

Fachliche Beratung des Landkreises Cuxhaven zu den Ergebnissen des Zwischenberichts Teilgebiete im Standortauswahlverfahren für ein Endlager

Plausibilitätsprüfung der Vorgehensweise der BGE bei der Kri- Darmstadt, 13.02.2022
terienanwendung und Ausweisung der folgenden Teilgebiete:

004_00TG_053_00IG_T_f_tpg (Tongestein),
006_00TG_188_00IG_T_f_ju (Tongestein),
067_00TG_159_00IG_S_s_z-ro (Steinsalz in steiler Lagerung),
068_00TG_163_00IG_S_s_z-ro (Steinsalz in steiler Lagerung),
075_01TG_189_01IG_S_f_km (Steinsalz in stratiformer Lagerung)

Autorinnen und Autoren


Okö-Institut e.V.


Okö-Institut e.V.

Kontakt

info@oeko.de
www.oeko.de

Geschäftsstelle Freiburg

Postfach 17 71
79017 Freiburg

Hausadresse

Merzhauser Straße 173
79100 Freiburg
Telefon +49 761 45295-0

Büro Berlin

Borkumstraße 2
13189 Berlin
Telefon +49 30 405085-0

Büro Darmstadt

Rheinstraße 95
64295 Darmstadt
Telefon +49 6151 8191-0

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	5
Tabellenverzeichnis	6
Zusammenfassung	7
1 Einleitung	9
2 Anwendung von Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen und geowissenschaftlichen Abwägungskriterien im Zwischenbericht Teilgebiete	11
3 Identifizierte Gebiete und Teilgebiete im Landkreis Cuxhaven	13
3.1 Teilgebietssegmente in Tongestein im Landkreis Cuxhaven	15
3.2 Teilgebiete und Teilgebietssegmente in Steinsalz im Landkreis Cuxhaven	16
4 Ausschlusskriterien	21
4.1 Anwendungsmethodik	21
4.2 Anwendung der Ausschlusskriterien im Landkreis Cuxhaven	24
5 Wirtsgesteine und Mindestanforderungen	31
5.1 Anwendungsmethodik	31
5.2 Anwendung der Mindestanforderungen für die Teilgebiete im Landkreis Cuxhaven	34
5.2.1 Teilgebiet 004: Tongesteine des Tertiärs	37
5.2.2 Teilgebiet 006: Tongesteine des unteren Jura	39
5.2.3 Teilgebiet 067: Salzstöcke Altenbruch/Westerwanna/Alfstedt/Beverstedt	41
5.2.4 Teilgebiet 068: Salzstöcke Armstorf/Odisheim/Osterbruch	44
5.2.5 Teilgebiet 075: Stratiformes Steinsalz des mittleren Keupers	46
6 Geowissenschaftliche Abwägungskriterien	49
6.1 Anwendungsmethodik	49
6.2 Anwendung der individuell bewerteten geowissenschaftlichen Abwägungskriterien für die Teilgebiete im Landkreis Cuxhaven	61
6.2.1 Teilgebiet 004: Tongesteine des Tertiärs	61
6.2.2 Teilgebiet 006: Tongesteine des unteren Jura	65
6.2.3 Teilgebiet 067: Salzstöcke Altenbruch/Westerwanna/Alfstedt/Beverstedt	67
6.2.4 Teilgebiet 068: Salzstöcke Armstorf/Odisheim/Osterbruch	70
6.2.5 Teilgebiet 075: Stratiformes Steinsalz des mittleren Keupers	73
7 Schlussfolgerungen und Bewertung	77

Literaturverzeichnis

81

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1: Geographische Lage der Teilgebiete	14
Abbildung 3-2: Übersichtskarte des Teilgebiets 004_00TG_053_00IG_T_f_tpg	15
Abbildung 3-3: Übersichtskarte des Teilgebiets 006_00TG_188_00IG_T_f_ju	16
Abbildung 3-4: Übersichtskarte des Teilgebiets 067_00TG_159_00IG_S_s_z-ro	17
Abbildung 3-5: Übersichtskarte des Teilgebiets 068_00TG_163_00IG_S_s_z-ro	18
Abbildung 3-6: Übersichtskarte des Teilgebiets 075_01TG_189_01IG_S_f_km	19
Abbildung 4-1: Aktive Störungzonen im Landkreis Cuxhaven	25
Abbildung 5-1: Das Teilgebiet 004 im Landkreis Cuxhaven	38
Abbildung 5-2: Bohrungen im Teilgebiet 006 im Landkreis Cuxhaven	40
Abbildung 5-3: Bohrungen im Bereich des Salzstocks Altenbruch	42
Abbildung 5-4: Bohrung Alfstedt 1 im Teilgebiet 067	43
Abbildung 5-5: Bohrungen im Bereich des Salzstocks Osterbruch	45
Abbildung 5-6: Bohrung Monopol 1 im Teilgebiet 068	46
Abbildung 5-7: Lage der Bohrungen im südlichen Segment des Teilgebiets 075	47
Abbildung 5-8: Lage der Bohrung Hemmoor 2 im östlichen Segment des Teilgebiets 075	48
Abbildung 6-1: Darstellung der räumlichen Konfiguration der sicherheitsrelevanten Bestandteile für einschlusswirksame Gebirgsbereiche im Wirtsgestein	62
Abbildung 6-2: Internbautypen von Doppelsalinaren	68
Abbildung 6-3: Ausschnitte aus der Gesamtbewertung des Teilgebiets im Zwischenbericht 068	73

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Identifizierte Gebiete und Teilgebiete im Landkreis Cuxhaven	13
Tabelle 4-1: Störungszonen im Landkreis Cuxhaven	26
Tabelle 5-1: Zuordnung Nummerierungen identifizierter Gebiete zu Teilgebieten	34
Tabelle 5-2: Charakteristika der betrachteten Teilgebiete zur Anwendung der Mindestanforderungen	36
Tabelle 5-3: Strukturinformationen zu den Salzstöcken Altenbruch/Westerwanna/Alfstedt/Beverstedt (Teilgebiet 067)	41
Tabelle 5-4: Strukturinformationen zu den Salzstöcken Armstorf/Odisheim/Osterbruch (Teilgebiet 068)	44

Zusammenfassung

Im Landkreis Cuxhaven wurden im Rahmen des Standortauswahlverfahrens für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle fünf Teilgebiete ausgewiesen, die günstige geologische Voraussetzungen für die sichere Endlagerung radioaktiver Abfälle erwarten lassen. Nur eines dieser Teilgebiete liegt vollständig auf dem Gebiet des Landkreises Cuxhaven.

