Eigenschaften sowie die Gesteinsfazies sind im Falle von Sedimentgesteinen bzw. Steinsalz primär von der Morphologie des Sedimentbeckens und den darin vorherrschenden geochemischen Bedingungen, vom Eintrag an terrigenen Sedimenten und von der Tektonik im Becken abhängig.

Indikator „Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich“:

Der für die halokinetischen Prozesse günstige duktile Charakter des Steinsalzes ermöglicht eine Verheilung von Klüften und Verminderung der Porosität, sodass von sehr niedrigen Durchlässigkeitsbeiwerten beim Steinsalz generell auszugehen ist (Wieczorek et al. 2014; Borchert & Muir 1964; Fischbeck & Bornemann 1993; Bornemann et al. 2003).

Indikator „Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)“:

Aufgrund der synsedimentär-tektonischen und späteren halokinetischen Prozesse variieren die Mächtigkeit und Fazies der salinaren Schichtenfolge. Dabei schwankt die Mächtigkeit der einzelnen Steinsalzlagen, sowie die Wechsellagerung von Steinsalz und Sulfaten sowie terrigenen Einträgen.

Indikator „Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit“:

Da es sich um stratiformes Steinsalz handelt, ist es als weitgehend ungestört anzusehen. Lokal begrenzt können flachwellige Deformationsstrukturen vorkommen. Es wurden nur lokal in stratiformen Salzen verfaltete Intrasalinarstrukturen beobachtet, die häufig auf das Abpuffern von Störungen zurück zu führen sind (Reinhold et al. 2014).

Anhang 5.5.1.2 Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG

Indikator „Langfristige Stabilität der Gebirgsdurchlässigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“:

Das Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit und der damit einhergehenden Distanz zu Störungen wird maßgeblich von der paläotektonischen Entwicklung des Ablagerungsbereichs geprägt.

Salztektonische Überprägung im Steinsalz in Folge halokinetischer Bewegungen kann mit kleinräumiger Faltung und Auflösung des ursprünglichen salinaren Schichtverbandes von Gesteinskörpern mit unterschiedlichen felsmechanischen und hydraulischen Eigenschaften verbunden sein.

Andererseits können dadurch mächtige Gesteinspakete mit weitgehend einheitlichen Gesteinseigenschaften entstehen. Die Auswirkungen der salttektonischen Überprägung des ursprünglichen Gesteinsverbandes in Salzstrukturen sind differenziert und standortspezifisch zu beurteilen (Alfarra et al. 2020a, S. 154). Des Weiteren kann die genaue räumliche Lage des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, auf welchen sich der Indikator bezieht, im Moment noch nicht ausgewiesen werden. Tektonisch aktive Störungen wurden durch die Anwendung der Ausschlusskriterien ausgeschlossen.

Seit der Oberkreide-Inversion unterliegt das Norddeutsche Becken neotektonischen Senkungsprozessen, die seit dem Tertiär auf das Niedersächsische-Becken einwirken. Diese werden durch die einsetzenden Dehnungsbewegungen als Folge der Alpidischen Orogenese verstärkt und nehmen somit auch Einfluss auf die Diapirbildungsrate (von Goerne et al. 2016). Für das damit verbundene Diapistadium wird ein Ende im Tertiär angenommen. Somit kann davon ausgegangen werden, dass, im Gegensatz zu den Salzstöcken, das stratiforme Salz bisher noch nicht halokinetisch mobilisiert worden ist (Reinhold et al. 2014).

Im Quartär veränderten Gletscher und Schmelzwässer die Morphologie in Norddeutschland. Es kam durch die Entwässerung von Gletschern zur Bildung von subglazialen Rinnen, diese können bis zu 500 m (Stackebrandt 2009) in die Tiefe reichen (z. B. Stackebrandt 2010). Durch die Verbreitung des identifizierten Gebietes ergibt sich eine mögliche Beeinflussung durch subglaziale Rinnen, die für eine Bewertung standortspezifisch untersucht werden muss.

Anhang 5.5.2 Buntsandstein (Ostholstein-Westmecklenburg-Block und nordöstliches Niedersächsisches Becken)

Das identifizierte Gebiet 191_02IG_S_f_so ist Teil Buntsandsteins im Ostholstein-Westmecklenburg-Block und im nordöstlichen Niedersächsischen Becken und wurde als Teilgebiet 076_02TG_191_02IG_S_f_so ermittelt.

Anhang 5.5.2.1 Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG

Im Ostholstein-Westmecklenburg-Block und im nordöstlichen Niedersächsischen Becken sind mächtige, salinare, stratiforme Ablagerungen des Buntsandsteins mit Wirtsgesteinspotential bekannt.

Indikator „Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich“:

Das Röt-Salinare ist in ganz Schleswig-Holstein und im westlichen Mecklenburg-Vorpommern verbreitet (siehe Reinhold et al. 2014, S. 40, Abbildung 15). In Schleswig-Holstein sind die Steinsalzlager flächig verbreitet und ihre Mächtigkeit nimmt von Norden nach Süden zu. Das Gebiet wurde tektonisch relativ gering beansprucht (Hable et al. 2011). Im Gebiet des Ostholstein-Blocks liegt Steinsalz der Vitzenburg-Subformation in einer Wechselfolge aus Steinsalz, dolomitisiertem Anhydrit und eingeschalteten Ton- bzw. Silt-Lagen von 26 – 40 m Mächtigkeit vor (Hable et al. 2011).

Die Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen, ihre räumliche Verteilung im Endlagerbereich einschließlich ihrer Eigenschaften sowie die Gesteinsfazies sind im Falle von Sedimentgesteinen bzw. Steinsalz primär von der Morphologie des Sedimentbeckens und den darin vorherrschenden geochemischen Bedingungen, vom Eintrag an terrigenen Sedimenten und von der Tektonik im Becken abhängig.

Der für die halokinetischen Prozesse günstige duktile Charakter des Steinsalzes ermöglicht eine Verheilung von Klüften und Verminderung der Porosität, sodass von sehr niedrigen Durchlässigkeitsbeiwerten beim Steinsalz generell auszugehen ist (Wieczorek et al. 2014; Borchert & Muir 1964; Fischbeck & Bornemann 1993; Bornemann et al. 2003).

Indikator „Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)“:

Aufgrund der synsedimentär-tektonischen und späteren halokinetischen Prozesse variieren die Mächtigkeit und Fazies der salinaren Schichtenfolge. Dabei schwankt die Mächtigkeit der einzelnen Steinsalzlagen, sowie die Wechsellagerung von Steinsalz und Sulfaten sowie terrigenen Einträgen.

Indikator „Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit“:

Da es sich um stratiformes Steinsalz handelt, ist es als weitgehend ungestört anzusehen. Lokal begrenzt können flachwellige Deformationsstrukturen vorkommen. Es wurden nur lokal in stratiformen Salzen verfaltete Intrasalinarstrukturen beobachtet, die häufig auf das Abpuffern von Störungen zurück zu führen sind (Reinhold et al. 2014).

Anhang 5.5.2.2 Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG

Das Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit und der damit einhergehenden Distanz zu Störungen wird maßgeblich von der paläotektonischen Entwicklung des Ablagerungsbereichs geprägt.

Indikator „Langfristige Stabilität der Gebirgsdurchlässigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“:

Salztektonische Überprägung im Steinsalz in Folge halokinetischer Bewegungen kann mit kleinräumiger Faltung und Auflösung des ursprünglichen salinaren Schichtverbandes von Gesteinskörpern mit unterschiedlichen felsmechanischen und hydraulischen Eigenschaften verbunden sein.

Andererseits können dadurch mächtige Gesteinspakete mit weitgehend einheitlichen Gesteinseigenschaften entstehen. Die Auswirkungen der salztektonischen Überprägung des ursprünglichen Gesteinsverbandes in Salzstrukturen sind differenziert und standortspezifisch zu beurteilen (Alfarra et al. 2020a, S. 154). Des Weiteren kann die genaue räumliche Lage des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, auf welchen sich der Indikator bezieht, im Moment noch nicht ausgewiesen werden. Tektonisch aktive Störungen wurden durch die Anwendung der Ausschlusskriterien ausgeschlossen.

Seit der Oberkreide-Inversion unterliegt das Norddeutsche Becken neotektonischen Senkungsprozessen, die seit dem Tertiär auf das Niedersächsische-Becken einwirken. Diese werden durch die einsetzenden Dehnungsbewegungen als Folge der Alpidischen Orogenese verstärkt und nehmen somit auch Einfluss auf die Diapirbildungsrate (von Goerne et al. 2016). Für das damit verbundene Diapistadium wird ein Ende im Tertiär angenommen. Somit kann davon ausgegangen werden, dass, im Gegensatz zu den Salzstöcken, das stratiforme Salz bisher noch nicht halokinetisch mobilisiert worden ist (Reinhold et al. 2014).

Im Quartär veränderten Gletscher und Schmelzwässer die Morphologie in Norddeutschland. Es kam durch die Entwässerung von Gletschern zur Bildung von subglazialen Rinnen, diese können bis zu 500 m (Stackebrandt 2009) in die Tiefe reichen (z. B. in Stackebrandt 2010). Durch die Verbreitung des identifizierten Gebietes ergibt sich eine mögliche Beeinflussung durch subglaziale Rinnen, die für eine Bewertung standortspezifisch untersucht werden muss.

Für das vorliegende identifizierte Gebiet ist der Indikator „Zeitspanne, über die sich die Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht wesentlich verändert hat“
191_03IG_S_f_so Westschleswig-Block

Anhang 5.5.3 Buntsandstein (Schleswig-Holstein)

Das identifizierte Gebiet 191_03IG_S_f_so ist Teil des Buntsandsteins in Schleswig-Holstein und wurde nicht als Teilgebiet ermittelt.

Anhang 5.5.3.1 Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG

Indikator „Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften“:

Das Röt-Salinar ist in ganz Schleswig-Holstein (SH) verbreitet (Reinhold et al. 2014, S. 40, Abbildung 15). Die Gesamtmächtigkeit der Steinsalzlager schwankt zwischen 40 m im Nordwesten und 120 m im Südwesten. Häufig werden Einlagerungen von

Gips- und Anhydrit-Einlagerungen beobachtet. Das Steinsalzlager ist durch mehrere Meter mächtige Zwischenmittel gegliedert. In einigen Bohrungen können bis zu fünf einzelne Salzlager differenziert werden (Hable et al. 2011).

Die Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen, ihre räumliche Verteilung im Endlagerbereich einschließlich ihrer Eigenschaften sowie die Gesteinsfazies sind im Falle von Sedimentgesteinen bzw. Steinsalz primär von der Morphologie des Sedimentbeckens und den darin vorherrschenden geochemischen Bedingungen, vom Eintrag an terrigenen Sedimenten und von der Tektonik im Becken abhängig.

Indikator „Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich“:

Der für die halokinetischen Prozesse günstige duktile Charakter des Steinsalzes ermöglicht eine Verheilung von Klüften und Verminderung der Porosität, sodass von sehr niedrigen Durchlässigkeitsbeiwerten beim Steinsalz generell auszugehen ist (Wieczorek et al. 2014; Borchert & Muir 1964; Fischbeck & Bornemann 1993; Bornemann et al. 2003).

Indikator „Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)“:

Aufgrund der synsedimentär-tektonischen und späteren halokinetischen Prozesse variieren die Mächtigkeit und Fazies der salinaren Schichtenfolge. Dabei schwankt die Mächtigkeit der einzelnen Steinsalzlager, sowie die Wechsellagerung von Steinsalz und Sulfaten sowie terrigenen Einträgen.

Indikator „Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit“:

Da es sich um stratiformes Steinsalz handelt, ist es als weitgehend ungestört anzusehen. Lokal begrenzt können flachwellige Deformationsstrukturen vorkommen. Es wurden nur lokal in stratiformen Salzen verfaltete Intrasalinarstrukturen beobachtet, die häufig auf das Abpuffern von Störungen zurück zu führen sind (Reinhold et al. 2014).

Anhang 5.5.3.2 Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG

Indikator „Langfristige Stabilität der Gebirgsdurchlässigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“:

Das Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit und der damit einhergehenden Distanz zu Störungen wird maßgeblich von der paläotektonischen Entwicklung des Ablagerungsbereichs geprägt.

Salztektonische Überprägung im Steinsalz in Folge halokinetischer Bewegungen kann mit kleinräumiger Faltung und Auflösung des ursprünglichen salinaren Schichtverbandes von Gesteinskörpern mit unterschiedlichen felsmechanischen und hydraulischen Eigenschaften verbunden sein.

Andererseits können dadurch mächtige Gesteinspakete mit weitgehend einheitlichen Gesteinseigenschaften entstehen. Die Auswirkungen der salztektonischen Überprägung des ursprünglichen Gesteinsverbandes in Salzstrukturen sind differenziert und standortspezifisch zu beurteilen (Alfarra et al. 2020a, S. 154). Des Weiteren kann die genaue

räumliche Lage des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, auf welchen sich der Indikator bezieht, im Moment noch nicht ausgewiesen werden. Tektonisch aktive Störungen wurden durch die Anwendung der Ausschlusskriterien ausgeschlossen.

Seit der Oberkreide-Inversion unterliegt das Norddeutsche Becken neotektonischen Senkungsprozessen, die seit dem Tertiär auf das Niedersächsische-Becken einwirken. Diese werden durch die einsetzenden Dehnungsbewegungen als Folge der Alpidischen Orogenese verstärkt und nehmen somit auch Einfluss auf die Diapirbildungsrate (von Goerne et al. 2016). Für das damit verbundene Diapistadium wird ein Ende im Tertiär angenommen. Somit kann davon ausgegangen werden, dass, im Gegensatz zu den Salzstöcken, das stratiforme Salz bisher noch nicht halokinetisch mobilisiert worden ist (Reinhold et al. 2014).

Im Quartär veränderten Gletscher und Schmelzwässer die Morphologie in Norddeutschland. Es kam durch die Entwässerung von Gletschern zur Bildung von subglazialen Rinnen, diese können bis zu 500 m (Stackebrandt 2009) in die Tiefe reichen (z. B. Stackebrandt 2010).

Durch die Verbreitung des identifizierten Gebietes ergibt sich eine mögliche Beeinflussung durch subglaziale Rinnen, die für eine Bewertung standortspezifisch untersucht werden muss.

Anhang 5.5.4 Buntsandstein (Harzvorland)

Das identifizierte Gebiet 191_04IG_S_f_so ist Teil des Buntsandsteins im Harzvorland und wurde nicht als Teilgebiet ermittelt.

Anhang 5.5.4.1 Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG

Indikator „Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften“:

Das Röt-Salinar ist in ganz Ostniedersachsen verbreitet (siehe Reinhold et al. 2014, S. 40, Abbildung 15). Im Subherzyn wird das Steinsalzlager der Röt-Formation mit einer Mächtigkeit von 80 bis 100 m durch zwei bis drei Tonmittel gegliedert (Beywl et al. 1974; Röhling 2015).

Die Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen, ihre räumliche Verteilung im Endlagerbereich einschließlich ihrer Eigenschaften sowie die Gesteinsfazies sind im Falle von Sedimentgesteinen bzw. Steinsalz primär von der Morphologie des Sedimentbeckens und den darin vorherrschenden geochemischen Bedingungen, vom Eintrag an terrigenen Sedimenten und von der Tektonik im Becken abhängig.

Indikator „Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich“:

Der für die halokinetischen Prozesse günstige duktile Charakter des Steinsalzes ermöglicht eine Verheilung von Klüften und Verminderung der Porosität, sodass von sehr niedrigen Durchlässigkeitsbeiwerten beim Steinsalz generell auszugehen ist (Wieczorek et al. 2014; Borchert & Muir 1964; Fischbeck & Bornemann 1993; Bornemann et al. 2003).

Indikator „Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)“:

Aufgrund der synsedimentär-tektonischen und späteren halokinetischen Prozesse variieren die Mächtigkeit und Fazies der salinaren Schichtenfolge. Dabei schwankt die Mächtigkeit der einzelnen Steinsalzlagen, sowie die Wechsellagerung von Steinsalz und Sulfaten sowie terrigenen Einträgen.

Indikator „Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit“:

Da es sich um stratiformes Steinsalz handelt, ist es als weitgehend ungestört anzusehen. Lokal begrenzt können flachwellige Deformationsstrukturen vorkommen. Es wurden nur lokal in stratiformen Salzen verfaltete Intrasalinarstrukturen beobachtet, die häufig auf das Abpuffern von Störungen zurück zu führen sind (Reinhold et al. 2014).

Anhang 5.5.4.2 Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG

Indikator „Langfristige Stabilität der Gebirgsdurchlässigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“:

Das Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit und der damit einhergehenden Distanz zu Störungen wird maßgeblich von der paläotektonischen Entwicklung des Ablagerungsbereichs geprägt.

Salztektonische Überprägung im Steinsalz in Folge halokinetischer Bewegungen kann mit kleinräumiger Faltung und Auflösung des ursprünglichen salinaren Schichtverbandes von Gesteinskörpern mit unterschiedlichen felsmechanischen und hydraulischen Eigenschaften verbunden sein.

Andererseits können dadurch mächtige Gesteinspakete mit weitgehend einheitlichen Gesteinseigenschaften entstehen. Die Auswirkungen der salztektonischen Überprägung des ursprünglichen Gesteinsverbandes in Salzstrukturen sind differenziert und standortspezifisch zu beurteilen (Alfarra et al. 2020a, S. 154). Des Weiteren kann die genaue räumliche Lage des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, auf welchen sich der Indikator bezieht, im Moment noch nicht ausgewiesen werden.

Tektonisch aktive Störungen wurden durch die Anwendung der Ausschlusskriterien ausgeschlossen.

Im Quartär veränderten Gletscher und Schmelzwässer die Morphologie in Norddeutschland. Es kam durch die Entwässerung von Gletschern zur Bildung von subglazialen Rinnen, diese können bis zu 500 m (Stackebrandt 2009) in die Tiefe reichen (z. B. Stackebrandt 2010). Durch die Verbreitung des identifizierten Gebietes ergibt sich eine mögliche Beeinflussung durch subglaziale Rinnen, die für eine Bewertung standortspezifisch untersucht werden muss.

Anhang 5.5.5 Buntsandstein (Münsterländer Tieflandsbucht)

Das identifizierte Gebiet 191_05IG_S_f_so ist Teil des Buntsandsteins in der Münsterländer Tieflandsbucht und wurde als Teilgebiet 076_03TG_191_05IG_S_f_so ermittelt.

Anhang 5.5.5.1 Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG

Indikator „Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften“:

Das Röt-Salinar ist in ganz Nordwestdeutschland verbreitet (siehe Reinhold et al. 2014, S. 40, Abbildung 15). Die Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen, ihre räumliche Verteilung im Endlagerbereich einschließlich ihrer Eigenschaften sowie die Gesteinsfazies sind im Falle von Sedimentgesteinen bzw. Steinsalz primär von der Morphologie des Sedimentbeckens und den darin vorherrschenden geochemischen Bedingungen, vom Eintrag an terrigenen Sedimenten und von der Tektonik im Becken abhängig.

Indikator „Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich“:

Der für die halokinetischen Prozesse günstige duktile Charakter des Steinsalzes ermöglicht eine Verheilung von Klüften und Verminderung der Porosität, sodass von sehr niedrigen Durchlässigkeitsbeiwerten beim Steinsalz generell auszugehen ist (Wieczorek et al. 2014; Borchert & Muir 1964; Fischbeck & Bornemann 1993; Bornemann et al. 2003).