Die Ausweisung dieser Teilgebiete ist grundsätzlich nachvollziehbar. Eigenschaften, die zur Eignung der Teilgebiete beitragen, sind teilweise nicht auf die Flächenanteile im Landkreis Cuxhaven übertragbar. Es zeigte sich im Rahmen der Prüfung hinsichtlich Nachvollziehbarkeit und Plausibilität, dass Informationen aus Fachliteratur und Daten, beispielsweise aus Schichtenverzeichnissen von Bohrungen, nicht zur Bewertung herangezogen wurden.

In vielen Fällen ist nicht davon auszugehen, dass die Berücksichtigung dieser Informationen zu einer geänderten Bewertung der Kriterien oder Anforderungen des Standortauswahlgesetzes für die betreffenden Gebiete führen wird. Einzelne Hinweise wie das Vorhandensein glazialer Rinnen, die das Gebirge oberhalb von Salzstöcken durchschneiden und dessen Schutzfunktion gegenüber Erosion und dem Zutritt von Grundwasser beeinträchtigen können, sollten im weiteren Verfahren jedoch berücksichtigt werden. Gleiches gilt für die Feststellung, dass in verschiedenen Bohrungen im Landkreis Cuxhaven die dort ausgewiesenen Wirtsgesteine für ein Endlager nicht angetroffen wurden.

Hervorzuheben ist das Teilgebiet mit der Bezeichnung Basdahl/ Armstorf/ Odisheim/ Osterbruch/ Belmhusen/ Süderhastedt/ Tellingstedt/ Pahlhude/ Grevenhorst (068_00TG_163_00IG_S_s_z-ro). Bei der zusammenfassenden Bewertung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien wurde die Bewertung eines von drei individuell bewerteten Kriterien falsch übernommen. Für dieses Teilgebiet sollte daher die Gesamtbewertung überprüft und gegebenenfalls angepasst werden.

1 Einleitung

Im Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz – StandAG) ist das Verfahren festgelegt, mit dem ein „Standort mit der bestmöglichen Sicherheit“ für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle ermittelt werden soll. Das Verfahren wurde 2017 aufgenommen. Es gliedert sich in drei Phasen, die jeweils mit einem Bundesgesetz abgeschlossen werden. Derzeit befindet sich das Standortauswahlverfahren in der ersten Phase.

Am 28.09.2020 wurde durch die Vorhabenträgerin, die Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE), der Zwischenbericht Teilgebiete gemäß § 13 des StandAG vorgelegt. Damit wurde in der Phase 1 des Standortauswahlgesetzes ein wichtiger Meilenstein erreicht.

Im Zwischenbericht¹ werden die Flächen des Bundesgebiets benannt, die nicht auf Basis der Ausschlusskriterien gemäß § 22 StandAG ausgeschlossen wurden, die alle Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG erfüllen und die nach Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG als günstig bewertet wurden. Sie werden als Teilgebiete ausgewiesen, „die günstige geologische Voraussetzungen für die sichere Endlagerung radioaktiver Abfälle erwarten lassen“ (StandAG 2017). Bei der Festlegung von Größe und Grenzen eines Teilgebietes orientiert sich die Vorhabenträgerin an der Verbreitung endlagerrelevanter stratigraphischer² Einheiten und möglicher Wirtsgesteine. Somit können Teilgebiete einander überlappen bzw. übereinander liegen.

Mit Schreiben vom 11.10.2021 beauftragte der Landkreis Cuxhaven das Öko-Institut e.V. mit der Erstellung eines (Kurz-)Gutachtens zur fachlichen Beratung des Landkreises Cuxhaven zu den Ergebnissen des Zwischenberichts Teilgebiete im Standortauswahlverfahren für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle. Im vorliegenden Gutachten werden Plausibilität und Nachvollziehbarkeit der Vorgehensweise und der Bewertung bei der Ausweisung von Teilgebieten im Landkreis Cuxhaven anhand der verfügbaren Unterlagen geprüft und mit den Vorgaben des Standortauswahlgesetzes abgeglichen. Die Situation der ausgewiesenen Teilgebiete im Landkreis Cuxhaven wird im Überblick dargestellt. Auf die Methodik der Anwendungen von Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen und Abwägungskriterien wird in eigenen Kapiteln eingegangen. Jeweils im Anschluss werden die Ergebnisse der Anwendung der Kriterien und Anforderungen, die zur Ausweisung von Teilgebieten im Landkreis Cuxhaven geführt haben, dargestellt und hinsichtlich Methodik und Nachvollziehbarkeit bewertet.

Die wesentlichen Schlussfolgerungen sowie sich ergebende Fragestellungen werden in einem Schlusskapitel zusammengefasst.

¹ <https://www.bge.de/de/endlagersuche/zwischenbericht-teilgebiete/>

² Als Stratigraphie wird innerhalb der Geologie die Lehre von der zeitlichen und räumlichen Abfolge der Gesteinseinheiten bezeichnet. Neben international harmonisierten stratigraphischen Einteilungen werden häufig abweichende nationale stratigraphische Tabellen verwendet. So dauerte beispielsweise die Periode des Perm von etwa 299 bis 252 Millionen Jahren (Ma) vor heute; innerhalb des Perm wird international noch zwischen den Epochen Unter-, Mittel- und Oberperm unterschieden, die jeweils durch Stufen weiter gegliedert werden. In Norddeutschland wird das Perm davon abweichend historisch in die Abschnitte Rotliegendes (Unterperm, bis vor etwa 258 MA) und Zechstein (Oberperm) unterteilt.

2 Anwendung von Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen und geowissenschaftlichen Abwägungskriterien im Zwischenbericht Teilgebiete

Zur Ermittlung von Teilgebieten gem. § 13 StandAG wurden durch die Vorhabenträgerin BGE Geodaten der staatlichen geologischen Dienste für das gesamte Gebiet der Bundesrepublik Deutschland abgerufen. Auf diese Daten wurden in einem ersten Schritt die in § 22 StandAG festgelegten Ausschlusskriterien angewendet. Die Bereiche des Staatsgebiets, in denen ein Ausschlusskriterium erfüllt ist, wurden aus dem Verfahren ausgeschlossen.

Im verbleibenden Gebiet wurden stratigraphische Einheiten identifiziert, in denen grundsätzlich geeignete Wirtsgesteine für die Errichtung eines Endlagers vorkommen können. Nach § 23 StandAG sind das Steinsalz, Tongestein und Kristallingestein. Anschließend wurden auf diese Gesteinsvorkommen die Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG angewendet. Ist eine Mindestanforderung nicht erfüllt, scheidet das betroffene Gebiet aus dem Verfahren aus.

Auf die so identifizierten Gebiete wurden die in § 24 StandAG und den Anlagen 1 bis 11 ausgeführten geowissenschaftlichen Abwägungskriterien angewendet. Die nach der geowissenschaftlichen Abwägung als günstig bewerteten Gebiete wurden als Teilgebiete benannt und im Zwischenbericht dargestellt.

Wesentliche Grundlage für die Bewertung der Anwendung der sechs **Ausschlusskriterien** durch die BGE und deren Ergebnisse ist der Bericht „Anwendung Ausschlusskriterien gemäß § 22 StandAG“ (BGE 2020b). Darin werden die kriterienspezifischen Anwendungsmethoden beschrieben. Die Darstellung geht allerdings nicht auf die einzelnen ausgeschlossenen Gebiete ein oder liefert Begründungen für den jeweiligen Ausschluss. Während die im Zwischenbericht ausgewiesenen Teilgebiete einzeln beschrieben werden, sind ausgeschlossene Gebiete nur in einer Deutschlandkarte dargestellt. Die Identifikation ausgeschlossener Gebiete im Landkreis Cuxhaven ist nur mit Hilfe der interaktiven Kartendarstellung der BGE (BGE 2020f) möglich. Die dort dargestellten ausgeschlossenen Gebiete sind zwar jeweils mit einer Kennung versehen, die als Ident bezeichnet wird; weitere Informationen zu den einzelnen ausgeschlossenen Gebieten enthalten aber weder der Zwischenbericht selbst noch die untersetzenden Unterlagen. Eine Zuordnung der Ident.-Nr. zu einer Ortsangabe oder einem Namen, beispielsweise einem ausgeschlossenen Bereich aufgrund von Bergbau zum Namen des ehemaligen oder rezenten Bergwerks, ist mittels der Unterlagen des Zwischenberichts Teilgebiete nicht möglich.

Die Anwendung der fünf **Mindestanforderungen** ist im Bericht „Anwendung Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG“ (BGE 2020c) dargestellt. Vor Anwendung der Mindestanforderungen wurden alle stratigraphischen Einheiten in Deutschland hinsichtlich ihrer potentiellen Eignung dahingehend bewertet, ob für den jeweiligen Gesteinstyp anhand seiner Gebirgsdurchlässigkeit und der Kenntnisse über seine Barrierewirkung sowie einer Mindestmächtigkeit³ von 100 m die Erfüllung dieser Mindestanforderungen erwartet werden kann. Gebiete, die alle Mindestanforderungen erfüllen, werden von der BGE in Anlehnung an § 13 Abs. 2 StandAG als identifizierte Gebiete (IG) bezeichnet und mit einer Kennung versehen (siehe Tabelle 3-1).

³ Die Mächtigkeit ist in der Geologie die Bezeichnung für die Dicke eines Gesteinspakets. Die Mächtigkeit wird unabhängig von der räumlichen Orientierung einer Schicht senkrecht zu den Schichtflächen gemessen. Weil bei der Bildung von Salzstöcken oder anderen steilstehenden Salzvorkommen der ursprüngliche Schichtverband meist zerstört wird, wird abweichend von dieser Definition als Mächtigkeit einer Salzstruktur oder Mächtigkeit eines Salinars häufig eine Sekundärmächtigkeit angegeben, die die Stärke des Gesteinspakets senkrecht zur Erdoberfläche bezeichnet.

Durch die Anwendung der **geowissenschaftlichen Abwägungskriterien** soll bewertet werden, „ob in einem Gebiet eine günstige geologische Gesamtsituation“ (StandAG 2017) vorliegt. Dazu werden elf Kriterien, die jeweils mit einem oder mehreren Indikatoren untersetzt sind, herangezogen. identifizierte Gebiete, in denen nach der Kriterienanwendung eine günstige geologische Gesamtsituation angenommen werden kann, werden als Teilgebiete (TG) bezeichnet. Die Kennung der identifizierten Gebiete wird zu einer Teilgebiets-Kennung erweitert (siehe Tabelle 3-1). Im Folgenden wird aus Gründen der Handhabbarkeit nur die jeweilige Teilgebietskennung verwendet, also Teilgebiete 004, 006, 067, 068 und 075.

Die geowissenschaftlichen Abwägungskriterien werden in § 24 StandAG sowie den Anlagen 1 bis 11 ausgeführt. Der Vorgehensweise der BGE liegt die Unterlage „Arbeitshilfe zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien im Rahmen von § 13 StandAG“ (BGE 2020d) zugrunde. Im Fachbericht „Teilgebiete und Anwendung Geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG“ (BGE 2020h) wird die Anwendung im Detail ausgeführt und eine Übersicht über die Ergebnisse gegeben.

Bei der Anwendung der Mehrzahl der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien wird von der BGE auf wirtsgesteinsspezifische Referenzdaten zurückgegriffen. Die Vorhabenträgerin hat zu diesem Zweck einen Referenzdatensatz (BGE 2020g) veröffentlicht. Zur Bewertung der einzelnen Indikatoren werden darin Referenzwerte oder Argumente aus der Fachliteratur aufgeführt. Nach Aussage der BGE werden möglichst günstige Bewertungen der Gesteinseigenschaften verwendet, um im Sinne eines konservativen Ansatzes bei der Ermittlung von Teilgebieten einen Ausschluss potentiell geeigneter Gebiete zu vermeiden. Die Referenzdaten für Steinsalz gelten für alle Salzstöcke und stratiform⁴ gelagerte Salzgesteine Deutschlands gleichermaßen. Darüber hinaus werden einzelne geowissenschaftliche Abwägungskriterien individuell anhand gebietsspezifischer Daten bewertet.