Indikator „Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)“:

Aufgrund der synsedimentär-tektonischen und späteren halokinetischen Prozesse variieren die Mächtigkeit und Fazies der salinaren Schichtenfolge. Dabei schwankt die Mächtigkeit der einzelnen Steinsalzlagen, sowie die Wechsellagerung von Steinsalz und Sulfaten sowie terrigenen Einträgen.

Indikator „Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit“:

Da es sich um stratiformes Steinsalz handelt, ist es als weitgehend ungestört anzusehen. Lokal begrenzt können flachwellige Deformationsstrukturen vorkommen. Es wurden nur lokal in stratiformen Salzen verfaltete Intrasalinarstrukturen beobachtet, die häufig auf das Abpuffern von Störungen zurück zu führen sind (Reinhold et al. 2014).

Anhang 5.5.5.2 Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG

Indikator „Langfristige Stabilität der Gebirgsdurchlässigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“:

Das Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit und der damit einhergehenden Distanz zu Störungen wird maßgeblich von der paläotektonischen Entwicklung des Ablagerungsbereichs geprägt.

Salztektonische Überprägung im Steinsalz in Folge halokinetischer Bewegungen kann mit kleinräumiger Faltung und Auflösung des ursprünglichen salinaren Schichtverbandes von Gesteinskörpern mit unterschiedlichen felsmechanischen und hydraulischen Eigenschaften verbunden sein.

Andererseits können dadurch mächtige Gesteinspakete mit weitgehend einheitlichen Gesteinseigenschaften entstehen. Die Auswirkungen der salztektonischen Überprägung

des ursprünglichen Gesteinsverbandes in Salzstrukturen sind differenziert und standort-spezifisch zu beurteilen (Alfarra et al. 2020a, S. 154). Des Weiteren kann die genaue räumliche Lage des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, auf welchen sich der Indikator bezieht, im Moment noch nicht ausgewiesen werden.

Tektonisch aktive Störungen wurden durch die Anwendung der Ausschlusskriterien ausgeschlossen.

Im Quartär veränderten Gletscher und Schmelzwässer die Morphologie in Norddeutschland. Es kam durch die Entwässerung von Gletschern zur Bildung von subglazialen Rinnen, diese können bis zu 500 m (Stackebrandt 2009) in die Tiefe reichen (z. B. (Stackebrandt 2010). Durch die Verbreitung des identifizierten Gebietes ergibt sich eine mögliche Beeinflussung durch subglaziale Rinnen, die für eine Bewertung standortspezifisch untersucht werden muss.

Anhang 5.6 Zechstein

Das Zechsteinmeer existierte im späten Perm und war ein flaches Epikontinentalmeer. Aufgrund des ariden Klimas und zyklisch folgenden Transgressionen, aufgrund eustatischer Meeresspiegelschwankungen (Ziegler 1990), bildeten sich bis zu sieben Zyklen des Zechsteins aus (Werra-, Staßfurt-, Leine-, Aller-, Ohre-, Friesland- sowie Fulda-Formation), die zu Ablagerungen von Tonen, Kalksteinen und evaporitischen Gesteinen mit Gips bzw. Anhydrit und verschiedenen Salzen geführt haben (Käding 2005; Meschede 2018).

Dabei sind die Zyklen, die jeweils durch einen erneuten Zustrom von Meerwasser in das Zentraleuropäische Becken begannen, in den verschiedenen Ablagerungsgebieten Deutschlands durchaus unterschiedlich ausgeprägt. Generell gilt, dass im Beckeninneren alle Zechstein-Zyklen ausgeprägt sind, während an den Rändern die oberen Zyklen nicht mehr oder nur noch unvollständig vertreten sind (Meschede 2018).

Die Zechsteinablagerungen im Inneren des Zentraleuropäischen Beckens sind somit mächtiger als an den Beckenrändern (Meschede 2018; Ziegler 1990). Die Basis der Ablagerungen wird zum Beckeninneren tiefer (Krull et al. 2004). Am Beckenrand beinhalten die salinaren Schichten zunehmend Anhydrit, Karbonate und Klastika (Käding 2005).

Im Mesozoikum und Känozoikum kam es zur Halokinese und zahlreiche „steile“ Salzstrukturen, sogenannte Salzstöcke und Salzmauern, entstanden. Die weiterhin mächtigen, regional verbreiteten stratiformen (flach lagernden) Steinsalzschiefer sind entweder durch Wälle oder Senken beschränkt oder kommen in Gebieten mit geringer halokinetischen Fließvorgängen vor (Reinhold et al. 2014).

Anhang 5.6.1 Zechstein (Niederlausitzer Becken)

Das identifizierte Gebiet 197_01IG_S_f_z ist Teil des Zechsteins im Niederlausitzer Becken und wurde als Teilgebiet 078_01TG_197_01IG_S_f_z ermittelt.

Anhang 5.6.1.1 Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG

Im Niederlausitzer Becken sind mächtige, saline, stratiforme Steinsalz-Ablagerungen mit Wirtsgesteinspotenzial aus Werra-, Staßfurt- und Leine -Formation bekannt.

Indikator „Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften“:

Die südliche Verbreitungsgrenze der salinaren Fazies in Deutschland verlief etwa vom südöstlichen Brandenburg über die Randsenken Thüringer Becken und Werra-Fulda Becken (BGR 2014). Das Niederlausitzer-Becken gehört somit zu einem beckenrandlichen Ablagerungsgebiet, in dem eine Sabkah- und Karbonatfazies vorherrscht (Reinhold et al. 2014).

Leine-Folge: Die Leine-Folge besteht aus dem 2 bis 3 m mächtigen unterem Leineton (feinsandige Schluff- bis Tonlage), fast immer gefolgt von Hauptanhydrit. Darüber folgt das sehr unterschiedlich mächtige Leine-Steinsalz.

Staßfurt-Folge: In der Staßfurt-Folge ist das Staßfurt-Karbonat weiträumig karbonatisch-tonig-bituminös ausgebildet. Der darüber liegende Basalanhydrit (A2) ist nur geringmächtig vorhanden, beckenwärts vorwiegend feingeschichtet, im Plattformbereich dagegen überwiegend gröberlagig bis wolkig ausgebildet. Stein- und Kalisalz erreichen Mächtigkeiten von 100 m (Beckenrand) bis 800 m (im Becken).

Werra-Formation: Am Beckenrand liegt in der Werra-Formation über geringmächtigem tonig-kalkigem Sediment eine bis 400 m mächtige Anhydrit/Karbonat-Plattform mit eingeschaltetem Werra-Steinsalz (in lagunärer Position mehr als 200 m mächtig). Weiterhin kommt geringmächtiger Kupferschiefer überlagert von Zechsteinkalk, unterem Werra-Anhydrit, Werra-Steinsalz und oberem Werra-Anhydrit, vor.

Die Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen, ihre räumliche Verteilung im Endlagerbereich einschließlich ihrer Eigenschaften sowie die Gesteinsfazies sind im Falle von Sedimentgesteinen bzw. Steinsalz primär von der Morphologie des Sedimentbeckens und den darin vorherrschenden geochemischen Bedingungen, vom Eintrag an terrigenen Sedimenten und von der Tektonik im Becken abhängig.

Indikator „Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich“:

Der für die halokinetischen Prozesse günstige duktile Charakter des Steinsalzes ermöglicht eine Verheilung von Klüften und Verminderung der Porosität, sodass von sehr niedrigen Durchlässigkeitsbeiwerten beim Steinsalz generell auszugehen ist (Wieczorek et al. 2014; Borchert & Muir 1964; Fischbeck & Bornemann 1993; Bornemann et al. 2003).

Indikator „Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)“:

Aufgrund der synsedimentär-tektonischen und späteren halokinetischen Prozesse variieren die Mächtigkeit und Fazies der salinaren Schichtenfolge. Dabei schwankt die Mächtigkeit der einzelnen Steinsalzlagen, sowie die Wechsellagerung von Steinsalz und Sulfaten sowie terrigenen Einträgen.

Indikator „Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit“:

Da es sich um stratiformes Steinsalz handelt, ist es als weitgehend ungestört anzusehen. Lokal begrenzt können flachwellige Deformationsstrukturen vorkommen. Es wurden nur lokal in stratiformen Salzen verfaltete Intrasalinarstrukturen beobachtet, die häufig auf das Abpuffern von Störungen zurück zu führen sind (Reinhold et al. 2014)

Anhang 5.6.1.2 Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG

Indikator „Langfristige Stabilität der Gebirgsdurchlässigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“:

Das Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit und der damit einhergehenden Distanz zu Störungen wird maßgeblich von der paläotektonischen Entwicklung des Ablagerungsbereichs geprägt.

Salztektonische Überprägung im Steinsalz in Folge halokinetischer Bewegungen kann mit kleinräumiger Faltung und Auflösung des ursprünglichen salinaren Schichtverbandes von Gesteinskörpern mit unterschiedlichen felsmechanischen und hydraulischen Eigenschaften verbunden sein.

Andererseits können dadurch mächtige Gesteinspakete mit weitgehend einheitlichen Gesteinseigenschaften entstehen. Die Auswirkungen der salttektonischen Überprägung des ursprünglichen Gesteinsverbandes in Salzstrukturen sind differenziert und standortspezifisch zu beurteilen (Alfarra et al. 2020a, S. 154). Des Weiteren kann die genaue räumliche Lage des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, auf welchen sich der Indikator bezieht, im Moment noch nicht ausgewiesen werden. Tektonisch aktive Störungen wurden durch die Anwendung der Ausschlusskriterien ausgeschlossen.

Seit der Oberkreide-Inversion unterliegt das Norddeutsche Becken neotektonischen Senkungsprozessen, die seit dem Tertiär auf das Niedersächsische-Becken einwirken. Diese werden durch die einsetzenden Dehnungsbewegungen als Folge der Alpidischen Orogenese verstärkt und nehmen somit auch Einfluss auf die Diapirbildungsrate (von Goerne et al. 2016). Für das damit verbundene Diapistadium wird ein Ende im Tertiär angenommen. Somit kann davon ausgegangen werden, dass, im Gegensatz zu den Salzstöcken, das stratiforme Salz bisher noch nicht halokinetisch mobilisiert worden ist (Reinhold et al. 2014).

Im Quartär veränderten Gletscher und Schmelzwässer die Morphologie in Norddeutschland. Es kam durch die Entwässerung von Gletschern zur Bildung von subglazialen Rinnen, diese können bis zu 500 m (Stackebrandt 2009) in die Tiefe reichen (z. B. Stackebrandt 2010). Durch die Verbreitung des identifizierten Gebietes ergibt sich eine mögliche Beeinflussung durch subglaziale Rinnen, die für eine Bewertung standortspezifisch untersucht werden muss.

Anhang 5.6.2 Zechstein (Thüringer Becken)

Das identifizierte Gebiet 197_02IG_S_f_z ist Teil des Zechsteins im Thüringer Becken und wurde als Teilgebiet 078_02TG_197_02IG_S_f_z ermittelt.

Anhang 5.6.2.1 Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG

Im Thüringer Becken sind mächtige, saline, stratiforme Steinsalz-Ablagerungen mit Wirtsgesteinspotenzial aus Werra-, Staßfurt-, Leine und ggf. Aller-Formation bekannt.

Indikator „Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften“:

Die südliche Verbreitungsgrenze der salinaren Fazies in Deutschland verlief etwa vom südöstlichen Brandenburg über die Randsenken Thüringer Becken und Werra-Fulda Becken (Reinhold et al. 2014). Das Thüringer Becken ist durch paläogeographische Schwellen und Senken gegliedert. Zudem kam es durch die Nähe zum Festland und der dementsprechenden Becken-Rand-Lage zu Veränderungen von Mächtigkeit und Fazies innerhalb der Schichtenfolge des Zechsteins (Kästner 1996).

Die Werra-Formation ist mit einer Mächtigkeit von bis 200 m in einem Nordwest-Südost streichenden Gebiet zwischen Mühlhausen und Ilmenau verbreitet, nach Nordosten nimmt diese Mächtigkeit bis auf wenige Zehnermeter ab (Zander & Huckriede 2011). Das Werra-Steinsalz ist hier mit Anhydritschlieren und -Bänken sowie Tonflocken durchsetzt. An Randgebieten des Beckens kommt es zu klastischen Einschaltungen innerhalb des Salinars (Langbein & Seidel 2003).

Das Staßfurt-Steinsalz (z2NA) wird als relativ reiner Halitit beschrieben und weist im Thüringer Becken in Bohrung nachgewiesene Mächtigkeiten von 0 bis 617 m auf, wobei es sich dabei ggf. um scheinbare Mächtigkeiten handelt. Seidel (2013) erwähnt Mächtigkeiten von über 300 m, die ihre Hauptverbreitung im nördlichen Thüringer Becken haben.

Das Steinsalz der Leine-Folge (z3NA) weist Mächtigkeiten von 0 bis 153 m auf. (DokID 11844858; (Seidel 2013). Das Leine-Steinsalz ist im Nordwesten und Zentrum des Thüringer Beckens verbreitet.

Die hohen Mächtigkeiten kommen z. T. durch die halokinetische Mobilisierung des Salzes bis zum Kissenstadium zu Stande. Zum Rand der Thüringer Senke nimmt die Mächtigkeit des Steinsalzlagers ab (Reinhold et al. 2014, S. 32).

Die Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen, ihre räumliche Verteilung im Endlagerbereich einschließlich ihrer Eigenschaften sowie die Gesteinsfazies sind im Falle von Sedimentgesteinen bzw. Steinsalz primär von der Morphologie des Sedimentbeckens und den darin vorherrschenden geochemischen Bedingungen, vom Eintrag an terrigenen Sedimenten und von der Tektonik im Becken abhängig.

Indikator „Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich“:

Der für die halokinetischen Prozesse günstige duktile Charakter des Steinsalzes ermöglicht eine Verheilung von Klüften und Verminderung der Porosität, sodass von sehr niedrigen Durchlässigkeitsbeiwerten beim Steinsalz generell auszugehen ist (Wieczorek et al. 2014; Borchert & Muir 1964; Fischbeck & Bornemann 1993; Bornemann et al. 2003).

Aufgrund der synsedimentär-tektonischen und späteren halokinetischen Prozesse variieren die Mächtigkeit und Fazies der salinaren Schichtenfolge. Dabei schwankt die Mächtigkeit der einzelnen Steinsalzlagen, sowie die Wechsellagerung von Steinsalz und Sulfaten sowie terrigenen Einträgen.

Indikator „Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit“:

Da es sich um stratiformes Steinsalz handelt, ist es als weitgehend ungestört anzusehen. Lokal begrenzt können flachwellige Deformationsstrukturen vorkommen. Es wurden nur lokal in stratiformen Salzen verfaltete Intrasalinarstrukturen beobachtet, die häufig auf das Abpuffern von Störungen zurück zu führen sind (Reinhold et al. 2014).

Anhang 5.6.2.2 Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG

Indikator „Langfristige Stabilität der Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“:

Die Werra-Formation ist bis zu 200 m, das Staßfurt-Steinsalz bis zu 617 m (ggf. scheinbare Mächtigkeit) und das Steinsalz der Leine-Folge bis 153 m mächtig.

Die hohen Mächtigkeiten kommen z. T. durch die halokinetische Mobilisierung des Salzes bis zum Kissenstadium zu Stande. Zum Rand der Thüringer Senke nimmt die Mächtigkeit des Steinsalzlagers ab (Reinhold et al. 2014, S. 32). Die halokinetischen Prozesse endeten im Tertiär (Reinhold et al. 2014).

Indikator „Langfristige Stabilität der Gebirgsdurchlässigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“:

Dieses identifizierte Gebiet liegt außerhalb der sich gebildeten subglazialen Rinnen (vergl. Keller 2009). Aus diesem Grund wird angenommen, dass seit mehr als zehn Millionen Jahren keine wesentlichen Änderungen der Mächtigkeit, der Ausdehnung und der Gebirgsdurchlässigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs aufgetreten sind.

Anhang 5.6.3 Zechstein (Werra-Fulda-Becken, inkl. Fränkisches Becken)

Das identifizierte Gebiet 197_03IG_S_f_z ist Teil des Zechsteins im Werra-Fulda-Becken, inkl. Fränkisches Becken und wurde als Teilgebiet 078_03TG_197_03IG_S_f_z ermittelt.

Anhang 5.6.3.1 Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG

Innerhalb des Werra-Fulda-Becken sind mächtige, salinare, stratiforme Steinsalz-Ablagerungen mit Wirtsgesteinspotenzial der Werra-Formation bekannt. Variationen im Aufbau und in der Zusammensetzung der salinaren Schichtenfolge sind auf Unterschiede der Beckenposition/paläographischen Lage und synsedimentär-tektonische Differenzierung der Sedimentbecken und Ablaugungsprozesse zurück zu führen (Reinhold et al. 2014; Bauriegel 2004; Seidel 2013). Die südliche Verbreitungsgrenze der salinaren Fazies in Deutschland verlief etwa vom südöstlichen Brandenburg über die Randsenken Thüringer Becken und Werra-Fulda Becken (Reinhold et al. 2014).

Indikator „Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich“ und „Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften“:

Innerhalb der Werra-Formation kommen 2 Kaliflöze vor, die durch Steinsalz mit einer Mächtigkeit von ungefähr 50 bis 80 m voneinander getrennt sind (Blasig 1993; Beer 1996), so dass im Werra-Becken insgesamt Mächtigkeiten von bis 300 m und im Fulda-Becken von bis 220 m erreicht werden (Reinhold et al. 2014). Vereinzelt wird von Steinsalzablagerungen aus dem Beckeninneren mit Mächtigkeiten von bis zu 400 m berichtet (Käding 1975; Mayrhofer 1967).

Das untere Werra-Steinsalz wird nicht als reines Halitgestein beschrieben, sondern als durch anhydritische Zonen gebankt (Käding 1975; Roth 1967). Das Obere Werra-Steinsalz weist eine Dreigliederung durch Kieserit-, Anhydrit- und Toneinschaltungen auf, welches nach oben hin höhere Anhydritgehalte aufweist und am Top Tonbänke eingelagert hat (Mayrhofer 1967; Roth 1967). Das Fulda-Gebiet, das durch ein Grabensystem vom Werra-Gebiet getrennt ist und die südwestliche Fortsetzung darstellt, weist im Vergleich zum Werra-Gebiet mit etwa 200 m Mächtigkeit geringmächtigere Werra-Steinsalzablagerungen auf (Kupfahl 1965; Roth & Laemmlen 1970). Das Fulda-Gebiet zeigt den gleichen Aufbau der Steinsalzsichten wie im Werra-Gebiet. Es unterscheidet sich lediglich in der Mächtigkeit und der Ausbildung der einzelnen Steinsalzsichten.

Indikator „Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit“:

Im Werra-Fulda-Becken sind Basaltgänge des tertiären Vulkanismus der Rhön in das Steinsalz eingedrungen, dies hat unter Druck stehende CO₂- und N₂-Gaseinschlüsse zur Folge (Blasig 1993; Pohl 2005). Außerdem sind vereinzelte Salzlösungsvorkommen im Salinar mit einem Volumen von mehreren Tausend Kubikmeter und wenige Zuflüsse von gesättigten Salzsolen aus dem Liegenden des Steinsalzes der Werra-Formation bekannt (Reinhold et al. 2014, S. 31).