⁴ Als stratiform werden Gesteinsvorkommen bezeichnet, die sich innerhalb eines vorhandenen Schichtverbands, parallel zu den Schichtgrenzen erstrecken. In der Regel wird der Begriff für Erzlagerstätten verwendet, die innerhalb einer Gesteinsschicht gebildet wurden und nicht über Schichtgrenzen hinweg; die BGE nutzt ihn auch zur Unterscheidung zwischen Salinaren, die sich noch im Schichtverband befinden, sich also parallel zu den Grenzen der über- und unterlagernden Gesteine erstrecken, und Salzstöcken, die durch Aufwölbung den Schichtverband durchbrochen und überlagernde Gesteinseinheiten verdrängt oder aufgewölbt haben. Sieh dazu auch Kapitel 3.2

3 Identifizierte Gebiete und Teilgebiete im Landkreis Cuxhaven

Im Landkreis Cuxhaven wurden durch Anwendung der Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen insgesamt neun Gebiete identifiziert, von denen nach Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien fünf als Teilgebiete ausgewiesen wurden. Die BGE stellt die Ergebnisse des Zwischenberichts Teilgebiete zusätzlich zur Schriftform in einer interaktiven Kartendarstellung (BGE 2020f) auf der Website des Unternehmens zur Verfügung. Neben der Darstellung der Teilgebiete kann dieser Karte auch die Lage der ausgeschlossenen Gebiete entnommen werden. Die identifizierten Gebiete sowie die Teilgebiete im Landkreis Cuxhaven sind in Tabelle 3-1 zusammengestellt.

Tabelle 3-1: Identifizierte Gebiete und Teilgebiete im Landkreis Cuxhaven

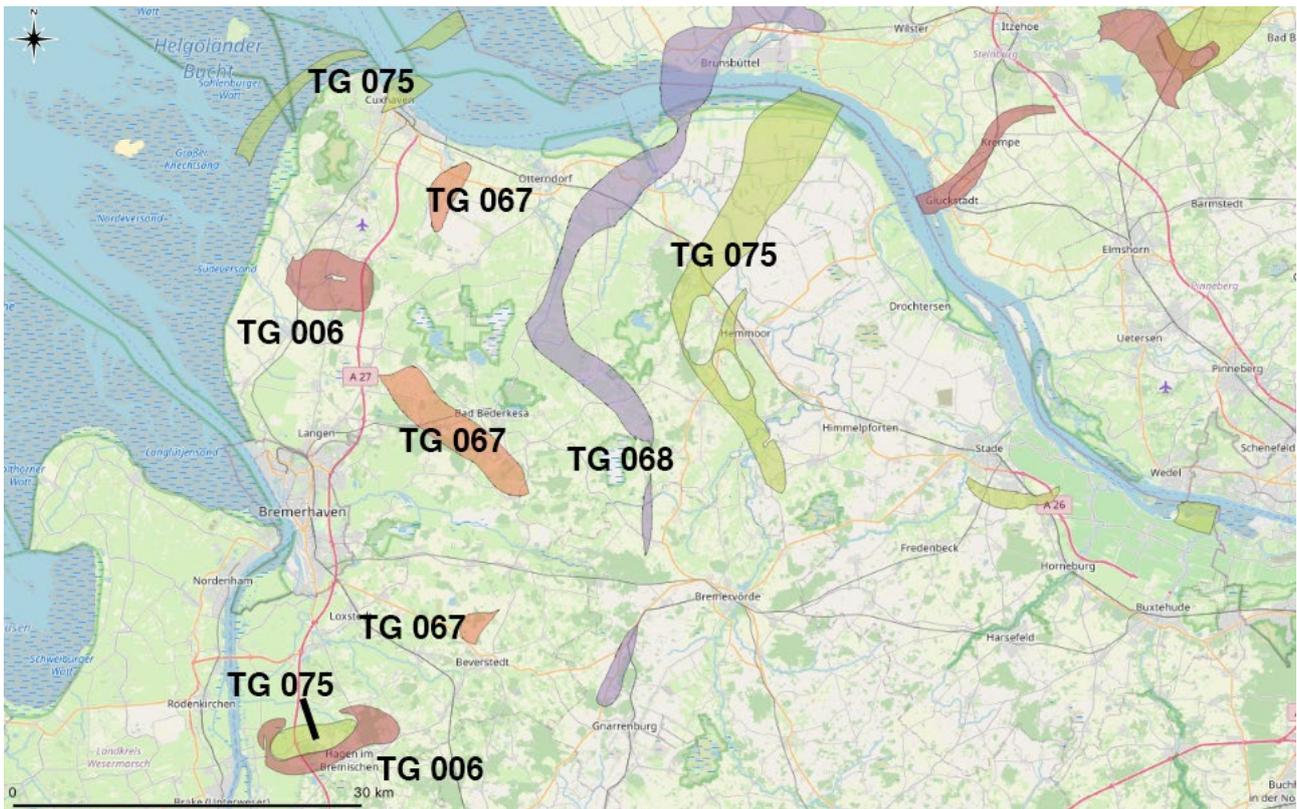
Identifizierte Gebiete (ID)	Teilgebiete (ID)	Wirtsgestein	Stratigrafie
053_00IG_T_f_tpg	004_00TG_053_00IG_T_f_tpg	Tongestein	Tertiär (Unteres Paläogen)
188_00IG_T_f_ju	006_00TG_188_00IG_T_f_ju	Tongestein	Unterjura
159_00IG_S_s_z-ro	067_00TG_159_00IG_S_s_z-ro	Steinsalz in steiler Lagerung	Oberrotliegend und Zechstein
163_00IG_S_s_z-ro	068_00TG_163_00IG_S_s_z-ro	Steinsalz in steiler Lagerung	Oberrotliegend und Zechstein
189_01IG_S_f_km	075_01TG_189_01IG_S_f_km	Steinsalz in stratiformer Lagerung	mittlerer Keuper
148_00IG_S_s_z-ro	kein Teilgebiet	Steinsalz in steiler Lagerung	Oberrotliegend und Zechstein
157_00IG_S_s_z-ro	kein Teilgebiet	Steinsalz in steiler Lagerung	Oberrotliegend und Zechstein
161_00IG_S_s_z-ro	kein Teilgebiet	Steinsalz in steiler Lagerung	Oberrotliegend und Zechstein
202_01IG_T_f_kru	kein Teilgebiet	Tongestein	Unterkreide

Quelle: Tabelle auf Datenbasis Zwischenbericht Teilgebiete, BGE

Neben Teilgebieten im Tongestein (004 und 006) sind die Salzstöcke Altenbruch/ Westerwanna/ Alfstedt/ Beverstedt (067), Basdahl/ Armstorf/ Odisheim/ Osterbruch/ Belmhusen/ Süderhastedt/ Tellingstedt/ Pahlhude/ Grevenhorst (068) sowie Glückstadt-Graben, nördliches Norddeutsches Becken (075) als Teilgebiete benannt worden. Im Folgenden werden zur besseren Lesbarkeit nur die Teilgebietsnummer oder die Ortsbezeichnung des Teilgebiets oder Teilgebietssegments (s.u.) verwendet. Abbildung 3-1 zeigt die Lage der Teilgebiete 006, 067, 068 und 075 im Landkreis Cuxhaven.

Die genaue Festlegung der in Frage kommenden Vorkommen dieser Gesteine wird im Kapitel 5.1 erklärt. Teilgebiete in Tongesteinen und kristallinen Gesteinen werden von der Vorhabenträgerin BGE, wie in der Einleitung dargestellt, als Verbreitungsräume stratigraphischer Einheiten ausgewiesen, in denen diese Gesteine vorkommen. Diese Einheiten sind im Untergrund von Deutschland oft flächenhaft verbreitet.

Abbildung 3-1: Geographische Lage der Teilgebiete



Quelle: Eigene Darstellung. Erstellt mit QGIS, Kartengrundlage OpenStreetMap, Shape-Daten der Teilgebiete bereitgestellt von der BGE mbH unter <https://www.bge.de/de/endlagersuche/wesentliche-unterlagen/zwischenbericht-teilgebiete/>

Als Beispiel für diese Erstreckung über weite Flächen können die Tongesteine des unteren Jura (vor 201,5 bis 174 Millionen Jahren) dienen. In Abbildung 3-3 ist zu sehen, dass Unterjura-Gesteine in ganz Norddeutschland verbreitet sind. Gleichzeitig gibt es Bereiche im Untergrund, in denen diese Gesteine nicht vorkommen, beispielsweise aufgrund tektonischer⁵ Bewegungen in der erdgeschichtlichen Vergangenheit; in anderen Regionen befinden sich die Unterjura-Gesteine nicht in der richtigen Tiefe für die Errichtung eines Endlagers oder wurden Gebiete aufgrund von Ausschlusskriterien nicht einbezogen. Deshalb bestehen die Teilgebiete in Ton- und Kristallingesteinen aus mehreren Segmenten, die in der Kartendarstellung als separierte Flächen erscheinen, von der BGE im Zwischenbericht aber als ein Teilgebiet ausgewiesen werden.

Auf Steinsalz, das nicht als Salzstock auftritt, sondern stratiform lagert, wird die gleiche Vorgehensweise wie für Tongestein und kristalline Gesteine angewendet. Nur Salzstöcke (siehe Kapitel 3.2) werden als jeweils eigene Teilgebiete betrachtet, auch wenn sie im tiefen Untergrund miteinander verbunden sind. Dennoch können auch sie in der Kartendarstellung aus mehreren Segmenten bestehen, wenn Teile eines Salzstocks nicht für die Errichtung eines Endlagers in Frage kommen oder unterhalb der für die Errichtung eines Endlagers in Frage kommenden Tiefe liegen.

⁵ Als Tektonik wird die Lehre von der dreidimensionalen Struktur der Erdkruste, der Bewegung und Deformation von Gesteinen und den Kräften, die diese Bewegungen verursachen, bezeichnet.

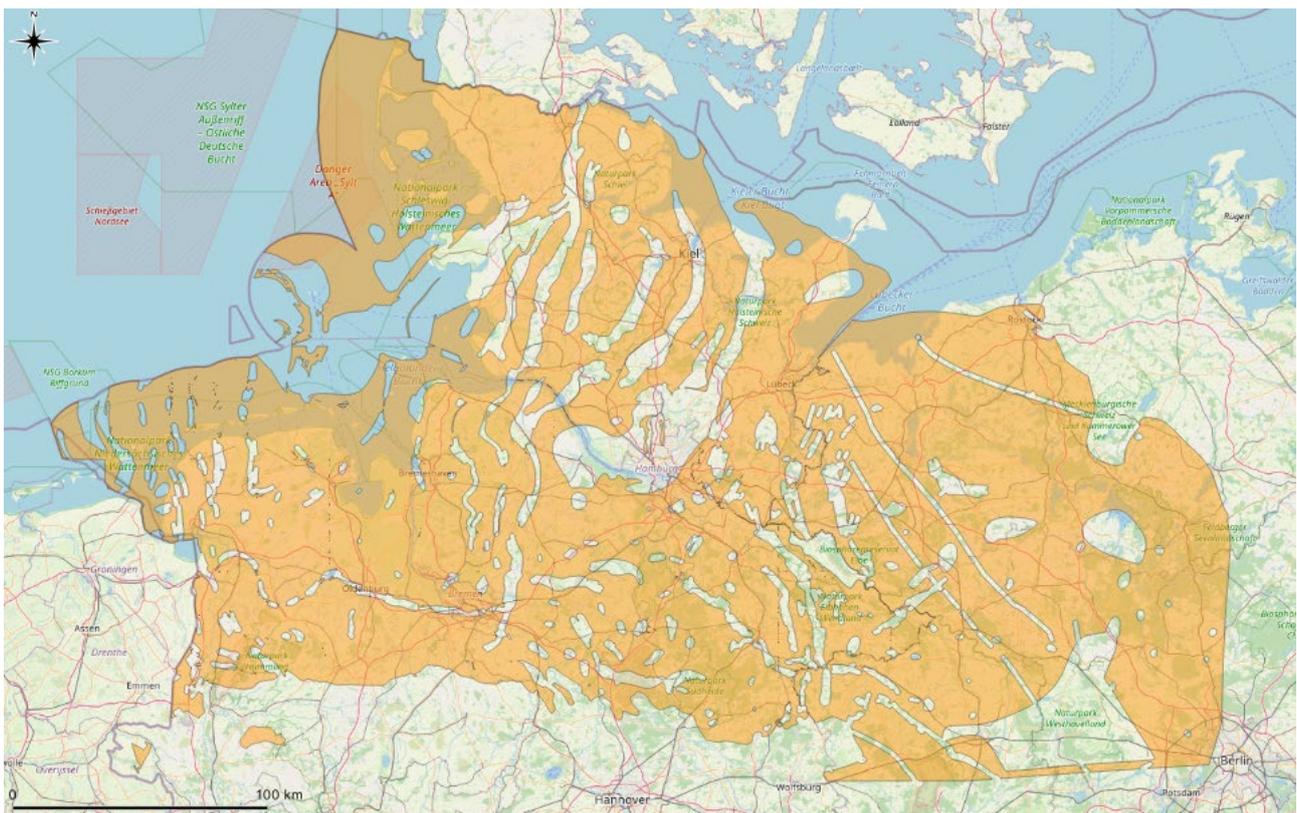
Während das Teilgebiet 067 vollständig auf dem Gebiet des Landkreises Cuxhaven liegt, befinden sich von Teilgebiet 068 nur die Strukturen Armstorf, Odisheim und Osterbruch und von Teilgebiet 075 nur jeweils kleinere Teile der Struktur Glückstadt-Graben innerhalb der Landkreisgrenzen.