Indikator „Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich“:

Die Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen, ihre räumliche Verteilung im Endlagerbereich einschließlich ihrer Eigenschaften sowie die Gesteinsfazies sind im Falle von Sedimentgesteinen bzw. Steinsalz primär von der Morphologie des Sedimentbeckens und den darin vorherrschenden geochemischen Bedingungen, vom Eintrag an terrigenen Sedimenten und von der Tektonik im Becken abhängig.

Der für die halokinetischen Prozesse günstige duktile Charakter des Steinsalzes ermöglicht eine Verheilung von Klüften und Verminderung der Porosität, sodass von sehr niedrigen Durchlässigkeitsbeiwerten beim Steinsalz generell auszugehen ist (Wieczorek et al. 2014; Borchert & Muir 1964; Fischbeck & Bornemann 1993; Bornemann et al. 2003).

Aufgrund der synsedimentär-tektonischen und späteren halokinetischen Prozesse variieren die Mächtigkeit und Fazies der salinaren Schichtenfolge. Dabei schwankt die Mächtigkeit der einzelnen Steinsalzlagen, sowie die Wechsellagerung von Steinsalz und Sulfaten sowie terrigenen Einträgen.

Indikator „Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit“:

Da es sich um stratiformes Steinsalz handelt, ist es als weitgehend ungestört anzusehen. Lokal begrenzt können flachwellige Deformationsstrukturen vorkommen. Es wurden nur lokal in stratiformen Salzen verfaltete Intrasalinarstrukturen beobachtet, die häufig auf das Abpuffern von Störungen zurück zu führen sind (Reinhold et al. 2014):

Anhang 5.6.3.2 Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG

Indikator „Zeitspanne, über die sich die Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht wesentlich verändert hat“:

Die Tiefe des Tops des Zechsteins variiert und liegt östlich von Bad Hersfeld mit 600 bis 1000 m tiefer (Ahorner & Sobisch 1988) und östlich von Kassel höher, da es nach der Ablagerung zu salzkinematischen Prozessen (Hoppe 1960) und Ablaugungen in Gebieten ohne hinreichende hydraulische Abdichtung und dadurch zu Mächtigkeitsschwankungen kam (Bauriegel 2004).

Indikator „Zeitspanne, über die sich die Gebirgsdurchlässigkeit nicht wesentlich verändert hat“:

Das Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit und der damit einhergehenden Distanz zu Störungen wird maßgeblich von der paläotektonischen Entwicklung des Ablagerungsbereichs geprägt.

Salztektonische Überprägung im Steinsalz in Folge halokinetischer Bewegungen kann mit kleinräumiger Faltung und Auflösung des ursprünglichen salinaren Schichtverbandes von Gesteinskörpern mit unterschiedlichen felsmechanischen und hydraulischen Eigenschaften verbunden sein.

Andererseits können dadurch mächtige Gesteinspakete mit weitgehend einheitlichen Gesteinseigenschaften entstehen. Die Auswirkungen der salztektonischen Überprägung des ursprünglichen Gesteinsverbandes in Salzstrukturen sind differenziert und standortspezifisch zu beurteilen (Alfarra et al. 2020a, S. 154). Des Weiteren kann die genaue räumliche Lage des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, auf welchen sich der Indikator bezieht, im Moment noch nicht ausgewiesen werden. Tektonisch aktive Störungen wurden durch die Anwendung der Ausschlusskriterien ausgeschlossen.

Im Quartär veränderten Gletscher und Schmelzwässer die Morphologie in Norddeutschland. Es kam durch die Entwässerung von Gletschern zur Bildung von subglazialen Rinnen, diese können bis zu 500 m (Stackebrandt 2009) in die Tiefe reichen (z. B. Stackebrandt 2010). Dieses identifizierte Gebiet liegt außerhalb der sich gebildeten subglazialen Rinnen (vergl. Keller 2009).

Anhang 5.6.4 Zechstein (Solling Becken)

Das identifizierte Gebiet 197_04IG_S_f_z ist Teil des Zechsteins im Solling Becken und wurde als Teilgebiet 078_04TG_197_04IG_S_f_z ermittelt.

Anhang 5.6.4.1 Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG

Indikator „Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften“:

In Nordhessen an der Grenze zu Niedersachsen befindet sich das Solling-Becken, wobei das Beckeninnere in Niedersachsen liegt. Innerhalb des Solling-Beckens sind Ablagerungen der Staßfurt-, Leine- und Aller-Formation mit Wirtsgesteinspotential bekannt. Die Mächtigkeit der Staßfurt-Formation beträgt etwa 350 m im Beckeninneren in Südniedersachsen und bis zu etwa 150 m im Randbereich des Solling-Beckens in Hessen. Das Leine-Steinsalz erreicht im Beckeninneren ungefähre Mächtigkeiten von 100 m in Niedersachsen und im Randbereich des Beckens etwa 25 m in Hessen. Das Aller-Steinsalz weist im Beckeninneren ungefähr eine Mächtigkeit von 150 m und im Randbereich von 75 m auf (DokID11841779).

Die Steinsalzlager der Leine-Formation besitzen im Vergleich zu denen der Staßfurt-Formation oft höhere Sulfat- und Tonanteile, jedoch keine Kaliflöze. Durch halokinetische Prozesse kam es lokal zur Bildung von Salzkissen (Reinhold et al. 2014).

Die Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen, ihre räumliche Verteilung im Endlagerbereich einschließlich ihrer Eigenschaften sowie die Gesteinsfazies sind im Falle von Sedimentgesteinen bzw. Steinsalz primär von der Morphologie des Sedimentbeckens und den darin vorherrschenden geochemischen Bedingungen, vom Eintrag an terrigenen Sedimenten und von der Tektonik im Becken abhängig.

Indikator „Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich“:

Der für die halokinetischen Prozesse günstige duktile Charakter des Steinsalzes ermöglicht eine Verheilung von Klüften und Verminderung der Porosität, sodass von sehr niedrigen Durchlässigkeitsbeiwerten beim Steinsalz generell auszugehen ist (Wieczorek et al. 2014; Borchert & Muir 1964; Fischbeck & Bornemann 1993; Bornemann et al. 2003).

Aufgrund der synsedimentär-tektonischen und späteren halokinetischen Prozesse variieren die Mächtigkeit und Fazies der salinaren Schichtenfolge. Dabei schwankt die Mächtigkeit der einzelnen Steinsalzlagen, sowie die Wechsellagerung von Steinsalz und Sulfaten sowie terrigenen Einträgen.

Indikator „Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit“:

Da es sich um stratiformes Steinsalz handelt, ist es als weitgehend ungestört anzusehen. Lokal begrenzt können flachwellige Deformationsstrukturen vorkommen. Es wurden nur lokal in stratiformen Salzen verfaltete Intrasalinarstrukturen beobachtet, die häufig auf das Abpuffern von Störungen zurück zu führen sind (Reinhold et al. 2014).

Anhang 5.6.4.2 Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG

Indikator „Zeitspanne, über die sich die Gebirgsdurchlässigkeit nicht wesentlich verändert hat“:

Das Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit und der damit einhergehenden Distanz zu Störungen wird maßgeblich von der paläotektonischen Entwicklung des Ablagerungsbereichs geprägt. Salztektonische Überprägung im Steinsalz in Folge halokinetischer Bewegungen kann mit kleinräumiger Faltung und Auflösung des ursprünglichen salinaren Schichtverbandes von Gesteinskörpern mit unterschiedlichen felsmechanischen und hydraulischen Eigenschaften verbunden sein.

Andererseits können dadurch mächtige Gesteinspakete mit weitgehend einheitlichen Gesteinseigenschaften entstehen. Die Auswirkungen der salztektonischen Überprägung des ursprünglichen Gesteinsverbandes in Salzstrukturen sind differenziert und standortspezifisch zu beurteilen (Alfarra et al. 2020a, S. 154). Des Weiteren kann die genaue räumliche Lage des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, auf welchen sich der Indikator bezieht, im Moment noch nicht ausgewiesen werden. Tektonisch aktive Störungen wurden durch die Anwendung der Ausschlusskriterien ausgeschlossen.

Im Quartär veränderten Gletscher und Schmelzwässer die Morphologie in Norddeutschland. Es kam durch die Entwässerung von Gletschern zur Bildung von subglazialen Rinnen, diese können bis zu 500 m (Stackebrandt 2009) in die Tiefe reichen (z. B. Stackebrandt 2010). Dieses identifizierte Gebiet liegt außerhalb der sich gebildeten subglazialen Rinnen (vergl. Keller 2009).

Anhang 5.6.5 Zechstein (Subherzyn-Mulde und Calvörde-Scholle)

Das identifizierte Gebiet 197_05IG_S_f_z ist Teil des Zechsteins in der Subherzyn-Mulde und Calvörde-Scholle und wurde als Teilgebiet 078_05TG_197_05IG_S_f_z ermittelt.

Anhang 5.6.5.1 Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG

Innerhalb der Subherzyn-Mulde und der Calvörde-Scholle sind mächtige, salinare, stratiforme Steinsalz-Ablagerungen mit Wirtsgesteinspotenzial der Staßfurt- und Leine-Formation bekannt.

Indikator „Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften“:

Der Norden Sachsen-Anhalts (Calvörde-Scholle) kann dem beckenzentralen Teil des Permbeckens zugeordnet werden (Radzinski 2008). Das Staßfurt-Steinsalz (z2NA) ist im Norden Sachsen-Anhalts durch starke Mächtigkeitsunterschiede aufgrund lokaler Bereiche von Halokinese und Auslaugungen gekennzeichnet. Es besteht auf der Calvörde-Scholle aus 150 m bis 300 m mächtigem Steinsalz und wird von 1 m bis 15 m mächtigen Kalisalzlagern überlagert (Stottmeister et al. 2008). In einigen Bereichen sind Änderungen der Mächtigkeit und der Zusammensetzung sowie starke Verfaltungen bekannt (Reinhold et al. 2014). In der Subherzyn-Mulde besteht es aus bis zu 500 m mächtigem Steinsalz. Es wird überlagert von bis zu 70 m mächtigen Kalisalzlagern (z2KST).

Das Staßfurt-Steinsalz, sowohl in der Subherzyn-Mulde als auch auf der Calvörde-Scholle, zeigt im tieferen Abschnitt eine Anhydritregion mit einer einförmigen Ausbildung,

es ist von glasklarer, grauer oder weißgrauer Farbe mit Einlagerungen anhydritischer Lagen, fein verteiltem Ton und Anhydrit. Über der Anhydritregion befindet sich die Polyhalitregion mit feinkristallinen, polyhalitischen Lagen. Darüber ist die Kieseritregion vorhanden, die geprägt ist durch Steinsalz mit dünnen Kieseritlagen (Radzinski 2008).

Leine-Steinsalz: Das Leine-Steinsalz (z3NA) ist in der Subherzyn-Mulde nicht als z3NA vorhanden, sondern setzt sich aus verschiedenen lithostratigraphischen Einheiten zusammen. Insgesamt handelt es sich um eine etwa 150 m mächtige Salzschieht, die sich kumulativ aus bis zu 9 m mächtigem Basissalz (z3LS1, Steinsalz mit Anhydritschnüren), bis zu 40 m mächtigem weißen Liniensalz (z3LS2, Salz mit hoher Reinheit, anhydritisch-polyhalitisch-tonigen Schnüren), bis zu 16 m mächtigem Kristallsalz (z3KS, rein und grobspätig), der zwischen 4 m und 11 m mächtigen Übergangsschicht (z3ÜS), bis zu 10 m mächtigem Bändersalz (z3BD, Steinsalz mit sich häufenden tonig-anhydritischen Lagen), bis zu 30 m mächtigem Anhydritmittelsalz (z3AS, Steinsalz mit Einschaltungen von Anhydrit) und zwischen 10 m bis 50 m mächtigem Tonflockensalz (z3TS, Steinsalz, abschnittsweise durch Tonflocken verunreinigt) zusammensetzt (Radzinski 2008).

Das Leine-Steinsalz (z3NA) ist auf der Calvörde-Scholle ein 145 m mächtiges Steinsalz, welches aus 5 m mächtigem Basissalz (Steinsalz mit Anhydritschnüren), einer 25 m mächtige, Liniensalz (weißes Liniensalz mit hoher Reinheit und anhydritisch-polyhalitisch-tonigen Schnüren), 15 m mächtigem Kalisalzlager Ronnenberg (z. T. sylvinisch, carnallitisch) (Stottmeister et al. 2008), 10 m mächtigem Begleitsalz, etwa 75 m mächtigem Anhydritmittelsalz sowie 15 m mächtigem Tonmittelsalz und Schwadensalz besteht.

Die Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen, ihre räumliche Verteilung im Endlagerbereich einschließlich ihrer Eigenschaften sowie die Gesteinsfazies sind im Falle von Sedimentgesteinen bzw. Steinsalz primär von der Morphologie des Sedimentbeckens und den darin vorherrschenden geochemischen Bedingungen, vom Eintrag an terrigenen Sedimenten und von der Tektonik im Becken abhängig.

Indikator „Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich“:

Der für die halokinetischen Prozesse günstige duktile Charakter des Steinsalzes ermöglicht eine Verheilung von Klüften und Verminderung der Porosität, sodass von sehr niedrigen Durchlässigkeitsbeiwerten beim Steinsalz generell auszugehen ist (Wieczorek et al. 2014; Borchert & Muir 1964; Fischbeck & Bornemann 1993; Bornemann et al. 2003).

Indikator „Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)“:

Aufgrund der synsedimentär-tektonischen und späteren halokinetischen Prozesse variieren die Mächtigkeit und Fazies der salinaren Schichtenfolge. Dabei schwankt die Mächtigkeit der einzelnen Steinsalzlagen, sowie die Wechsellagerung von Steinsalz und Sulfaten sowie terrigenen Einträgen.

Indikator „Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit“:

Da es sich um stratiformes Steinsalz handelt, ist es als weitgehend ungestört anzusehen. Lokal begrenzt können flachwellige Deformationsstrukturen vorkommen. Es wurden nur lokal in stratiformen Salzen verfaltete Intrasalinarstrukturen beobachtet, die häufig auf das Abpuffern von Störungen zurück zu führen sind (Reinhold et al. 2014).

Anhang 5.6.5.2 Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG

Indikator „Langfristige Stabilität der Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“:

Das Staßfurt-Steinsalz (z2NA) ist im Norden Sachsen-Anhalts durch starke Mächtigkeitsunterschiede aufgrund lokaler Bereiche von Halokinese und Auslaugungen gekennzeichnet. In einigen Bereichen sind Änderungen der Mächtigkeit und der Zusammensetzung sowie starke Verfaltungen bekannt (Reinhold et al. 2014). Die halokinetischen Prozesse endeten im Tertiär.

Indikator „Langfristige Stabilität der Gebirgsdurchlässigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“:

Das Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit und der damit einhergehenden Distanz zu Störungen wird maßgeblich von der paläotektonischen Entwicklung des Ablagerungsbereichs geprägt.

Salztektonische Überprägung im Steinsalz in Folge halokinetischer Bewegungen kann mit kleinräumiger Faltung und Auflösung des ursprünglichen salinaren Schichtverbandes von Gesteinskörpern mit unterschiedlichen felsmechanischen und hydraulischen Eigenschaften verbunden sein.

Andererseits können dadurch mächtige Gesteinspakete mit weitgehend einheitlichen Gesteinseigenschaften entstehen. Die Auswirkungen der salztektonischen Überprägung des ursprünglichen Gesteinsverbandes in Salzstrukturen sind differenziert und standortspezifisch zu beurteilen (Alfarra et al. 2020a, S. 154). Des Weiteren kann die genaue räumliche Lage des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, auf welchen sich der Indikator bezieht, im Moment noch nicht ausgewiesen werden.

Tektonisch aktive Störungen wurden durch die Anwendung der Ausschlusskriterien ausgeschlossen.

Im Quartär veränderten Gletscher und Schmelzwässer die Morphologie in Norddeutschland. Es kam durch die Entwässerung von Gletschern zur Bildung von subglazialen Rinnen, diese können bis zu 500 m (Stackebrandt 2009) in die Tiefe reichen (z. B. Stackebrandt 2010). Dieses identifizierte Gebiet liegt außerhalb der sich gebildeten subglazialen Rinnen (vergl. Keller 2009). Aus diesem Grund wird angenommen, dass seit mehr als zehn Millionen Jahren keine wesentlichen Änderungen der Mächtigkeit, der Ausdehnung und der Gebirgsdurchlässigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs aufgetreten sind.

Anhang 5.6.6 Zechstein (Niederrhein-Ems-Gebiet)

Das identifizierte Gebiet 197_06IG_S_f_z ist Teil des Zechsteins im Niederrhein-Ems-Gebiet und wurde als Teilgebiet 078_06TG_197_06IG_S_f_z ermittelt.

Anhang 5.6.6.1 Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG

Innerhalb des Niederrhein-Ems-Gebietes sind mächtige, saline, stratiforme Steinsalz-Ablagerungen mit Wirtsgesteinspotenzial der Werra-Formation bekannt.

Indikatoren „Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich“ und „Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften“:

Das Werra-Steinsalz (z1NA) liegt als bis zu 200 m mächtiges Steinsalz im Niederrhein-Gebiet vor. Im Beckenzentrum (zwischen Winterswijk, Moers, Udem) kommen auch Kalisalze vor (Grabert 1998).

Wie in allen Randbecken des Zechsteinmeeres ist das Niederrhein-Becken durch kleinräumige Graben-Horst-Tektonik gegliedert, die zu Variationen der Teufenlage um z. T. mehrere 100 m führen kann (Fulda 1938; Reinhold et al. 2014). Vor allem bei hohen Mächtigkeiten kommt eine ca. 40 m mächtige Wechsellagerung von Carnallit oder Hart-salz mit Steinsalz vor (Reinhold et al. 2014; Wolf 1985).

Zudem werden im geringem Maße halokinetische Prozesse und Ablaugungen als Ursache für die starken Mächtigkeitsschwankungen angenommen (Reinhold et al. 2014).

Die Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen, ihre räumliche Verteilung im Endlagerbereich einschließlich ihrer Eigenschaften sowie die Gesteinsfazies sind im Falle von Sedimentgesteinen bzw. Steinsalz primär von der Morphologie des Sedimentbeckens und den darin vorherrschenden geochemischen Bedingungen, vom Eintrag an terrigenen Sedimenten und von der Tektonik im Becken abhängig.

Indikator „Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich“:

Der für die halokinetischen Prozesse günstige duktile Charakter des Steinsalzes ermöglicht eine Verheilung von Klüften und Verminderung der Porosität, sodass von sehr niedrigen Durchlässigkeitsbeiwerten beim Steinsalz generell auszugehen ist (Wieczorek et al. 2014; Borchert & Muir 1964; Fischbeck & Bornemann 1993; Bornemann et al. 2003).

Aufgrund der synsedimentär-tektonischen und späteren halokinetischen Prozesse variieren die Mächtigkeit und Fazies der salinaren Schichtenfolge. Dabei schwankt die Mächtigkeit der einzelnen Steinsalzlagen, sowie die Wechsellagerung von Steinsalz und Sulfaten sowie terrigenen Einträgen.

Indikator „Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit“:

Da es sich um stratiformes Steinsalz handelt, ist es als weitgehend ungestört anzusehen. Lokal begrenzt können flachwellige Deformationsstrukturen vorkommen. Es wurden nur lokal in stratiformen Salzen verfaltete Intrasalinarstrukturen beobachtet, die häufig auf das Abpuffern von Störungen zurück zu führen sind (Reinhold et al. 2014).