Bei den Teilgebieten in Tongestein (004 und 006) befinden sich innerhalb der Landkreisgrenzen des Landkreises Cuxhaven jeweils nur ein kleiner Teil der Gesamtstruktur (im Falle von TG 004) oder zwei kleinere Segmente (TG 006). Beide Teilgebiete erstrecken sich in ihrer Gesamtstruktur über mehrere Bundesländer im Norden Deutschlands. Die Bewertung der Kriterien und Anforderungen des StandAG durch die BGE erfolgte immer auf das gesamte Teilgebiet bezogen; Eigenschaften, die zur Ausweisung als Teilgebiet geführt haben, treffen also nicht zwingend auf jedes der Teilgebietssegmente zu.

3.1 Teilgebietssegmente in Tongestein im Landkreis Cuxhaven

Teilgebiet 004 erstreckt sich auf einer Fläche von 62.885 km² über mehrere Bundesländer (siehe Abbildung 3-2). Es beschreibt die Verbreitung von Tongestein, das im Erdzeitalter des unteren Tertiärs (Paläogen), vor 66 bis 23 Millionen Jahren, in Norddeutschland abgelagert wurde.

Abbildung 3-2: Übersichtskarte des Teilgebiets 004_00TG_053_00IG_T_f_tpg



Quelle: Eigene Darstellung. Erstellt mit QGIS, Kartengrundlage OpenStreetMap, Shape-Daten des Teilgebiets bereitgestellt von der BGE mbH unter <https://www.bge.de/de/endlagersuche/wesentliche-unterlagen/zwischenbericht-teilgebiete/>

Im Rahmen der Teilgebiets-Sprechstunde wurde seitens der BGE darauf hingewiesen, dass die Gesteine der Rupeltonformation (tertiäre Tonsteine des oberen Paläogens, etwa 33 bis 28 Millionen Jahre vor heute) dabei nicht als Wirtsgestein für ein Endlager in Frage kommen.

In Europa wurden die mächtigsten und am weitesten verbreiteten Salinare im Erdzeitalter des Zechsteins gebildet. Salz ist unter Druck plastisch verformbar und kann im Laufe von Jahrmillionen unter der Auflast überlagernder jüngerer Gesteine in der Erdkruste aufsteigen und dabei andere Gesteine verdrängen. Die ursprünglich einander überlagernden Gesteinsschichten werden durch den Aufstieg eines Salinars und die damit einhergehende bruchhafte und plastische Deformation verändert.

Diese Bewegung von Salzgestein in der Erdkruste wird als Halokinese oder auch Salzdiapirismus bezeichnet. Abhängig von der äußeren Gestalt solcher aufgewölbten Salinare wird von Salzkissen, -stöcken, -domen, -diapiren⁷ oder -mauern gesprochen. Im Zwischenbericht Teilgebiete werden diese potentiellen Wirtsgesteine zusammenfassend als Steinsalz in steiler Lagerung bezeichnet. Im vorliegenden Bericht wird unabhängig von der äußeren Gestalt der Gesteinskörper der Begriff Salzstock verwendet.

Abbildung 3-4: Übersichtskarte des Teilgebiets 067_00TG_159_00IG_S_s_z-ro



Quelle: Eigene Darstellung. Erstellt mit QGIS, Kartengrundlage OpenStreetMap, Shape-Daten des Teilgebiets bereitgestellt von der BGE mbH unter <https://www.bge.de/de/endlagersuche/wesentliche-unterlagen/zwischenbericht-teilgebiete/>

Das Teilgebiet Altenbruch/ Westerwanna/ Alfstedt/ Beverstedt (067) liegt mit einer Fläche von 59 km² vollständig innerhalb der Landkreisgrenzen (siehe Abbildung 3-4). Es handelt sich, wie auch beim Teilgebiet 068, um ein sogenanntes Doppelsalar. Darin sind Salzgesteine des Zechsteins

⁷ Als Diapirismus wird der verformbare Aufstieg von Gesteinsmaterial aus tieferen in höher gelegene Bereiche der Erdkruste bezeichnet, deren Lagen dabei durchdrungen, verbogen und durchbrochen werden. Im Fall magmatischen Diapirismus wird das umgebende Gesteinsmaterial zum Teil aufgeschmolzen oder thermisch überprägt.

(vor etwa 257 bis 252 Millionen Jahren) gemeinsam mit älteren, ursprünglich an der Basis der Zechstein-Salze lagernden Salinargesteinen aus dem Zeitalter des Oberrotliegenden (vor etwa 285 bis 257 Millionen Jahren), aufgewölbt worden. Die Gesteine des Zechsteins und des Oberrotliegenden sind in den Salzstöcken miteinander vermischt; die genaue Lage der einzelnen Gesteine, die ursprünglich horizontal übereinander abgelagert wurden, ist innerhalb des Salzstocks schwer zu prognostizieren.