Anhang 5.6.6.2 Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG

Es werden in geringen Maße halokinetische Prozesse und Ablaugungen als Ursache für die starken Mächtigkeitsschwankungen angenommen (Reinhold et al. 2014).

Indikator „Langfristige Stabilität der Gebirgsdurchlässigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“:

Das Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit und der damit einhergehenden Distanz zu Störungen wird maßgeblich von der paläotektonischen Entwicklung des Ablagerungsbereichs geprägt.

Salztektonische Überprägung im Steinsalz in Folge halokinetischer Bewegungen kann mit kleinräumiger Faltung und Auflösung des ursprünglichen salinaren Schichtverbandes von Gesteinskörpern mit unterschiedlichen felsmechanischen und hydraulischen Eigenschaften verbunden sein.

Andererseits können dadurch mächtige Gesteinspakete mit weitgehend einheitlichen Gesteinseigenschaften entstehen. Die Auswirkungen der salztektonischen Überprägung des ursprünglichen Gesteinsverbandes in Salzstrukturen sind differenziert und standortspezifisch zu beurteilen (Alfarra et al. 2020a, S. 154). Des Weiteren kann die genaue räumliche Lage des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, auf welchen sich der Indikator bezieht, im Moment noch nicht ausgewiesen werden. Tektonisch aktive Störungen wurden durch die Anwendung der Ausschlusskriterien ausgeschlossen.

Im Quartär veränderten Gletscher und Schmelzwässer die Morphologie in Norddeutschland. Es kam durch die Entwässerung von Gletschern zur Bildung von subglazialen Rinnen, diese können bis zu 500 m (Stackebrandt 2009) in die Tiefe reichen (z. B. Stackebrandt 2010).

Dieses identifizierte Gebiet liegt außerhalb der sich gebildeten subglazialen Rinnen (vergl. Keller 2009). Aus diesem Grund wird angenommen, dass seit mehr als zehn Millionen Jahren keine wesentlichen Änderungen der Mächtigkeit, der Ausdehnung und der Gebirgsdurchlässigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereich aufgetreten sind.

Anhang 5.6.7 Zechstein - Identifiziertes Gebiet 7 (Helgoland)

Das identifizierte Gebiet 197_07IG_S_f_z ist Teil des Zechsteins auf Helgoland und wurde als Teilgebiet 078_07TG_197_07IG_S_f_z ermittelt.

Anhang 5.6.7.1 Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG

Indikatoren „Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich“, „Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften“ und „Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)“:

Innerhalb des Westschleswig-Blocks bzw. Helgoland sind mächtige, salinare, stratiforme Steinsalz-Ablagerungen mit Wirtsgesteinspotenzial der Staßfurt-, Leine-, Aller- und Ohre-Formation bekannt.

Die Gesamtmächtigkeit des Zechstein-Schichtpakets liegt in Schleswig-Holstein bei etwa 1500 m (Thomsen & Liebsch-Dörschner 2014), eine detaillierte Auflistung der Mächtigkeiten der verschiedenen Formationen und der darin enthaltenen Steinsalze ist nicht zu finden. Die Staßfurt-Formation besteht aus Karbonat und Anhydrit an der Basis, darüber folgen das Staßfurt-Steinsalz, Kalisalz, Decksteinsalz und Deckanhydrit. Die Steinsalz-Mächtigkeiten können größer 100 m sein.

Die Leine-Formation setzt sich zusammen aus dem Grauen Salzton, Plattendolomit, Hauptanhydrit und dem Leine-Steinsalz.

Die Aller-Formation besteht aus dem Roten Salzton an der Basis, darüber Pegmatitanhydrit und dem Aller-Steinsalz, die Ohre-Formation aus Salzbrockenton, Lagenanhydrit, Ohre-Steinsalz und Grenzanhydrit.

Die Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen, ihre räumliche Verteilung im Endlagerbereich einschließlich ihrer Eigenschaften sowie die Gesteinsfazies sind im Falle von Sedimentgesteinen bzw. Steinsalz primär von der Morphologie des Sedimentbeckens und den darin vorherrschenden geochemischen Bedingungen, vom Eintrag an terrigenen Sedimenten und von der Tektonik im Becken abhängig.

Der für die halokinetischen Prozesse günstige duktile Charakter des Steinsalzes ermöglicht eine Verheilung von Klüften und Verminderung der Porosität, sodass von sehr niedrigen Durchlässigkeitsbeiwerten beim Steinsalz generell auszugehen ist (Wieczorek et al. 2014; Borchert & Muir 1964; Fischbeck & Bornemann 1993; Bornemann et al. 2003).

Aufgrund der synsedimentär-tektonischen und späteren halokinetischen Prozesse variieren die Mächtigkeit und Fazies der salinaren Schichtenfolge. Dabei schwankt die Mächtigkeit der einzelnen Steinsalzlagen, sowie die Wechsellagerung von Steinsalz und Sulfaten sowie terrigenen Einträgen.

Indikator „Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit“:

Da es sich um stratiformes Steinsalz handelt, ist es als weitgehend ungestört anzusehen. Lokal begrenzt können flachwellige Deformationsstrukturen vorkommen. Es wurden nur lokal in stratiformen Salzen verfaltete Intrasalinarstrukturen beobachtet, die häufig auf das Abpuffern von Störungen zurück zu führen sind (Reinhold et al. 2014).

Anhang 5.6.7.2 Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG

Indikator „Langfristige Stabilität der Gebirgsdurchlässigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“:

Das Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit und der damit einhergehenden Distanz zu Störungen wird maßgeblich von der paläotektonischen Entwicklung des Ablagerungsbereichs geprägt.

Salztektonische Überprägung im Steinsalz in Folge halokinetischer Bewegungen kann mit kleinräumiger Faltung und Auflösung des ursprünglichen salinaren Schichtverbandes von Gesteinskörpern mit unterschiedlichen felsmechanischen und hydraulischen Eigenschaften verbunden sein.

Andererseits können dadurch mächtige Gesteinspakete mit weitgehend einheitlichen Gesteinseigenschaften entstehen. Die Auswirkungen der salttektonischen Überprägung des ursprünglichen Gesteinsverbandes in Salzstrukturen sind differenziert und standortspezifisch zu beurteilen (Alfarra et al. 2020a, S. 154). Des Weiteren kann die genaue räumliche Lage des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, auf welchen sich der Indikator bezieht, im Moment noch nicht ausgewiesen werden.

Tektonisch aktive Störungen wurden durch die Anwendung der Ausschlusskriterien ausgeschlossen.

Seit der Oberkreide-Inversion unterliegt das Norddeutsche Becken neotektonischen Senkungsprozessen, die seit dem Tertiär auf das Niedersächsische-Becken einwirken. Diese werden durch die einsetzenden Dehnungsbewegungen als Folge der Alpidischen Orogenese verstärkt und nehmen somit auch Einfluss auf die Diapirbildungsrate (von Goerne et al. 2016). Für das damit verbundene Diapistadium wird ein Ende im Tertiär angenommen. Somit kann davon ausgegangen werden, dass, im Gegensatz zu den Salzstöcken, das stratiforme Salz bisher noch nicht halokinetisch mobilisiert worden ist (Reinhold et al. 2014).

Im Quartär veränderten Gletscher und Schmelzwässer die Morphologie in Norddeutschland. Es kam durch die Entwässerung von Gletschern zur Bildung von subglazialen Rinnen, diese können bis zu 500 m (Stackebrandt 2009) in die Tiefe reichen (z. B. Stackebrandt 2010). Durch die Verbreitung des identifizierten Gebietes ergibt sich eine mögliche Beeinflussung durch subglaziale Rinnen, die für eine Bewertung standortspezifisch untersucht werden muss.

Anhang 5.6.8 Zechstein (Nordöstliches Norddeutsches Becken)

Das identifizierte Gebiet 197_08IG_S_f_z ist Teil des Zechsteins im nordöstlichen Norddeutschen Becken und wurde als Teilgebiet 078_08TG_197_08IG_S_f_z ermittelt.

Anhang 5.6.8.1 Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG

Innerhalb des nordöstlichen Norddeutschen Beckens sind mächtige, saline, stratiforme Steinsalz-Ablagerungen mit Wirtsgesteinspotenzial der Staßfurt-, Leine- und Aller-Formation bekannt.

Indikatoren „Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich“, „Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften“ und „Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)“:

Die Oberfläche des Zechsteins liegt dabei in Tiefen zwischen 800 m und 3000 m, wobei diese in Richtung Südwesten zunehmen. Die Mächtigkeit des Zechsteins schwankt in Mecklenburg-Vorpommern zwischen wenigen hundert bis einigen tausend Metern, wobei sie stark von halokinetischen Bewegungen beeinflusst ist (Zagora & Zagora 2004).

Staßfurt-Steinsalz: Das Untere Staßfurt-Steinsalz (z2NA) ist bis zu 1871,9 m mächtig. Es ist glasklar und weiß und ist fast im gesamten Gebiet Mecklenburg-Vorpommerns vorhanden, wobei es am nördlichen Beckenrand auskeilt. Der Beckenrand verläuft über

die Insel Rügen. In Richtung Beckeninneres nimmt die Mächtigkeit stark zu und kann mehr als 1000 m erreichen (Zagora & Zagora 2004). Das Untere Staßfurt-Steinsalz weist starke Mächtigkeitsunterschiede bis 100 m aufgrund der umfassenden halokinetischen Vorgänge auf. Das Obere Staßfurt-Steinsalz (z2NAr) wird durch das bis zu 197,9 m mächtige Kalilager Staßfurt (z2K) vom Unteren Staßfurt-Steinsalz getrennt.

Leine-Steinsalz: Das Leine-Steinsalz und Kalilager (z3NA-K) erreicht Mächtigkeiten zwischen 8 m und 322 m. Es handelt sich um ein von Anhydrit durchzogenes, milchig weißes bis glasklares Steinsalz, wobei im Beckeninneren Kalisalze vorhanden sind (Zagora & Zagora 2004).

Aller-Steinsalz: Das Aller-Steinsalz (z4NA) ist ein 6,6 m bis 151 m mächtiges Steinsalz, das aus Basis-, Schnee-, Schwaden- und Tonflockensalz besteht. Es kann in becken-zentralen Bereichen Äquivalente des Aller-Kalilagers führen (Zagora & Zagora 2004).

Die Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen, ihre räumliche Verteilung im Endlagerbereich einschließlich ihrer Eigenschaften sowie die Gesteinsfazies sind im Falle von Sedimentgesteinen bzw. Steinsalz primär von der Morphologie des Sedimentbeckens und den darin vorherrschenden geochemischen Bedingungen, vom Eintrag an terrigenen Sedimenten und von der Tektonik im Becken abhängig.

Der für die halokinetischen Prozesse günstige duktile Charakter des Steinsalzes ermöglicht eine Verheilung von Klüften und Verminderung der Porosität, sodass von sehr niedrigen Durchlässigkeitsbeiwerten beim Steinsalz generell auszugehen ist (Wieczorek et al. 2014; Borchert & Muir 1964; Fischbeck & Bornemann 1993; Bornemann et al. 2003).

Indikator „Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit“:

Aufgrund der synsedimentär-tektonischen und späteren halokinetischen Prozesse variieren die Mächtigkeit und Fazies der salinaren Schichtenfolge. Dabei schwankt die Mächtigkeit der einzelnen Steinsalzlagen, sowie die Wechsellagerung von Steinsalz und Sulfaten sowie terrigenen Einträgen.

Da es sich um stratiformes Steinsalz handelt, ist es als weitgehend ungestört anzusehen. Lokal begrenzt können flachwellige Deformationsstrukturen vorkommen. Es wurden nur lokal in stratiformen Salzen verfaltete Intrasalinarstrukturen beobachtet, die häufig auf das Abpuffern von Störungen zurück zu führen sind (Reinhold et al. 2014).

Anhang 5.6.8.2 Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG

Indikator „Langfristige Stabilität der Gebirgsdurchlässigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“:

Das Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit und der damit einhergehenden Distanz zu Störungen wird maßgeblich von der paläotektonischen Entwicklung des Ablagerungsbereichs geprägt.

Salztektonische Überprägung im Steinsalz in Folge halokinetischer Bewegungen kann mit kleinräumiger Faltung und Auflösung des ursprünglichen salinaren Schichtverbandes

von Gesteinskörpern mit unterschiedlichen felsmechanischen und hydraulischen Eigenschaften verbunden sein.

Andererseits können dadurch mächtige Gesteinspakete mit weitgehend einheitlichen Gesteinseigenschaften entstehen. Die Auswirkungen der salztektonischen Überprägung des ursprünglichen Gesteinsverbandes in Salzstrukturen sind differenziert und standortspezifisch zu beurteilen (Alfarra et al. 2020a, S. 154). Des Weiteren kann die genaue räumliche Lage des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, auf welchen sich der Indikator bezieht, im Moment noch nicht ausgewiesen werden.

Tektonisch aktive Störungen wurden durch die Anwendung der Ausschlusskriterien ausgeschlossen.

Seit der Oberkreide-Inversion unterliegt das Norddeutsche Becken neotektonischen Senkungsprozessen, die seit dem Tertiär auf das Niedersächsische-Becken einwirken. Diese werden durch die einsetzenden Dehnungsbewegungen als Folge der Alpidischen Orogenese verstärkt und nehmen somit auch Einfluss auf die Diapirbildungsrate (von Goerne et al. 2016). Für das damit verbundene Diapirstadium wird ein Ende im Tertiär angenommen. Somit kann davon ausgegangen werden, dass, im Gegensatz zu den Salzstöcken, das stratiforme Salz bisher noch nicht halokinetisch mobilisiert worden ist (Reinhold et al. 2014).

Im Quartär veränderten Gletscher und Schmelzwässer die Morphologie in Norddeutschland. Es kam durch die Entwässerung von Gletschern zur Bildung von subglazialen Rinnen, diese können bis zu 500 m (Stackebrandt 2009) in die Tiefe reichen (z. B. Stackebrandt 2010). Durch die Tiefenlage und Verbreitung des identifizierten Gebietes ergibt sich keine mögliche Beeinflussung durch subglaziale Rinnen.

Anhang 6 Ergänzung der Vorgehensweise der Bewertung von identifizierten Gebieten im Oberrheingraben

Dieser Anhang erläutert die Vorgehensweise der Bewertung von identifizierten Gebieten nach den Indikatoren „Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich“, „Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften“, „Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit“ und „Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)“, welche in den folgenden Unterkapiteln als Indikatoren 1 bis 4 der Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG bezeichnet werden. Ebenfalls werden die Vorgehensweisen der Indikatoren „Zeitspanne, über die sich das Betrachtungsmerkmal „Gebirgsdurchlässigkeit“ des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht wesentlich verändert hat“ und „keine Ausprägung struktureller Komplikationen im Deckgebirge, aus denen sich subrosive, hydraulische oder mechanische Beeinträchtigungen für den einschlusswirksamen Gebirgsbereich ergeben könnten“ näher erklärt, diese werden im Folgenden entsprechend als Indikatoren 3 der Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG und Indikatoren 3 der Anlage 11 (zu § 24 Abs. 5) StandAG bezeichnet.

Dieser Anhang dient der Bewertung, inwieweit es geboten erscheint das Grabeninnere des Oberrheingrabens (ORG) basierend auf den bedingt günstigen bis ungünstigen Bewertungen der Indikatoren 1 bis 4 der Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG, der ungünstigen Bewertung des Indikatoren 3 der Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG, sowie der ungünstigen Bewertung des Indikatoren 3 der Anlage 11 (zu § 24 Abs. 5) StandAG des Standortauswahlgesetzes (StandAG) im weiteren Verfahren nicht mehr zu berücksichtigen.

Für den Bereich des Grabeninneren des ORG liegen identifizierte Gebiete vor. Ziel dieser Unterlage ist nicht eine Bewertung der einzelnen IG, sondern vielmehr eine grundsätzliche Bewertung, inwieweit eine pauschale Aussage hinsichtlich der weiteren Berücksichtigung, bzw. Nicht-Berücksichtigung für den gesamten ORG getroffen werden kann.

Anhang 6.1 Gesetzliche Grundlage

Anhang 6.1.1 Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG

Kriterium zur Bewertung der räumlichen Charakterisierbarkeit

Die räumliche Charakterisierung der wesentlichen geologischen Barrieren, die direkt oder indirekt den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle gewährleisten, insbesondere des vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs oder des Einlagerungsbereichs, soll möglichst zuverlässig möglich sein. Bewertungsrelevante Eigenschaften hierfür sind die Ermittelbarkeit der relevanten Gesteinstypen und ihrer Eigenschaften sowie die Übertragbarkeit dieser Eigenschaften (vgl. Tabelle A.52).

Tabelle A. 52: Auszug aus Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG – Kriterium zur Bewertung der räumlichen Charakterisierbarkeit

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße beziehungsweise 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 Endlagerbereich	gering	Deutlich, aber bekannt beziehungsweise zuverlässig erhebbar	Erheblich und/oder nicht zuverlässig erhebbar
	Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich 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 größer als 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 kleiner als 100 m), gefaltet
Übertragbarkeit der Eigenschaften im vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereich	Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)	Fazies regional einheitlich	Fazies nach bekanntem Muster wechselnd	Fazies nach nicht bekanntem Muster wechselnd

Anhang 6.1.2 Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG

Kriterium zur Bewertung der langfristigen Stabilität der günstigen Verhältnisse

Die für die langfristige Stabilität der günstigen Verhältnisse wichtigen sicherheitsgerichteten geologischen Merkmale sollen sich in der Vergangenheit über möglichst lange Zeiträume nicht wesentlich verändert haben. Indikator 3 der Anlage 4 bewertet dabei die Zeitspanne, über die sich das Betrachtungsmerkmal „Gebirgsdurchlässigkeit“ des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht wesentlich verändert hat.

Anhang 6.1.3 Anlage 11 (zu § 24 Abs. 5) StandAG

Kriterium zur Bewertung des Schutzes des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durch das Deckgebirge

Das Deckgebirge soll durch seine Mächtigkeit sowie seinen strukturellen Aufbau und seine Zusammensetzung möglichst langfristig zum Schutz des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs gegen direkte oder indirekte Auswirkungen exogener Vorgänge beitragen. Indikatoren hierfür sind die Überdeckung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs mit grundwasser- und erosionshemmenden Gesteinen und deren Verbreitung und Mächtigkeit im Deckgebirge sowie das Fehlen von strukturellen Komplikationen im Deckgebirge, aus denen sich Beeinträchtigungen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs ergeben können (vgl. Tabelle A.53).

Tabelle A. 53: Auszug aus Anlage 11 (zu § 24 Abs. 5) StandAG – keine Ausprägung struktureller Komplikationen (zum Beispiel Störungen, Scheitelgräben, Karststrukturen) im Deckgebirge, aus denen sich subrosive, hydraulische oder mechanische Beeinträchtigungen für den einschlusswirksamen Gebirgsbereich ergeben könnten

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße beziehungsweise Indikator des Kriteriums	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	ungünstig
Schutz des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durch günstigen Aufbau des Deckgebirges gegen Erosion und Subrosion sowie ihre Folgen (insbesondere Dekompaktion)	keine Ausprägung struktureller Komplikationen (zum Beispiel Störungen, Scheitelgräben, Karststrukturen) im Deckgebirge, aus denen sich subrosive, hydraulische oder mechanische Beeinträchtigungen für den einschlusswirksamen Gebirgsbereich ergeben könnten	Deckgebirge mit ungestörtem Aufbau	strukturelle Komplikationen, aber ohne erkennbare hydraulische Wirksamkeit (zum Beispiel verheilte Klüfte/Störungen)	strukturelle Komplikationen mit potenzieller hydraulischer Wirksamkeit

Anhang 6.2 Zur Genese des Oberrheingrabens

Der Oberrheingraben (ORG) im Südwesten Deutschlands ist eines der weltweit markantesten Grabensysteme. Er ist in seiner Nordnordost-Südsüdwest-Erstreckung ungefähr 300 km lang und durchschnittlich 40 km breit. Insgesamt beträgt der Störungsversatz an den Grabenrändern im Süden des Grabens bis zu 5000 m, übersteigt aber auch im Nordteil noch 4000 m. Der Versatz ist an der östlichen Grabenseite bis zu 1000 m höher als auf der westlichen Grabenseite, wo sich der Graben etwas weniger einsenkte (Meschede 2018). Die Grabenbildung begann im späten Eozän und war durch mehrere Haupttriftphasen im späten Eozän bis frühen Oligozän (Schumacher 2002) und im frühen Miozän (Ziegler 1992) geprägt. Der nördliche ORG weist durchgehende Sedimentation ab dem mittleren/späten Eozän bis ins Miozän auf, während die Hebung des südlichen ORG ab dem späten Oligozän zur Erosion der Syn-Rift Sedimente führte. An den Grabenschultern stehen kristalline Gesteine an (z. B. Vogesen, Schwarzwald, Odenwald). Der in der Anlage 11 (zu § 24 Abs. 5) StandAG verwendete Begriff der „Scheitelgräben“ wird nur selten gebraucht und beschreibt den isostatischen Ausgleich zu einer Aufwölbung, wobei sich im Scheitelbereich eine Grabenstruktur bildet. Typischerweise adressiert der Begriff „Scheitelgraben“ die grabenartige Tektonik auf Salzdiapiren; also induziert durch die Spannungskräfte, die durch den Aufstieg eines Körpers entstehen.

Der ORG stellt ein passives Rift-System dar (siehe Abbildung A.1, unteres Bild). Der im Bereich des Grabens erhöhte Wärmefluss ist nicht an das Auftreten von Plumes geknüpft, wie es bei einem aktiven Rift der Fall wäre. Vielmehr ist der erhöhte Wärmefluss mit dem tektonischen Stressfeld und der Verdünnung der Lithosphäre verbunden, letztere verbunden mit der Hebung der Moho Diskontinuität (Ilies & Fuchs 1974; Schumacher 2002; Grimmer et al. 2017; Freymark et al. 2017).

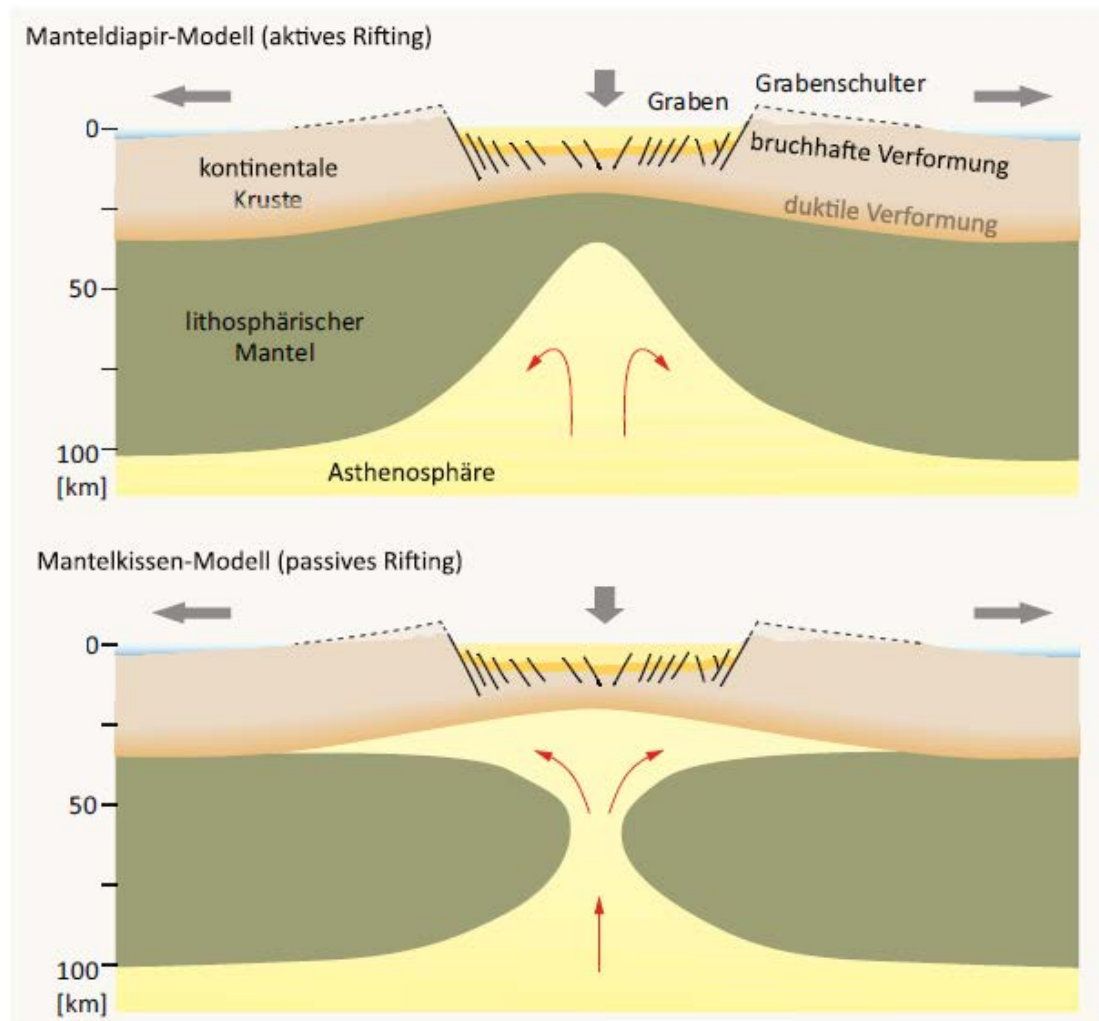


Abbildung A. 1: Auszug aus Anlage 11 (zu § 24 Abs. 5) StandAG – keine Ausprägung struktureller Komplikationen (zum Beispiel Störungen, Scheitelgräben, Karststrukturen) im Deckgebirge, aus denen sich subrosive, hydraulische oder mechanische Beeinträchtigungen für den einschlusswirksamen Gebirgsbereich ergeben könnten

Anhang 6.3 Tektonik des Oberrheingrabens

Der ORG ist Teil des Känozoischen Rift-Systems, welches sich durch West- und Zentraleuropa erstreckt (Ziegler 1992). Der Beginn der Grabenbildung im späten Eozän bis Oligozän ist charakterisiert durch Extension, welche während des Miozäns durch ein Blattverschiebungsregime abgelöst wurde (Reinhold et al. 2016).

Die heutige Geometrie des ORG ist maßgeblich beeinflusst durch kontinuierliche Änderungen des Stressfeldes und die Reaktivierung von prätertiären Diskontinuitäten der Erdkruste (Schwarz & Henk 2005). Das Grabeninnere des ORG ist durch einen komplexen Strukturbaue mit einer Vielzahl tiefreichender Störungszonen charakterisiert. Zahlreiche Erdöl- und Erdgasfelder sind an diese tektonischen Fallenstrukturen gekoppelt.

Abbildung A.2 zeigt die geologische Interpretation zweier West-Ost-Seismikprofile im nördlichen ORG mit den tiefreichenden Grabenrandstörungen und einem komplexen Störungsnetzwerk im Grabeninneren (Lampe 2001; Perner 2018). Explorationsbohrungen wie in sind dabei gewöhnlich in Störungsnähe in sog. Fallenstrukturen für Kohlenwasserstoffe abgeteuft. Es wird deutlich, dass die Beckensedimente im nördlichen ORG von zahlreichen Grundgebirgsstörungen und davon ausgehender Zweigstörungen versetzt werden.

Rezent aktive Störungszonen sind im Allgemeinen große, tiefreichende Grundgebirgsstörungen, die im Zuge der Grabenbildung des ORG bereits mehrfach reaktiviert wurden (Schwarz 2005; Schwarz & Henk 2005; Reinhold et al. 2016). Auch Seismikdaten belegen die Reaktivierung von Störungen im Zuge der Grabenentwicklung. Dabei reorientierten sich Nordnordost-Südsüdwest streichende Abschiebungen während des Miozäns in Nordnordwest-Südsüdost streichende Störungen (Reinhold et al. 2016).

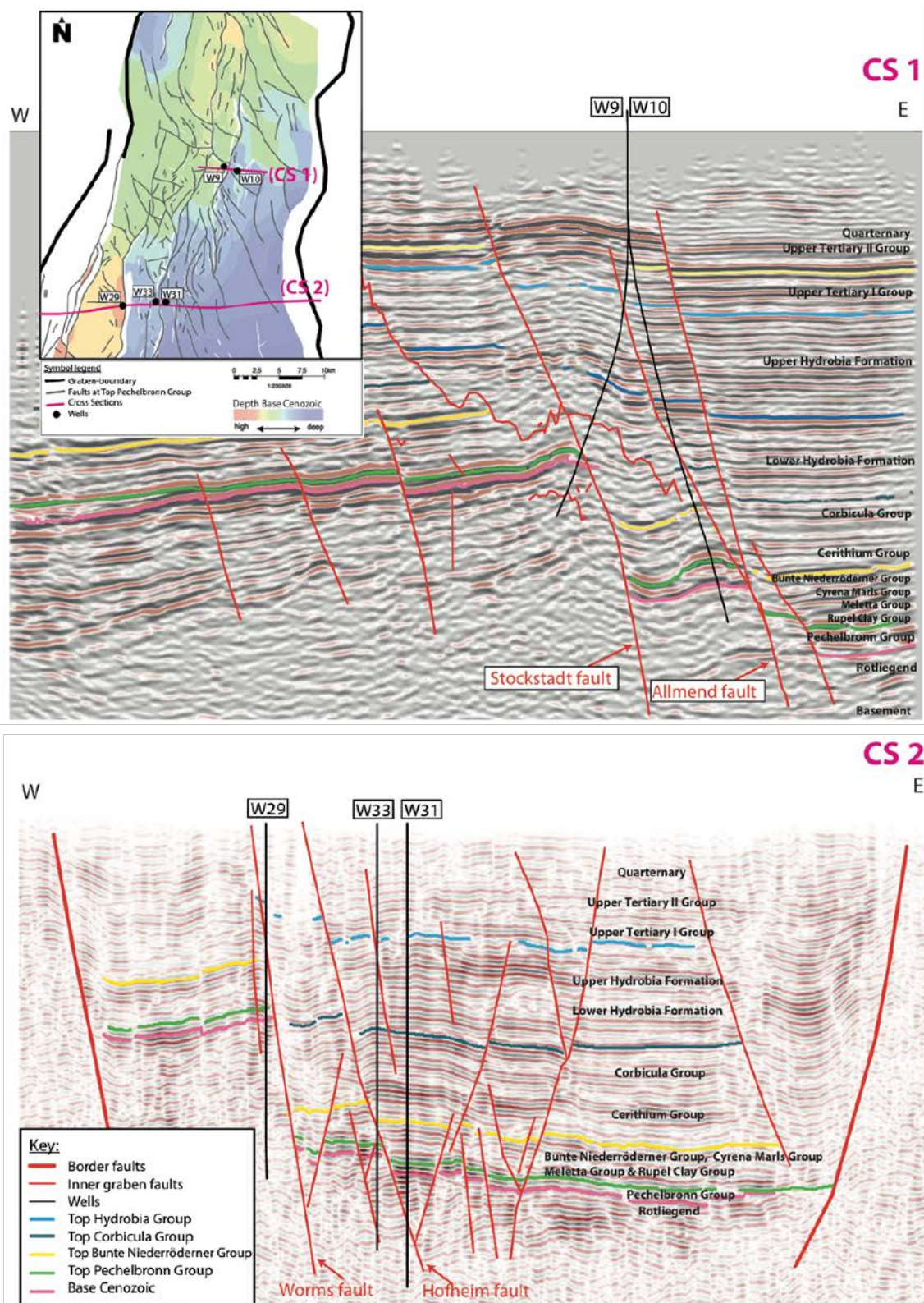


Abbildung A. 2: Interpretierte Seismikprofile durch den nördlichen ORG: CS 1 aus der 3D Seismik (Rhein Petroleum GmbH), CS 2 ist das Profil DEKORP 9N. Die Profile entsprechen unterschiedlichen Maßstäben (Perner 2018).

Wie die Vielzahl an aktiven Störungen belegt, ist der ORG ein Rift-Becken mit erhöhter seismischer Aktivität (Hoppe & Lang 2007). Vor allem der südliche ORG ist durch eine

hohe seismische Aktivität charakterisiert, ein Beispiel dafür war das schwere Erdbeben im Raum Basel im Jahr 1356 (Meghraoui et al. 2001) (vgl. Abbildung A.3Abbildung 4). Jedoch auch im nördlichen und mittleren ORG ist rezente tektonische Aktivität zu verzeichnen, wie zahlreiche Beben von überwiegend geringer Stärke und Intensität zeigen (Hoppe & Lang 2007).

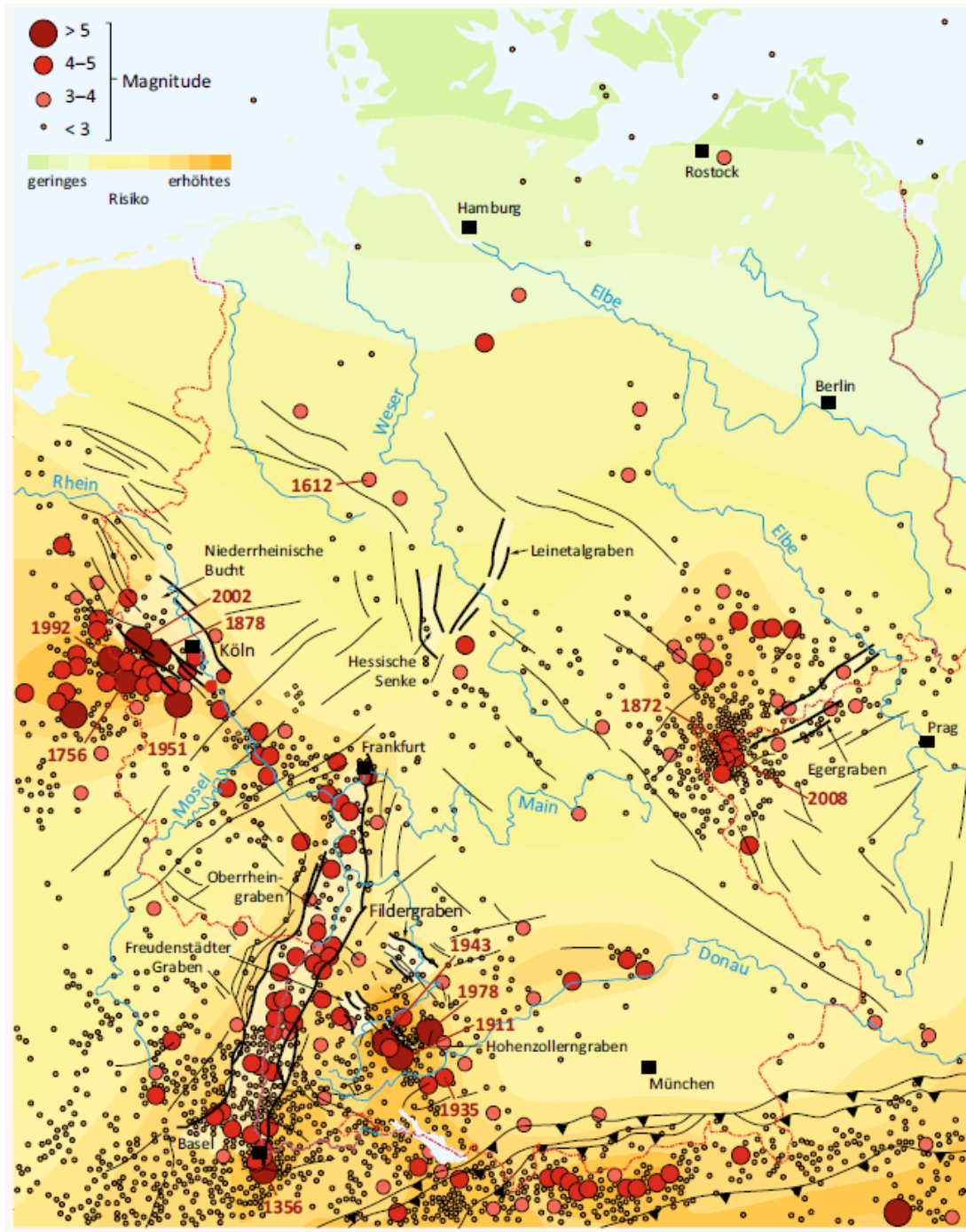


Abbildung A. 3: Aus Meschede (2018): „Vorkommen von Erdbeben in Deutschland und angrenzenden Gebieten mit einer Auswahl von Erdbebenlokationen der letzten 100 Jahre sowie einigen älteren historischen Erdbeben. Die Karte zeigt die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Erdbeben. Das höchste Risiko besteht entlang der jungen Grabenstrukturen, die in der Karte dargestellt sind: Egergraben, Fildergraben, Freudenstädter Graben, Hohenzollerngraben, Leinetalgraben, Niederrheinische Bucht, Oberrheingraben (Verändert nach Grünthal und Wahlström 2003; Leydecker 2011)“.

Anhang 6.4 Bewertung

Anhang 6.4.1 Regionalgeologische Bewertung der Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) StandAG: Kriterium zur Bewertung der räumlichen Charakterisierbarkeit

Anhand der Indikatoren 1 bis 4 der Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3) wird die räumliche Charakterisierbarkeit der wesentlichen geologischen Barrieren, die direkt oder indirekt den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle gewährleisten, bewertet. In Tabelle A.52 sind die wesentlichen bewertungsrelevanten Eigenschaften des Kriteriums und Bewertungsgrößen (Indikatoren), sowie die Differenzierung in Wertungsgruppen dargestellt.

Nach Krull et al. (2004) ist im Gebiet des ORG im Zuge der Grabenbildung aufgrund der lokalen tektonischen Gegebenheiten von einem erhöhten Maß an tektonischer Beanspruchung (Anlage 3 Indikator 3, vgl. Tabelle A.52) und lithologischer Inhomogenität (Anlage 3 Indikator 1, 2, 4, vgl. Tabelle A.52) auszugehen.

Die Autoren weisen in diesem Zusammenhang darauf hin, dass im Bereich des ORG z. T. bereits heute negative Beeinträchtigungen der Barriereintegrität potenzieller toniger Gesteinsformationen zu erwarten sind. Nach Hoth et al. (2007) müssen für Tonformationen des Tertiärs in Hinblick auf die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle zudem tendenziell eher ungünstige Materialeigenschaften vorausgesetzt werden.

Diese, auf den gesamten Grabenbereich skalierte, nicht homogene lithologische Ausbildung der Tonformationen (einschließlich der Landau-Formation) legt nahe, dass nur bedingt ein einschlusswirksamer Gebirgsbereich mit den erforderlichen geringen lithologischen Variationsbreiten über den für Tongestein notwendigen Flächenbedarf von 10 km² im Endlagerbereich identifiziert werden kann. Ferner ist die nötige Flächenausdehnung von 10 km² auch aufgrund der vielen Unterbrechungen durch das dichte Störungsnetzwerk fraglich.