Von Teilgebiet 068 befinden sich nur die Segmente Armstorf, Odisheim und Osterbruch innerhalb der Landkreisgrenzen (siehe Abbildung 3-5). Sie bilden das südliche Ende des sich mit einer Fläche von 274 km² in Südsüdwest-Nordnordost-Richtung über die Bundesländer Niedersachsen und Schleswig-Holstein erstreckenden Teilgebiets.

Abbildung 3-5: Übersichtskarte des Teilgebiets 068_00TG_163_00IG_S_s_z-ro



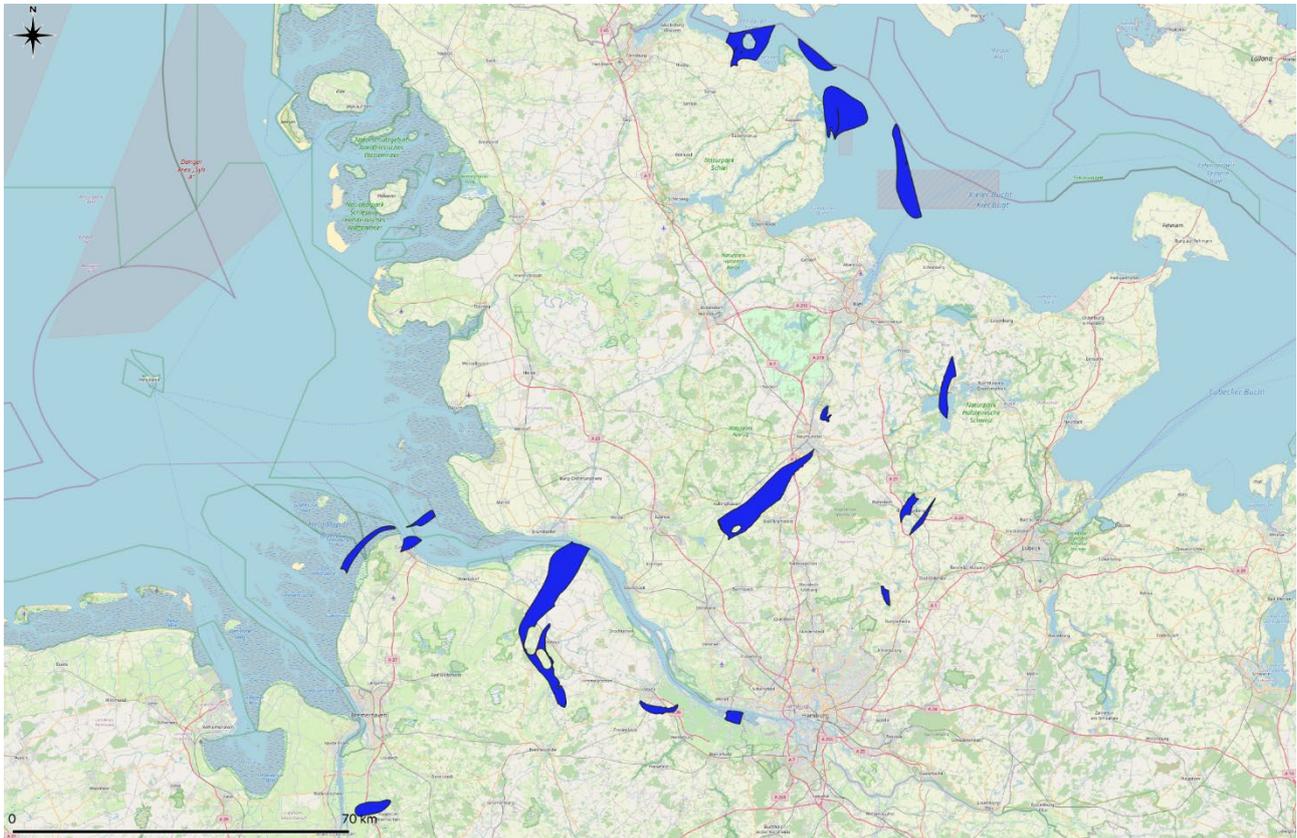
Quelle: Eigene Darstellung. Erstellt mit QGIS, Kartengrundlage OpenStreetMap, Shape-Daten des Teilgebiets bereitgestellt von der BGE mbH unter <https://www.bge.de/de/endlagersuche/wesentliche-unterlagen/zwischenbericht-teilgebiete/>

Bei Teilgebiet 075 mit dem Strukturnamen Glückstadt-Graben, nördliches Norddeutsches Becken handelt es sich um ein Salinar mit Steinsalz in stratiformer Lagerung. Es erstreckt sich über die Bundesländer Hamburg, Niedersachsen und Schleswig-Holstein (siehe Abbildung 3-6). Innerhalb der Grenzen des Landkreises Cuxhaven liegen Segmente der Struktur im Osten und Süden des Landkreises sowie in der Nordsee bei Cuxhaven.

Während des Keupers (vor etwa 239 – 201,5 Millionen Jahren) befand sich der Bereich des heutigen Norddeutschlands meist oberhalb des Meeresspiegels. Es herrschten zeitweise aride, also trockene, Bedingungen. Sedimente wurden vor allem in Flüssen und Seen abgelagert, im Süden Deutschlands auch in Flussdeltas und im Gezeitenbereich am Rand der Neothetys, einem Vorläufer des heutigen

Mittelmeeres. Der Glückstadt-Graben ist eine Bruchstruktur, die während der gesamten Trias (vor 252,5-201,5 Millionen Jahren) immer tiefer einsank, weil durch die Bildung von Salzstöcken Zechsteinsalz aus dem Bereich des Grabens abwanderte. In dem Graben kam es während des Keupers zur Bildung neuer Salzlagerstätten. Diese gehen wahrscheinlich auf Lösung von Zechsteinsalz zurück, das anschließend erneut sedimentiert wurde (Meschede 2015).

Abbildung 3-6: Übersichtskarte des Teilgebiets 075_01TG_189_01IG_S_f_km



Quelle: Eigene Darstellung. Erstellt mit QGis, Kartengrundlage OpenStreetMap, Shape-Daten des Teilgebiets bereitgestellt von der BGE mbH unter <https://www.bge.de/de/endlagersuche/wesentliche-unterlagen/zwischenbericht-teilgebiete/>

4 Ausschlusskriterien

In diesem Kapitel werden die sechs Ausschlusskriterien gemäß § 22 StandAG sowie der Umgang der BGE damit dargestellt. Die Ergebnisse, die sich daraus für den Landkreis Cuxhaven ergeben, werden für jedes Ausschlusskriterium erläutert und Schlussfolgerungen diskutiert (Kapitel 4.2).