Auch die Halit-führende Schichtenfolge der Wittelsheim-Formation ist durch starke Inhomogenitäten und Wechsellagerungen charakterisiert (Geyer et al. 2011), die keine optimalen lithologischen Verhältnisse für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle vermuten lassen.

Neben inhomogenen lithologischen Voraussetzung muss auch von einem hohen Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheiten ausgegangen werden (Anlage 3 Indikator 3, vgl. Tabelle A.52). Der ORG ist ein Gebiet mit erhöhter seismischer Aktivität von überwiegend geringer Stärke und Intensität. Ein im Zuge der Grabenbildung kontinuierlich wechselndes Stressfeld (Schwarz & Henk 2005) und die Vielzahl an rezent aktiven Störungszonen innerhalb des Grabens deuten auf eine tektonische Spannungssituation im tiefen geologischen Untergrund hin und lassen seismische Aktivität innerhalb der nächsten eine Million Jahre nicht ausschließen.

Auch außerhalb der angewendeten Seismizitätszonen (siehe BGE 2020h) sind vermehrt seismische Beben in den nächsten eine Million Jahre zu erwarten. Diese andauernde seismische Aktivität und nachgewiesene Spannungszustände im Untergrund, geknüpft an ein dichtes Störungsnetzwerk, legen nahe, dass der ORG nicht als Standort für ein Endlager mit der bestmöglichen Sicherheit geeignet ist. Aus Sicht der Endlagerung liegen somit hinsichtlich der tektonischen Verhältnisse und der seismischen Aktivität für die identifizierten Gebiete im Grabeninneren des ORG ungünstige Bedingungen vor.

Anhang 6.4.2 Regionalgeologische Bewertung der Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG: Kriterium zur Bewertung der langfristigen Stabilität der günstigen Verhältnisse

Die mit Indikator 3 der Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3) StandAG bewertete langfristige Stabilität der günstigen Verhältnisse beschreibt die „Zeitspanne, über die sich die Gebirgsdurchlässigkeit nicht wesentlich verändert hat“. Dieser Indikator wurde für die im ORG liegenden IG als ungünstig bewertet, da von einer Änderung der Gebirgsdurchlässigkeit innerhalb der letzten eine Million Jahre im Bereich der IG ausgegangen wird.

In unmittelbarer Nähe von Störungszonen wird durch tektonische Aktivität die vorhandene Gebirgsdurchlässigkeit der Grabensedimente ohnehin stark beeinträchtigt. Zusätzlich zur geomechanischen Zerklüftung des Gesteins führt Fluidzirkulation entlang dieser Störungszonen zur Bildung weiterer Risse und offener Trennflächen und damit zu Fluidwegsamkeiten. Diese Wegsamkeiten führen durch konvektiven Fluidfluss und konduktive thermische Überprägung zu einer negativen Beeinflussung der Stabilität des Gesteinskörpers (Lampe 2001; Wüstefeld et al. 2017).

Der ORG ist durch einen durchgehend hohen geothermischen Gradienten und lokal auftretende starke Wärmeanomalien charakterisiert. Im tiefen Untergrund zirkulierende heiße Tiefenwässer wurden bereits von DoebI & Teichmüller (1979), Clauser (1989) und Clauser & Villingner (1990) beschrieben. Stober & Bucher (2015) werteten eine Vielzahl von Daten aus, die Hinweise auf ein tiefreichendes Strömungsregime innerhalb des Grabens entlang von tiefreichenden Störungen oder durchlässigen Gesteinsformationen geben. Der lokale Aufstieg und die Zirkulation heißer Tiefenwässer entlang aktiver, tiefreichender Grundgebirgsstörungen sind sowohl aus dem nördlichen ORG (Lampe & Person 2000; Al Najem 2016; Schmidt et al. 2017; Perner et al. 2018), als auch aus dem südlichen ORG bekannt (DoebI & Teichmüller 1979; Schellschmidt & Clauser 1996; Timar-Geng et al. 2004). Auch Clauser (1989) wies bereits darauf hin, dass die lokalen,

auffälligen thermischen Anomalien im Rheingraben durch Grundwasserströmung generiert werden.

Diese thermische Überprägung spiegelt sich auch in den Maturationstrends, dem thermischen Reifegrad der Sedimente, wieder, wie Spülprobenanalysen an Kohlenwasserstoffbohrungen im nördlichen ORG belegen (Teichmüller 1979; Perner 2018). Betroffen von der thermischen Überprägung ist besonders der nördliche ORG mit dem ausgewiesenen IG der Landau-Formation. Im Gegensatz zum nördlichen ORG ist der mittlere ORG überwiegend durch subsidenzgesteuerte Maturationstrends charakterisiert (Böcker 2016).

Es muss davon ausgegangen werden, dass die Bewertung der „Gebirgsdurchlässigkeit“ durch jüngste tektonische Prozesse (unter 1 Ma) und die dadurch entstandenen (Fluid-) Wegsamkeiten, insbesondere in Störungsnähe, stark beeinflusst wurde.

Anhang 6.4.3 Regionalgeologische Bewertung der Anlage 11 (zu § 24 Abs. 5) StandAG: Kriterium zur Bewertung des Schutzes des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durch das Deckgebirge

Anlage 11 Indikator 3 (zu § 24 Abs. 5) bewertet die Ausprägung struktureller Komplikationen im Deckgebirge, aus denen sich Beeinträchtigungen für den einschlusswirksamen Gebirgsbereich ergeben können (Tabelle A.53).

Seismische Aktivität und tektonische Überprägung im Bereich des Grabeninneren, insbesondere an den Grabenrandstörungen sind ein Indiz für das Vorliegen struktureller Komplikationen mit potenzieller hydraulischer Wirksamkeit. Rezente seismische Aktivität und nachgewiesene Spannungszustände im Untergrund, geknüpft an ein dichtes Störungsnetzwerk im Untergrund, legen nahe, dass der ORG nicht als Standort für ein Endlager mit der bestmöglichen Sicherheit geeignet ist. Aus Sicht der Endlagerung liegen somit hinsichtlich der tektonischen Verhältnisse und der seismischen Aktivität für die identifizierten Gebiete im Grabeninneren des ORG ungünstige Bedingungen vor.

Auch wenn es nicht möglich ist aufgrund der vorliegenden Datenlage eine abschließende Bewertung vorzunehmen, ob bzw. welche Störungen hydraulisch wirksam sind, so sind die Informationen hinlänglich um – im Sinne der gesetzlichen Formulierung – eine potentielle hydraulische Wirksamkeit anzunehmen.

Anhang 6.5 Fazit

In einer Gesamtbetrachtung ist damit aufgrund tektonischer Überprägung der Grabensedimente (Anlage 3, Indikator 3, StandAG), einer Beeinflussung der Gebirgsdurchlässigkeit (Anlage 4, Indikator 3, StandAG) sowie des Vorliegens struktureller Komplikationen mit potenzieller hydraulischer Wirksamkeit (Anlage 11, Indikator 3, StandAG) das Grabeninnere des ORG mit „ungünstig“ zu bewerten.

7 Literaturverzeichnis

- Ahorner, L. & Sobisch, H.-G. (1988): Ein untertägliches Überwachungssystem im Kalibergwerk Hattorf zur Langzeiterfassung von seismischen Ereignissen im Werra-Kaligebiet. Kali und Steinsalz, Bd. 10, S. 38-49
- Al Najem, S. (2016): Hydrogeochemische Charakterisierung von Grundwässern des Oberrheingrabens zur Identifizierung störungsbedingter Tiefenwasser-Einflüsse. Dissertation, Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, S. 157, Heidelberg. DOI: 10.11588/heidok.00021612
- 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 Opalinuston in der Nordschweiz. Dissertation, Universität Basel, Geologisch-Paläontologisches Institut., S. 185, Basel,
- Althen, G., Rusbült, J. & Seeger, J. (1980): Ergebnisse einer regionalen Neubearbeitung des Muschelkalkes. Zeitschrift für geologische Wissenschaften, Bd. 8, S. 985-999
- AtG: Atomgesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 15. Juli 1985 (BGBl. I S. 1565), das zuletzt durch Artikel 239 der Verordnung vom 19. Juni 2020 (BGBl. I S. 1328) geändert worden ist
- Bachmann, G. H., Ehling, B.-C., Eichner, R. & Schwab, M. (2008): Geologie von Sachsen-Anhalt: mit 54 Tabellen. Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 9783510652402
- Baldschuhn, R., Best, G. & Kockel, F. (1991): Inversion tectonics in the north-west German basin. In: A. M. Spencer (Hrsg.): Generation, accumulation and production of Europe's hydrocarbons. S. 149-159, Oxford: Oxford University Press, USA
- Baldschuhn, R., Frisch, U. & Kockel, F. (1998): Der Salzkeil, ein strukturelles Requisite der saxonischen Tektonik. Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft, Bd. 149, S. 59-69. ISSN 00120189
- Barth, G., Pieńkowski, G., Zimmermann, J., Franz, M. & Kuhlmann, G. (2018): Palaeogeographical evolution of the Lower Jurassic: high-resolution biostratigraphy and sequence stratigraphy in the Central European Basin.

- Geological Society, London, Special Publications, Bd. 469, S. 341-369. ISSN 03058719. DOI: 10.1144/SP469.8
- Bauriegel, A. (2004): Das rezente Subrosionsgeschehen am Salzhang des Werra-Salinars bei Bad Salzungen und dessen Auswirkungen auf die Erdoberfläche. Subrosion und Baugrund in Thüringen. Tagungsband Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie, Bd., S. 79-93
- 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, W. W. (1996): Kalilagerstätten in Deutschland. Kali und Steinsalz, Bd. 12, S. 18-30
- 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. (2020): Grundlagen zur Bewertung eines Endlagers in flach lagernden Salzformationen (S1) - 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
- Best, G., Röhling, H. G. & Bruckner-Röhling, S. (1991): Synsedimentare Tektonik und Salzkissenbildung während der Trias in Norddeutschland. In: H. Hagedorn & A. Seilacher (Hrsg.): Muschelkalk. Schöntaler Symposium, Schöntal an der Jagst, o. D. Stuttgart: Goldschneck. ISBN 9783926129116
- Betz, D., Führer, F., Greiner, G. & Plein, E. (1987): Evolution of the Lower Saxony basin. Tectonophysics, Bd. 137, S. 127-142, 145-146, 149-151, 155-159, 165-170. ISSN 00401951. DOI: 10.1016/0040-1951(87)90319-2
- Beushausen, M., Bebiolka, A., Kloke, R., Kuhlmann, G., Noack, V., Reinhold, K., Röhling, S. & Sönke, J. (2020): Abschlussbericht zum Konzept zur generellen Vorgehensweise zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien - Schritt 2. Hannover: BGR
- Beutler, G. (2004): Trias. In: G. Katzung (Hrsg.): Geologie von Mecklenburg-Vorpommern S. 140-150, Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 3-510-65210-X
- Beutler, G. (2008): Keuper. In: G. H. Bachmann, B.-C. Ehling, R. Eichner & M. Schwab (Hrsg.): Geologie von Sachsen-Anhalt. S. 213-230, Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 9783510652402
- Beutler, G., Hauschke, N., Nitsch, E. & Vath, U. (2005): Stratigraphie von Deutschland IV - Keuper. Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 978-3-510-61376-2
- Beutler, G. & Mönig, E. (2008): Jura. In: G. H. Bachmann, B.-C. Ehling, R. Eichner & M. Schwab (Hrsg.): Geologie von Sachsen-Anhalt. S. 231-243, Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 978-3-510-65240-2

- Beutler, G. & Nitsch, E. (2005): Paläogeographischer Überblick. In: G. Beutler, N. Hauschke, E. Nitsch & U. Vath (Hrsg.): Stratigraphie von Deutschland IV - Keuper. S. 15-30, Frankfurt am Main: Deutsche Stratigraphische Kommission / Cour. Forsch.-Inst. Senckenberg ISBN 978-3-510-61376-2
- Beutler, G. & Szulc, J. (1999): Die paläogeographische Entwicklung des Germanischen Beckens in der Trias und die Verbindung zur Tethys. In: N. Hauschke & V. Wilde (Hrsg.): Trias, eine ganz andere Welt: Mitteleuropa im frühen Erdmittelalter. S. 71-80, München: Pfeil, Friedrich. ISBN 978-3-931516-55-0
- Beutler, G. & Tessin, R. (2005): Der Keuper im Norddeutschen Becken. In: G. Beutler, N. Hauschke, E. Nitsch & U. Vath (Hrsg.): Stratigraphie von Deutschland IV - Keuper. S. 134 - 150, 4, Stuttgart: Courier Forschungsinstitut Senckenberg. ISBN 3-510-61376-7
- Beywl, T., Glander, H., Hessmann, W., Käbel, H., Lange, M., Putscher, S., Schirrmeister, W., Voigt, H.-J. & Zieschang, J. (1974): Höffigkeitseinschätzung UGS – Zechstein und Triassalinare – Stauer und Speicher des Rät bis Unterkreide. Zentrales Geologisches Institut. Berlin, Deutschland
- BGE (2020a): Arbeitshilfe zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien im Rahmen von § 13 StandAG. Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE)
- BGE (2020ae): Zusammenfassung der Onlinediskussion der Anwendungsmethoden. Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
- BGE (2020af): Glossar der BGE zum Standortauswahlverfahren. Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
- BGE (2020ag): Anlage 1A (zum Fachbericht Teilgebiete und Anwendung Geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG). Ergebnisse der Bewertung: Teil A (Teilgebiete). Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
- BGE (2020ah): Anlage 1B (zum Fachbericht Teilgebiete und Anwendung Geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG). Ergebnisse der Bewertung: Teil B (Keine Teilgebiete). Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
- BGE (2020ai): Anlage 2A (zum Fachbericht Teilgebiete und Anwendung Geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG). Literaturreferenzen: Teil A (Teilgebiete). Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
- BGE (2020aj): Anlage 2B (zum Fachbericht Teilgebiete und Anwendung Geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG). Literaturreferenzen: Teil B (Keine Teilgebiete). Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
- BGE (2020ak): Anlage 46A (zum Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG). Datenreferenzen: Teil A (Teilgebiete). Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
- BGE (2020al): Anlage 46B (zum Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG). Datenreferenzen: Teil B (Keine Teilgebiete). Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH

- BGE (2020am): Endlagerkonzepte. Überblick über grundsätzliche Rahmenbedingungen in der ersten Phase des Standortauswahlverfahrens 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)
- BGE (2020d): Methodik zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien. Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH. https://www.bge.de/fileadmin/user_upload/Standortsuche/Wesentliche_Unterlagen/Methodensteckbriefe_fuer_Forum/20200506_Methodik_geoWK_Endfassung.pdf
- BGE (2020g): Zwischenbericht Teilgebiete. Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
- BGE (2020h): Anwendung Ausschlusskriterien gemäß § 22 StandAG. Untersetzende Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete. Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
- BGE (2020i): Datenbericht Ausschlusskriterien gemäß § 22 StandAG. Untersetzende Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete. Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
- BGE (2020j): Anwendung Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG. Untersetzende Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete. Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
- BGE (2020l): Datenbericht Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG. Untersetzende Unterlage zum Zwischenbericht Teilgebiete. Peine: Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
- 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.
- Blasig, W. (1993): Der Kalibergbau an der Werra. In: o. E. (Hrsg.): Salz in Werra und Weser: Ursachen, Folgen, Abhilfe; Ergebnisse einer Fachtagung der ARGE Weser am 22. März 1993 in Kassel, Kassel, Deutschland, 22.03.1993. Bonn: Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau, S. 11-19
- Blumenstengel, H. & Krutzsch, W. (2008): Tertiär. In: G. H. Bachmann, B.-C. Ehling, R. Eichner & M. Schwab (Hrsg.): Geologie von Sachsen-Anhalt: mit 54 Tabellen. S. 267-292, Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 9783510652402
- Böcker, J. J. (2016): Petroleum system and thermal history of the Upper Rhine Graben – Implications from organic geochemical analyses, oil-source rock correlations and numerical modelling. Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, S. 168, Aachen,
- Boigk, H. (1981): Erdöl und Erdölgas in der Bundesrepublik Deutschland - Erdölprovinzen, Felder, Förderung, Vorräte, Lagerstättentechnik. Stuttgart: Enke. ISBN 3-432-91271-4
- Borchert, H. & Muir, R. O. (1964): Salt Deposits: The Origin, Metamorphism and Deformation of Evaporites. London: Van Nostrand

- Bornemann, O., Behlau, J., Keller, S., Mingerzahn, G. & Schramm, M. (2003): Abschlussbericht: Ergebnisse der Erkundung des Salinars - Projekt Gorleben Standortbeschreibung. Archivstück + Sammelmappe. Hannover: BGR
- Brückner-Röhling, S. (1999): Abschlußbericht: Sequenzstratigraphie des Mittleren Muschelkalks in Norddeutschland und der Deutschen Nordsee. Abschlussbericht. Hannover, Halle: BGR [u.a.]
- Brun, J. P., Gutscher, M.-A. & dekorp-ecors teams (1992): Deep crustal structure of the Rhine Graben from DEKORP-ECORS seismic reflection data: A summary. Tectonophysics, Bd. 208, S. 139-147. ISSN 00401951 DOI: 10.1016/0040-1951(92)90340-C
- 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
- Burchardt, I. (1990): Salzer Dislokationszone und Eggersdorfer Keupermulde - Gleitschollen im postsalinaren Deckgebirge der Subherzynen Senke. Zeitschrift für geologische Wissenschaften, Bd. 18, S. 837 - 846
- Busse, E. & Horn, M. (1982): Muschelkalk. In: M. Horn (Hrsg.): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Hessen 1 : 25000- Blatt Nr. 4520 Warburg. S. 55-90, Wiesbaden: Hessisches Landesamt für Bodenforschung
- Clauser, C. (1989): Conductive and Convective Heat Flow Components in the Rheingraben and Implications for the Deep Permeability Distribution. In: A. E. Beck, G. Garven & L. Stegena (Hrsg.): Hydrogeological Regimes and Their Subsurface Thermal Effects. S. 59-64, Washington, USA: American Geophysical Union. DOI: 10.1029/GM047p0059
- Clauser, C. & Villinger, H. (1990): Analysis of conductive and convective heat transfer in a sedimentary basin, demonstrated for the Rheingraben. Geophysical Journal International, Bd. 100, S. 393-414. DOI: 10.1111/j.1365-246X.1990.tb00693.x
- DBE TEC (2016): Gutachten - Flächenbedarf für ein Endlager für wärmeentwickelnde, hoch radioaktive Abfälle. K-MAT 58. DBE Technology GmbH. Peine
- Doehl, F. & Teichmüller, R. (1979): Zur Geologie und heutigen Geothermik im mittleren Oberrheintalgraben. Fortschritte in der Geologie von Rheinland und Westfalen, Bd. 1, S. 1-17
- Doornenbal, H. & Stevenson, A. (Hrsg.) (2010): Petroleum Geological Atlas of the Southern Permian Basin Area: A complete overview of the geological development from Precambrian to Holocene, hydrocarbons exploration and exploitation. Houten: EAGE Publications b. v. ISBN 9789073781610
- Doppler, G., Heissig, K. & Reichenbacher, B. (2005): Die Gliederung des Tertiärs im süddeutschen Molassebecken. Newsletters on Stratigraphy, Bd. 41, S. 359-375. DOI: 10.1127/0078-0421/2005/0041-0359
- Dünkel, H. & Vath, U. (1990): Ein vollständiges Profil des Muschelkalks (Mitteltrias) der Dransfelder Hochfläche, SW Göttingen (Süd-niedersachsen). Geologisches Jahrbuch Hessen, Bd. 118, S. 87-126. ISSN 03414027
- Ehlers, J. (2011): Geologische Karte von Hamburg 1:25 000 - Erläuterungen zu Blatt Nr. 2326 Fuhlsbüttel. Hamburg: Geologisches Landesamt Hamburg. ISBN 978-3-9810981-7-4

- Feist-Burkhardt, S., Götz, A. E., Szulc, J., Borkhataria, R., Geluk, M., Haas, J., Hornung, J., Jordan, P., Kempf, O., Michalík, J., Nawrocki, J., Reinhardt, L., Ricken, W., Röhling, H.-G., Rüffer, T., Török, Á. & Zühlke, R. (2008): Triassic. In: T. McCann (Hrsg.): The Geology of Central Europe. Bd. 2: Mesozoic and Cenozoic, S. 749-821, London: The Geological Society. ISBN 9781862392656
- Feldrappe, H. (2003): F + E Endlagerung - Untersuchung von Tongesteinen als Barriere für die Endlagerung radioaktiver Abfälle am Beispiel des Mittleren Jura (Dogger) von Nordost-Deutschland. Berlin: BGR
- Feldrappe, H. (2006): Regionale Tonstudie: Untersuchungen der Tongesteinsformationen des Mitteljura von Nordwest-Deutschland hinsichtlich ihrer Eignung als Barriere für die Endlagerung radioaktiver Abfälle - F+E Endlagerung. Hannover: BGR
- Filbert, W., Amelung, P. & Biuirun, E. (2004): Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten: Hauptband. (GEIST) Abschlussbericht FKZ 02 E 9511. DBE Technology GmbH. Peine
- Fischbeck, R. & Bornemann, O. (1993): Hinweise auf Stofftransporte im Salzstock Gorleben aufgrund von kleintektonischen Untersuchungen und Brombestimmungen an halitischen Kluffüllungen. Geologisches Jahrbuch, Bd. A 142, S. 233-256
- 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.
https://www.robaha.de/DE/Gemeinsames/Nachrichten/Veranstaltungen/2019/Hauskolloquium_2019_2020/Bilder/2019-11-26_01_g.html;jsessionid=091F6F48EB9FA03D1B87771E42BCD3FA.2_cid321?nn=1545784
- Franke, D. & Stackebrandt, W. (2015): Sedimentäres Rotliegend. In: W. Stackebrandt & D. Franke (Hrsg.): Geologie von Brandenburg. S. 116-132, Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 978-3-510-65295-2
- Franz, M. (2008): Litho- und Leitflächenstratigraphie, Chronostratigraphie, Zyko- und Sequenzstratigraphie des Keupers im östlichen Zentraleuropäischen Becken (Deutschland, Polen) und Dänischen Becken (Dänemrk, Schweden). Dissertation, Martin-Luther Universität Halle-Wittenberg, Institut für geowissenschaften, S. 198, Halle, 8-12-2008
- Franz, M. & Nitsch, E. (2009): Zur lithostratigraphischen Gliederung des Aalenium in Baden-Württemberg. LGRB-Informationen, Bd. 22, S. 123-146
- Freudenberger, W. & Schwerd, K. (1996): Erläuterungen zur geologischen Karte von Bayern 1:500.000. 4. neubearbeitete. Aufl. Bayerisches Geologisches Landesamt. München
- Freymark, J., Sippel, J., Scheck-Wenderoth, M., Bär, K., Stiller, M., Fritsche, J.-G. & Kracht, M. (2017): The deep thermal field of the Upper Rhine Graben. Tectonophysics, Bd. 694, S. 114-129. DOI: 10.1016/j.tecto.2016.11.013
- Frisch, U. & Kockel, F. (2004): Der Bremen-Knoten im Strukturnetz Nordwest-Deutschlands: Stratigraphie, Paläogeographie, Strukturgeologie. Berichte aus dem Fachbereich Geowissenschaften der Universität Bremen. Fachbereich Geowiss., Univ. Bremen. ISBN 0931-0800

- Fulda, E. (1938): Die Lagerstätten der nutzbaren Mineralien und Gesteine : nach Form, Inhalt und Entstehung - Teil 2: Steinsalz und Kalisalze. 3. Aufl., Stuttgart, Deutschland: Ferdinand Enke Verlag
- Garetsky, R. G., Aizberg, R. Y., Karabanov, A. K., Kockel, F., Ludwig, A. O., Lykke-Andersen, H., Ostaficzuk, S., Sim, L. S., Sliupa, A. & Stackebrandt, W. (2001): The neogeodynamics of the Baltic Sea depression and adjacent areas - some conclusion from the IGCP-Projekt 346: Neogeodynamica Baltica. Brandenburgische Geowissenschaftliche Beiträge, Bd. 8, S. 43-47
- Gärtner, H. & Röbling, H.-G. (1993): Zur lithostratigraphischen Gliederung und Paläogeographie des Mittleren Muschelkalks im Nordwestdeutschen Becken. In: H. Hagdorn & A. Seilacher (Hrsg.): Muschelkalk. S. 443-456, Stuttgart: Edition Goldschneck im Quelle & Meyer Verlag. ISBN 3-926129-11-5
- Gaßner, H. & Buchholz, G. (2019): Standortauswahl: Zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien, Teil 1 - Handreichung im Auftrag der BGE mbH. [Gaßner, Groth, Siederer & Coll.] Partnerschaft von Rechtsanwälten mbB. Berlin
- Gast, S. & Röbling, H.-G. (2012): Lithostratigraphische Gliederung des Muschelkalks in der Bohrung Groß Buchholz-Gt1 (GeneSys-Projekt Hannover) anhand geophysikalischer Bohrlochmessungen. In: GeoHannover2012 – GeoRohstoffe für das 21. Jahrhundert, Hannover, Deutschland, 1.-3 Oktober 2012. RWE, S. 519
- Geyer, M., Nitsch, E. & Simon, T. (Hrsg.) (2011): Geologie von Baden-Württemberg. 5. Aufl. Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 9783510652679
- Geyer, O. F. & Gwinner, M. P. (2011): Geologie von Baden-Württemberg. 5. Aufl.: E. Schweizerbart. ISBN 9783510652679
- Grabert, H. (1998): Abriß der Geologie von Nordrhein-Westfalen: mit 11 Tabellen. Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 3510651871
- Gramann, F., Heunisch, C., Klassen, H. W., Kockel, F., Dulce, G., Harms, F.-J., Katschorek, T., Mönning, E., Schudack, M. E., Schudack, U., Thies, D., Weiss, M. & Hinze, C. (1997): Das Niedersächsische Oberjura-Becken -- Ergebnisse interdisziplinärer Zusammenarbeit. Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft, Bd. 148, S. 165-236
- Grimm, K., Grimm, M. C., Radtke, G., Kadolsky, D., Schäfer, P., Franzen, J. L., Schindler, T. & Hottenrott, M. (2011a): Mainzer Becken. In: K. I. Grimm (Hrsg.): Stratigraphie von Deutschland IX - Tertiär, Teil 1: Oberrheingraben und benachbarte Tertiärgebiete (Schriftenreihe der deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften Bd. 75) S. 133-209, Hannover: Deutsche Stratigraphische Kommission. ISBN 978-3-510-49223-7. DOI: 10.1127/sdgg/75/2011/133
- Grimm, M. C., Wielandt-Schuster, U., Hottenrott, M., Radtke, G., Berger, J.-P., Ellwanger, D., Harms, F.-J., Hoselmann, C. P. & Weidenfeller, M. (2011b): Oberrheingraben. In: K. I. Grimm (Hrsg.): Stratigraphie von Deutschland IX - Tertiär, Teil 1: Oberrheingraben und benachbarte Tertiärgebiete (Schriftenreihe der deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften Bd. 75) S. 57-132, Hannover: Deutsche Stratigraphische Kommission. ISBN 978-3-510-49223-7. DOI: 10.1127/sdgg/75/2011/57
- Grimmer, J. C., Ritter, J. R. R., Eisbacher, G. H. & Fielitz, W. (2017): The Late Variscan control on the location and asymmetry of the Upper Rhine Graben. International

- Journal of Earth Sciences, Bd. 106, S. 827-853. DOI: 10.1007/s00531-016-1336-x
- Grünthal, G. & Wahlström, R. (2003): An M_w based earthquake Catalogue for central, northern and northwestern Europe using a hierarchy of magnitude conversions. *Journal of Seismology*, Bd. 7, S. 507-531
- Gürs, K. (2006): Das Tertiär Nordwestdeutschlands in der Stratigraphischen Tabelle von Deutschland 2002. *Newsletters on Stratigraphy*, Bd. 41, S. 313-322. ISSN 0078-0421. DOI: 10.1127/0078-0421/2005/0041-0313
- Gürs, K., Wesselingh, F. & Standke, G. (2008): North Sea Basin: Paleogene. In: T. McCann (Hrsg.): *The Geology of Central Europe Volume 2: Mesozoic and Cenozoic – Paleogene and Neogene*. S. 1036-1040: Geological Society of London. ISBN 9781862392656. DOI: 10.1144/cev2p
- Hable, R., Kaufhold, H., Liebsch-Dörschner, T. & Thomsen, C. (2011): Endbericht Speicher-Kataster Deutschland für die Bundesländer Hamburg und Schleswig-Holstein. o. O.: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)
- Hagdorn, H., Menning, M., Nitsch, E. & Simon, T. (2019): Die Muschelkalk-Gruppe in der Stratigraphischen Tabelle von Deutschland 2016 (STD 2016). *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften*, Bd. 168, S. 20. DOI: 10.1127/zdgg/2019/0197
- Haq, B., Hardenbol, J. A. N. & Vail, P. (1988): Mesozoic and Cenozoic Chronostratigraphy and Cycles of Sea-Level Change. In: C. K. Wilgus, B. S. Hastings, C. G. S. C. Kendall, C. A. Ross & J. C. Van Wagoner (Hrsg.): *Sea-Level Changes: An Integrated Approach*. Bd. 42, S. 7-108, Tulsa, Oklahoma, USA: SEPM Special Publication. DOI: 10.2110/pec.88.01.0071
- Hauber, L. (1993): Der Mittlere Muschelkalk am Hochrhein. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie. Abhandlungen*, Bd. 189, S. 147-170. ISSN 0077-7749
- Henke, K. F. & Hiller, M. (1985): Veränderung bodenmechanischer Parameter bei überkonsolidierten Peliten durch Verwitterung — Versuch einer Deutung anhand des Opalinustones. In: K. Heitfeld (Hrsg.): *Ingenieurgeologische Probleme im Grenzbereich zwischen Locker- und Festgesteinen*. S. 83-96, Berlin, Heidelberg: Springer. ISBN 978-3-540-15366-5. DOI: 10.1007/978-3-642-70452-9_6.
- Herrmann, R. & Kunz, R. (1999): Stratigraphie und Fazies der Salinar-Folge (Münder Mergel/Ober-Malm) der SE- und SW-Hilsmulde/S-Niedersachsen. *Philippia*, Bd. 9, S. 103-114. ISSN 03437620
- Hinsch, W. (1974): Das Tertiär im Untergrund von Schleswig-Holstein (Das Nordwestdeutsche Tertiärbecken, Beitrag N.5). *Geologisches Jahrbuch*, Bd. Reihe A, Heft 24, S. 34. ISSN 9783510964697
- Hiß, M. (2018): Emscher-Formation - Record Nr. 2008007. [Litholex Online-Datenbank]. Hannover: BGR. Letzte Aktualisierung am: 25.09.2018. Zugriff am: 27.08.2020. <https://litholex.bgr.de/pages/Einheit.aspx?ID=2008007>
- Hiß, M. & Mutterlose, J. (2000): Stratigraphie von Deutschland III. Die Kreide der Bundesrepublik Deutschland, Frankfurt am Main: Courier Forschungsinstitut Senckenberg. ISBN 9783510610471
- Hiß, M., Niebuhr, B. & Teipel, U. (2018): Die Kreide in der Stratigraphischen Tabelle von Deutschland 2016 / The Cretaceous System in the Stratigraphic Table of Germany 2016. *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften*, Bd. 169, S. 247-266. DOI: 10.1127/zdgg/2018/0149

- Hiß, M. & Schönfeld, J. (2000): Regionale Verbreitung und Faziesräume der Kreide in der Bundesrepublik. In: M. Hiss & J. Mutterlose (Hrsg.): Stratigraphie von Deutschland III - Die Kreide der Bundesrepublik Deutschland., S. 3-6, Frankfurt am Main: Deutsche Stratigraphische Kommission - Courier Forsch.-Inst. Senckenberg. ISBN 978-3-510-61047-1
- Hiß, M. & Seibertz, E. (2000): Westfalen, Münsterland. In: M. Hiss & J. Mutterlose (Hrsg.): Stratigraphie von Deutschland III - Die Kreide der Bundesrepublik Deutschland., S. 132-138, Frankfurt am Main: Deutsche Stratigraphische Kommission - Courier Forsch.-Inst. Senckenberg. ISBN 978-3-510-61047-1
- Hönemann, G., Küstermann, W. & Meyer, W. (1995): Reflexionsseismische Kartierung von Tiegflagen der Pleistozänbasis in Nordostdeutschland. Zeitschrift für geologische Wissenschaften, Bd. 3, S. 261-275
- Hoppe, A. & Lang, S. (2007): The eastern master fault of the Upper Rhine Graben below the Science and Conference Centre in Darmstadt (Germany). Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, Bd. 158, S. 113-117. DOI: 10.1127/1860-1804/2007/0158-0113
- Hoppe, W. (1960): Die Kali- und Steinsalzlagerstätten des Zechsteins in der Deutschen Demokratischen Republik - Teil 1: Das Werra-Gebiet. Freiburger Forschungshefte C97, Berlin, Germany: Akademie-Verlag
- Hoth, K. & Schretzenmayr, S. (1993): Die tiefen Bohrungen im Zentralabschnitt der Mitteleuropäischen Senke: Dokumentation für den Zeitabschnitt 1962-1990; mit zwei Tabellen. Schriftenreihe für Geowissenschaften, Berlin: Verl. der Ges. für Geologische Wiss.
- 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)
- Ilies, J. H. & Fuchs, K. (Hrsg.) (1974): Approaches to Taphrogenesis - Proceedings of an International Rift Symposium held in Karlsruhe April 13-15, 1972. Stuttgart, Germany: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung. ISBN 9783510650620
- Janssen, R., Doppler, G., Grimm, K., Grimm, M., Haas, U., Hiß, M., Köthe, A., Radtke, G., Reichenbacher, B., Salamon, M., Standke, G., Teipel, U., Thomas, M., Uffenorde, H., Wielandt-Schuster, U. & Subkommission Tertiär-Stratigraphie (2018): The Tertiary in the Stratigraphic Table of Germany 2016 (STG 2016). Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, Bd. 169, S. 267-294. DOI: 10.1127/zdgg/2018/0152
- Jaritz, W., Kockel, F., Stackelberg, V., Stets, J. & Stoppel, D. (1969): "Wealden", Fazies und Mächtigkeiten. In: W. Schott (Hrsg.): Paläogeographischer Atlas der Unterkreide von Nordwestdeutschland mit einer Übersichtsdarstellung des nördlichen Mitteleuropa., S. 315, Stuttgart: Bundesanstalt für Bodenforschung
- Käding, K.-C. (1975): Zechstein. In: M. Laemmlen (Hrsg.): Erläuterungen zur Geologischen Karte 1:25000 Blatt Nr. 5225 Geisa. 2. Aufl., S. 30-44, Wiesbaden: Hessisches Landesamt für Bodenforschung
- Käding, K.-C. (2005): Der Zechstein in der Stratigraphischen Tabelle von Deutschland 2002. Newsletters on Stratigraphy, Bd. 41, S. 123-127. DOI: 10.1127/0078-0421/2005/0041-0123
- Kästner, H. (1996): Zur Ausbildung des Zechsteins, insbesondere des Kaliflözes Staßfurt, am SE-Rand der Thüringischen Senke. In: H. Gesang (Hrsg.):

- Gedenkschrift zum 100. Geburtstag von Walter Hoppe. S. 57-84, Weimar, Deutschland: Thüringer Landesanstalt für Geologie
- Katzung, G. (2004): Geologie von Mecklenburg-Vorpommern : mit 50 Tabellen. 1. Aufl., Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 351065210x
- Keller, S. (2009): Eiszeitliche Rinnensysteme und ihre Bedeutung für die Langzeitsicherheit möglicher Endlagerstandorte mit hochradioaktiven Abfällen in Norddeutschland. Hannover: BGR. ISBN 9783981337334
- Kockel, F., Jaritz, W., Stets, J. & Stoppel, D. (1969): Allgemeiner Überblick. In: W. Schott (Hrsg.): Paläogeographischer Atlas der Unterkreide von Nordwestdeutschland mit einer Übersichtsdarstellung des nördlichen Mitteleuropa. S. 315, Stuttgart: Bundesanstalt für Bodenforschung
- 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
- Krull, P., Hoth, P., Bräuer, V. & Wirth, H. (2004): Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland - Untersuchungswürdige Regionen mit potentiellen Wirtsgesteinsformationen: Zwischenbericht. Berlin / Hannover: BGR
- Kuhlemann, J. & Kempf, O. (2002): Post-Eocene evolution of the North Alpine Foreland Basin and its response to Alpine tectonics. *Sedimentary Geology*, Bd. 152, S. 45-78. ISSN 0037-0738. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(01\)00285-8](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(01)00285-8)
- Kupfahl, H.-G. (1965): Erläuterung zur Geologischen Karte von Hessen 1:25000. Blatt 5323 Schlitz. Hessisches Landesamt für Bodenforschung. Wiesbaden
- Lampe, C. (2001): The effects of hydrothermal fluid flow on the temperature history of the northern Upper Rhinegraben - numerical simulation studies. . Dissertation, Universität zu Köln, Köln,
- Lampe, C. & Person, M. (2000): Episodic hydrothermal fluid flow in the Upper Rhinegraben (Germany). *Journal of Geochemical Exploration*, Bd. 69-70, S. 37-40
- Landesamt für Geologie Rohstoffe und Bergbau (2016): Symbolschlüssel Geologie Baden-Württemberg - Verzeichnis Geologischer Einheiten (aktualisierte Ausgabe 2016). Freiburg: Hrsg. vom Regierungspräsidium Freiburg
- Langbein, R. & Seidel, G. (2003): Zechstein. In: G. Seidel (Hrsg.): Geologie von Thüringen. S. 301-325, Stuttgart, Deutschland: Schweizerbart. ISBN 9783510652051
- Lehné, R. J. & Sirocko, F. (2010): Recent vertical crustal movements and resulting surface deformation within the North German Basin (Schleswig-Holstein) derived by GIS-based analysis of repeated precise leveling data [GIS-basierte Auswertung von Nivellementdaten zur Beschreibung und Quantifizierung rezenter vertikaler Krustenbewegungen und daraus resultierender Oberflächen deformationen im Bereich des Norddeutschen Beckens (Schleswig-Holstein)]. *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften*, Bd. 161, S. 175-188. ISSN 18601804
- Lepper, J., Rambow, D. & Röhling, H.-G. (2013): Lithostratigraphie des Buntsandstein in Deutschland. In: J. Lepper & H.-G. Röhling (Hrsg.): Stratigraphie von Deutschland XI. Buntsandstein. Bd. 69, S. 69-149, Stuttgart: Schweizerbart Science Publishers. ISBN 978-3-510-49229-9

- Leydecker, G. (2011): Erdbebenkatalog für Deutschland mit Randgebieten für die Jahre 800 bis 2008. Stuttgart, Deutschland: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung
- 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
- Mayrhofer, H. (1967): Zechstein. In: M. Laemmlen (Hrsg.): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Hessen 1:25000 Blatt Nr: 5124 Bad Hersfeld. S. 28-33, Wiesbaden: Hessisches Landesamt für Bodenforschung
- Maystrenko, Y., Bayer, U. & Scheck-Wenderoth, M. (2006): 3D reconstruction of salt movements within the deepest post-Permian structure of the Central European Basin System - the Glueckstadt Graben. Netherlands Journal of Geosciences - Geologie en Mijnbouw, Bd. 85, S. 181-196. ISSN 0016-7746. DOI: 10.1017/S0016774600021466
- Meghraoui, M., Delouis, B., Ferry, M. A. & Giardini, D. (2001): Active normal faulting in the upper Rhine graben and paleoseismic identification of the 1356 Basel earthquake. Science, Bd. 293, S. 2070-2073. DOI: 10.1126/science.101061866
- Merklein-Lempp, I. (1985): Ursachen und Mechanismen des Trocknungs-Befeuchtungs-Zerfalls überkonsolidierter Pelite. In: K.-H. Heitfeld (Hrsg.): Ingenieurgeologische Probleme im Grenzbereich zwischen Locker- und Festgesteinen. S. 59-74, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-642-70452-9. DOI: 10.1007/978-3-642-70452-9_4
- Meschede, M. (2018): Geologie Deutschlands: Ein prozessorientierter Ansatz. 2. Aufl., Berlin: Springer Spektrum. ISBN 9783662564226
- 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
- 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. (2020): 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, E. (2008): Northern Germany. In: G. Pieńkowski & M. E. Schudack (Hrsg.): Jurassic. Bd. 2, S. 823-922, London: Geological Society of London. ISBN 9781862392656. DOI: 10.1144/cev2p.2
- Mönig, E., Franz, M. & Schweigert, G. (2018): The Stratigraphic Chart of Germany (STD 2016): Jurassic. Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, Bd. 169, S. 225-246. DOI: 10.1127/zdgg/2018/0148

- Musstow, R. (1976a): Oberkreide: Cenoman bis Maastricht. 1:500000. Berlin: Zentrales Geologisches Institut. Lithologisch-paläogeographische Karte der DDR
- Musstow, R. (1976b): Oberkreide: Coniac und Santon. 1:500000. Berlin: Zentrales Geologisches Institut. Lithologisch-paläogeographische Karte der DDR
- Musstow, R. (1976c): Oberkreide: Turon. 1:500000. Berlin: Zentrales Geologisches Institut. Lithologisch-paläogeographische Karte der DDR
- Nagra (2002): 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). Wetingen, Switzerland. ISBN 1015-2636
- Nitsch, E. (2005): Der Keuper in der Stratigraphischen Tabelle von Deutschland 2002: Formationen und Folgen. Newsletters on Stratigraphy, Bd. 41, S. 159-171. DOI: 10.1127/0078-0421/2005/0041-0159
- Paul, J., Wemmer, K. & Ahrendt, H. (2008): Provenance of siliciclastic sediments (Permian to Jurassic) in the Central European Basin [Herkunftsgebiete siliziklastischer Gesteine (Perm bis Jura) des Germanischen Beckens]. Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften, Bd. 159, S. 641-650. ISSN 18601804. DOI: 10.1127/1860-1804/2008/0159-0641
- Perner, M. (2018): Evolution of Palaeoenvironment, Kerogen Composition and Thermal History in the Cenozoic of the Northern Upper Rhine Graben, SW-Germany. Dissertation, Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg, S. 222, Heidelberg,
- Perner, M., Jäger, H., Reinhold, C. & Bechstädt, T. (2018): Impact of rift dynamics on palaeoenvironment conditions and hydrocarbon system development (northern Upper Rhine Graben, SW-Germany). Petroleum Geoscience, Bd. 24, S. 425-439. DOI: 10.1144/petgeo2016-148
- Petzka, M., Rusbült, J. & Reich, M. (2004): Jura. In: G. Katzung (Hrsg.): Geologie von Mecklenburg-Vorpommern. S. 151-162, Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 9783510652105
- Pohl, W. (2005): Mineralische und Energie-Rohstoffe: Eine Einführung zur Entstehung und Nachhaltigen Nutzung von Lagerstätten. 5. Aufl., o. O.: Schweizerbart. ISBN 9783510652129
- Pollok, L., Hölzner, M. & Fleig, S. (2016): AP 2 – Erfassung des Internbaus von Salzstrukturen und geologische 3D-Modellierung. In: Informationssystem Salzstrukturen: Planungsgrundlagen, Auswahlkriterien und Potentialabschätzung für die Errichtung von Salzkavernen zur Speicherung von Erneuerbaren Energien (Wasserstoff und Druckluft). Sachbericht 03ESP323B. Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)
- Radzinski, K. H. (2008): Buntsandstein. In: G. H. Bachmann, B.-C. Ehling, R. Eichner & M. Schwab (Hrsg.): Geologie von Sachsen-Anhalt. S. 180-200, Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 978-3-510-65240-2
- Reich, M. (2000): Oberkreide. In: M. Hiß & M. J. (Hrsg.): Stratigraphie von Deutschland III, Die Kreide der Bundesrepublik Deutschland., S. 119-123, Frankfurt a.M.: Deutsche Stratigraphische Kommission - Courier Forsch.-Inst. Senckenberg. ISBN 978-3-510-61047-1
- 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, C., Schwarz, M., Bruss, D., Heesbeen, B., Perner, M. & Suana, M. (2016): The northern upper Rhine Graben - Re-dawn of a mature petroleum province? Swiss Bulletin, Bd. 21, S. 35-56. DOI: 10.5169/seals-658196
- Reinhold, K., Hammer, J. & Pusch, M. (2014): Verbreitung, Zusammensetzung und geologische Lagerungsverhältnisse flach lagernder Steinsalzfolgen in Deutschland: Zwischenbericht. Hannover: BGR
- Reinhold, K., Müller, C. & Riesenberger, C. (2011): Informationssystem Speichergesteine für den Standort Deutschland: Synthese. In: C. Müller & K. Reinhold (Hrsg.): Informationssystem Speichergesteine für den Standort Deutschland: eine Grundlage zur klimafreundlichen geotechnischen und energetischen Nutzung des tieferen Untergrundes (Speicher-Kataster Deutschland); Abschlussbericht; FZK 0327765. S. Seite 1 - 133 + 1 CD-ROM, Berlin: Bundesanst. f. Geowiss. u. Rohstoffe
- Röhling, H.-G. (1991): A lithostratigraphic subdivision of the Lower Triassic in the Northwest German Lowlands and the German sector of the North Sea, based on gamma-ray and sonic logs. Geologisches Jahrbuch. Reihe A: Allgemeine und regionale Geologie BR Deutschland und Nachbargebiete, Bd. 119, S. Seite 3 - 24. ISSN 978-3-510-96377-5
- Röhling, H.-G. (2015): Buntsandstein. In: W. Stackebrandt & D. Franke (Hrsg.): Geologie von Brandenburg. S. 147-178, Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 978-3-510-65295-2
- Röhling, H.-G., Lepper, J., Diehl, M., Dittrich, D., Freudenberger, W., Friedlein, V., Hug-Diegel, N. & Nitsch, E. (2018): Der Buntsandstein in der Stratigraphischen Tabelle von Deutschland 2016. Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften: ZDGG, Bd. 169, S. Seite 151-180. DOI: <https://doi.org/10.1127/zdgg/2018/0132>
- Röhling, S. (2002): Der Mittlere Muschelkalk in Bohrungen Norddeutschlands: Fazies, Geochemie, Zylo- und Sequenzstratigraphie. Dissertation, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Mathematisch-Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät, S. 199, Halle-Saale, 05.07.2002
- Roth, H. (1967): Zechstein. In: R. Motzka & M. Laemmlen (Hrsg.): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Hessen 1:25000, Blatt Nr. 5224 - Eiterfeld. S. 17-19, Wiesbaden, Deutschland: Hessisches Landesamt für Bodenforschung
- Roth, H. & Laemmlen, M. (1970): Zechstein. In: M. Laemmlen (Hrsg.): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Hessen 1:25000, Blatt Nr. 5523 - Neuhof. S. 21-31, Wiesbaden, Deutschland: Hessisches Landesamt für Bodenforschung
- Rübel, A., Buhmann, D., Meleshyn, A., Moenig, J. & Spiessl, S. (2013): Aspects on the gas generation and migration in repositories for high level waste in salt formations. GRS- 303. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH. Germany. ISBN 9783939355823
- 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
- Schad, A. (1947): Neue stratigraphische Ergebnisse im nordwestdeutschen Tertiär. Berichte der Naturhistorischen Gesellschaft Hannover 1900-1947. Hannover

- Scheck, M., Bayer, U. & Lewerenz, B. (2003): Salt movements in the Northeast German Basin and its relation to major post-Permian tectonic phases - results from 3D structural modelling, backstripping and reflection seismic data. *Tectonophysics*, Bd. 361, S. 277-299. ISSN 0040-1951. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(02\)00650-9](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(02)00650-9)
- Schellschmidt, R. & Clauser, C. (1996): The Thermal Regime of the Upper Rhine Graben and the Anomaly at Soultz. *Zeitschrift für angewandte Geologie*, Bd. 42, S. 40-44
- Schmidt, G., Al Najem, S., Isenbeck-Schröter, M., Freundt, F., Kraml, M., Eichstädter, R. & Aeschbach, W. (2017): ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr Ratios in Shallow and Deep Aquifers and Thermal Water from the Eastern Boundary Fault of the Northern Upper Rhine Graben at the Heidelberg Basin, Germany. *Procedia Earth and Planetary Science*, Bd. 17, S. 108-111. DOI: 10.1016/j.proeps.2016.12.017
- Schmidt, R. (1996): *Feinstratigraphie des Opalinuston (Dogger [alpha]) der mittleren Schwäbischen Alb, Baden-Württemberg*. Dissertation, University of Tübingen, Tübingen,
- Schudack, M. & Tessin, R. (2015): Jura. In: W. Stackebrandt & D. Franke (Hrsg.): *Geologie von Brandenburg*. S. 217-256, Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 978-3-510-65210-5
- Schumacher, M. E. (2002): Upper Rhine Graben: Role of preexisting structures during rift evolution. *Tectonics*, Bd. 21, S. 6-1-6-17. ISSN 02787407. DOI: 10.1029/2001tc900022
- Schwarz, M. (2005): *Evolution und Struktur des Oberrheingrabens – quantitative Einblicke mit Hilfe dreidimensionaler thermomechanischer Modellrechnungen*. Dissertation, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Breisgau, S. 342, Freiburg,
- Schwarz, M. & Henk, A. (2005): Evolution and structure of the Upper Rhine Graben: Insights from three-dimensional thermomechanical modelling. *International Journal of Earth Sciences*, Bd. 94, S. 732-750. DOI: 10.1007/s00531-004-0451-2
- 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
- Simon, T. (1988): *Geologische und hydrogeologische Ergebnisse der neuen Solebohrung Bad Rappenau, Baden-Württemberg*. In: LGRB (Hrsg.): *Jahresheft*. Bd. Band 30, S. 479 - 510, Freiburg: LGRB
- Stackebrandt, W. (2009): Subglacial channels of Northern Germany : a brief review. *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften*, Bd. 160, S. 203-210. ISSN 1860-1804
- Stackebrandt, W. (2010): *Atlas zur Geologie von Brandenburg*. 4. Aufl., Cottbus: Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg ISBN 9783980815741
- Stackebrandt, W. & Franke, D. (2015): *Geologie von Brandenburg*. Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 9783510652952
- 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 2013: Standortauswahlgesetz vom 23. Juli 2013 (BGBl. I S. 2553), außer Kraft getreten zum 16.05.2017 (BGBl. I S. 1105) und ersetzt durch das Standortauswahlgesetz vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074)
- Standke, G. (2015): Tertiär. In: W. Stackebrandt & D. Franke (Hrsg.): Geologie von Brandenburg. S. 259-333, Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 978-3-510-65295-2
- Stets, J., Jaritz, W., Kockel, F., Stackelberg, V. & Stoppel, D. (1969): Barrême, Fazies und Mächtigkeiten. In: W. Schott (Hrsg.): Paläogeographischer Atlas der Unterkreide von Nordwestdeutschland mit einer Übersichtsdarstellung des nördlichen Mitteleuropa. S. 315, Stuttgart: Bundesanstalt für Bodenforschung
- Stober, I. & Bucher, K. (2015): Hydraulic and hydrochemical properties of deep sedimentary reservoirs of the Upper Rhine Graben, Europe. *Geofluids*, Bd. 15, S. 464-482. DOI: 10.1111/gfl.12122
- Stottmeister, L., Poblozki, P. v. & Reichenbach, W. (2008): Regionalgeologische Einheiten – Altmark-Fläming-Scholle. In: G. H. Bachmann, B.-C. Ehling, R. Eichner & M. Schwab (Hrsg.): Geologie von Sachsen-Anhalt. S. 348-369, Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 978-3-510-65240-2
- Straub, E. W. (1962): Die Erdöl- und Erdgaslagerstätten in Hessen und Rheinhessen. *Abhandlungen des Geologischen Landesamtes Baden-Württemberg*, Bd. 4, S. 123-136
- Teichmüller, M. (1979): Die Diagenese der kohligten Substanzen in den Gesteinen des Tertiärs und Mesozoikums des mittleren Oberrhein-Grabens. *Fortschritte in der Geologie von Rheinland und Westfalen*, Bd. 27, S. 19-49
- Thomsen, C. & Liebsch-Dörschner, T. (2014): Geologische Potenzialanalyse des tieferen Untergrundes Schleswig-Holstein - Beitrag zur Fortschreibung des Landesentwicklungsplanes mit den Nutzungspotenzialen: Tiefe Geothermie, Energiespeicherung in Salzkavernen Geologischer Dienst -Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein. Flintbek
- Timar-Geng, Z., Fügenschuh, G., Schaltegger, U. & Wetzell, A. (2004): The impact of the Jurassic hydrothermal activity on zircon fission track data from the southern Upper Rhine Graben area. *Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen*, Bd. 84, S. 257-269
- Trask, N. J., Roseboom, E. H., Watts, R. D. & Bedinger, M. S. (1986): Exploration of Crystalline Rocks for Nuclear Waste Repositories; Some Strategies for Area Characterization. Open-File Report 86-379. U. S. Geological Survey. Reston, Virginia, USA. DOI: 10.3133/ofr86379
- Tröger, K.-A. (2011): Postvariszisches Deckgebirge: Kreide – Oberkreide. In: W. Pälchen & H. Walter (Hrsg.): Geologie von Sachsen I: Geologischer Bau und Entwicklungsgeschichte. 2. Aufl., S. 311-358, Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 978-3-510-65270-9
- Trusheim, F. (1971): Zur Bildung der Salzlager im Rotliegenden und Mesozoikum Mitteleuropas. *Beihefte zum Geologischen Jahrbuch*, Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 9783510967391
- Voigt, T. (2007): Schwermineralseifen im Oberen Buntsandstein Thüringens. *Beiträge zur Geologie von Thüringen (N.F.)*, Bd. 14, S. 33-54
- Voigt, T. (2015): Kreide. In: W. Stackebrandt & D. Franke (Hrsg.): Geologie von Brandenburg. S. 240-256, Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 978-3-510-65295-2

- Voigt, T., Reicherter, K., Von Eynatten, H., Littke, R., Voigt, S. & Kley, J. (2008): Sedimentation during basin inversion. In: R. Littke, U. Bayer, D. Gajewski & S. Nelskamp (Hrsg.): Dynamics of complex intracontinental basins. The Central European Basin System. Heidelberg, Springer Verlag. 1. Aufl., S. 211-232, Berlin: Springer. ISBN 9783540850847. DOI: 10.1007/978-3-540-85085-4
- Von Bülow, W. & Müller, S. (2004): Neogen. In: G. Katzung (Hrsg.): Geologie von Mecklenburg-Vorpommern. S. 209-216, Stuttgart: E. Schweizerbart. ISBN 9783510652105
- 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
- Widmer, T. (1991): Zur Stratigraphie und Sedimentologie der Anhydritgruppe (Mittlere Trias) in der Region Liestal-Arisdorf (Baselland, Nordwestschweiz). 79. Aufl., Bern: Kümmerly + Frey. ISBN 3907997123
- Wieczorek, K., Behlau, J., Heemann, U., Masik, S., Raab, M., Mueller, C. & Simo, E. K. (2014): VIRTUS Virtuelles Untertagelabor im Steinsalz. GRS-354. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), DBE Technology GmbH, Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung. ISBN 9783944161341
- Wirth, E. (1954): Die nördliche Verbreitungsgrenze des Unteroligozäns im Rheintalgraben und ihre wirtschaftliche Bedeutung. Notizblatt des Hessischen Landesamtes für Bodenforschung zu Wiesbaden, Bd. 82, S. 168-189
- Wolf, R. (1985): Tiefentektonik des linksrheinischen Steinkohlegebietes. In: G. Drodzowski, H. Engel, R. Wolf & V. Wrede (Hrsg.): Beiträge zur Tiefentektonik westdeutscher Steinkohlenlagerstätten. S. 105-167, Krefeld, Deutschland: Geologischer Dienst Nordrhein-Westfalen - Landesbetrieb. ISBN 9783860299180
- Wüstefeld, P., Hilse, U., Lüders, V., Wemmer, K., Koehrer, B. & Hilgers, C. (2017): Kilometer-scale fault-related thermal anomalies in tight gas sandstones. Marine and Petroleum Geology, Bd. 86, S. 288-303. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2017.05.015
- Zagora, I. & Zagora, K. (2004): Zechstein. In: G. Katzung (Hrsg.): Geologie von Mecklenburg-Vorpommern. S. 132-139, Stuttgart: Schweizerbart. ISBN 9783510652105
- Zander, I. & Huckriede, H. (2011): Bericht zum Teilprojekt "Erstellung von Potenzialkarten und Charakterisierung von Speicherstrukturen in Thüringen für den Aufbau eines Informationssystems Speicher-Kataster für Deutschland". Projektstudie "Speicher-Kataster Deutschland". o. O.: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)
- Ziegler, P. A. (1990): Geological Atlas of Western and Central Europe. 2. Aufl., Den Haag: Shell Internationale Petroleum Maatschappij. ISBN 9789066441255
- Ziegler, P. A. (1992): European Cenozoic rift system. Tectonophysics, Bd. 208, S. 91-111. ISSN 00401951. DOI: 10.1016/0040-1951(92)90338-7
- Ziegler, P. A. & Dèzes, P. (2007): Cenozoic uplift of Variscan Massifs in the Alpine foreland: Timing and controlling mechanisms. Global and Planetary Change, Bd.

58, S. 237-269. ISSN
<https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.12.004>

0921-8181.

DOI:

Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
Eschenstraße 55
31224 Peine
T +49 05171 43-0
poststelle@bge.de
www.bge.de