4.1 Anwendungsmethodik

Großräumige Vertikalbewegungen

Durch das Ausschlusskriterium *großräumige Vertikalbewegungen* sollen Gebiete ausgeschlossen werden, in denen innerhalb der nächsten eine Million Jahre Hebungen mit Beträgen von mehr als einem Millimeter pro Jahr zu erwarten sind. Zur Anwendung des Kriteriums hat die BGE zwei Datenabfragen bei den geologischen Diensten der Bundesländer und bei Bundesbehörden vorgenommen. Neben diesen spezifischen Datenlieferungen stellt die von der BGE in Auftrag gegebene Studie „Prognosemöglichkeiten von großräumigen Vertikalbewegungen in Deutschland“ (Jähne-Klingberg et al. 2019) die wesentliche Quelle für die Anwendung des Ausschlusskriteriums dar.

Darin kommen die Autoren zu dem Schluss, dass „die für Mitteleuropa diskutierten, vermutlich zurzeit wirkenden endogenen Prozesse [...] nach heutigem Kenntnisstand nur Hebungsraten deutlich unter 1000 Meter pro Million Jahre“ (Jähne-Klingberg et al. 2019) hervorbringen. Aufgrund der Komplexität bewerten sie, dass „verlässliche quantifizierbare flächige Zukunftsprognosen auf Basis von Modellen zu diesen komplexen geodynamischen Zusammenhängen [...] eine genauere, konsistentere und flächendeckendere Datenbasis als heute vorhanden“ (Jähne-Klingberg et al. 2019) erfordern. Die BGE geht auf dieser Grundlage davon aus, dass im Nachweiszeitraum Hebungsraten von 1000 m nicht erreicht werden.

Aktive Störungszonen

Als aktive Störungzone werden gemäß § 22 Abs. 2 Nr. 2. StandAG (2017) „Brüche in den Gesteinsschichten der oberen Erdkruste wie Verwerfungen mit deutlichem Gesteinsversatz sowie ausge dehnte Zerrüttungszonen mit tektonischer Entstehung, an denen nachweislich oder mit großer Wahrscheinlichkeit im Zeitraum Rupel bis heute, also innerhalb der letzten 34 Millionen Jahre, Bewegungen stattgefunden haben“, bezeichnet. Grundlage zur Anwendung des Ausschlusskriteriums *aktive Störungszonen* waren zum einen die Angabe der Koordinaten von Linien- oder Flächenelementen, die die Lage von tektonischen oder atektonischen Störungszonen beschreiben, zum anderen Angaben zur stratigraphischen oder zeitlichen Einordnung deren Aktivität sowie zur Raumlage von Störungen und zu Versatzbeträgen.

Aktive Störungszonen werden im Zwischenbericht Teilgebiete mit einem Sicherheitsabstand von 1000 m beidseitig der Störungsfläche ausgeschlossen. Dieser Abstand wurde der Begründung zum Gesetzentwurf zum StandAG (Fraktionen CDU/CSU, SPD und BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN 2017, S. 68) entnommen; darin heißt es, der erforderliche Sicherheitsabstand sei individuell abzuschätzen und betrage in der Regel mindestens einen Kilometer. Das ausgeschlossene Gebiet „wird von der Geländeoberkante vertikal in alle endlagerrelevante Tiefen projiziert“ (BGE 2020b).

Im Fall von Scheitelstörungen, „die im Deckgebirge von Salzstrukturen (z. B. Salzwälle und Salzdiapire) auftreten“ (BGE 2020b), wird von diesem Vorgehen abgewichen. Scheitelstörungen werden nur für das Deckgebirge von steilstehenden Salinaren als ausgeschlossene Gebiete angeführt, und

auch nur dann, wenn „der höchste Punkt der Salzstruktur unterhalb von 300 m“ (BGE 2020b) unter der Geländeoberkante (GOK)⁸ liegt. Das entspricht der Mindestteufe⁹ der Oberfläche des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (ewG)¹⁰ gemäß § 23 Abs. 5 Nr. 3 StandAG. Begründet wird dieses Vorgehen durch die Annahme eines grundsätzlich duktilen Verformungsverhalten von Steinsalz, durch das auch hohe Spannungen „in der Regel nicht zu spröder Deformation“ (BGE 2020b) führten und sich Störungszonen im Deckgebirge von Salzstöcken nicht innerhalb der Salinarstruktur fortsetzten. Damit bleibe die Barrierewirksamkeit einer Salzstruktur erhalten (BGE 2020i).

Diese Annahme wird in der Fachliteratur jedoch weit differenzierter diskutiert (bspw. Stück et al. (2020), Frisch und Kockel (2004)). Das Vorgehen der BGE hinsichtlich der Behandlung von Scheitelstörungen oberhalb von Salzstrukturen bedarf aus Sicht der Autoren einer detaillierteren Begründung und wissenschaftlichen Abstützung als im Zwischenbericht dargestellt und sollte im weiteren Verfahren in jedem Einzelfall überprüft werden. Da der Fernerkundung salinärer Gesteine mittels geophysikalischer Methoden enge Grenzen gesetzt sind, wird dies mutmaßlich nur durch Bohrungen oder im Rahmen der Erkundung aus einem Bergwerk heraus möglich sein.

Atektonische Vorgänge, d. h. Phänomene, die nicht durch tektonische Prozesse, sondern beispielsweise durch Verkarstung entstehen, aber für die Sicherheit eines Endlagers ähnliche Konsequenzen wie tektonische Störungen nach sich ziehen können, sind nach § 22 Abs. 2 Nr. 2 StandAG wie tektonische Störungen zu behandeln. Im Bericht „Anwendung Ausschlusskriterien gemäß § 22 Stand AG“ (BGE 2020b) werden folgende mögliche atektonische Vorgänge genannt: Deformationen durch Diagenese (nachträgliche Verfestigung eines Sediments unter dem Einfluss von Druck, Temperatur und weiteren Einflüssen), Senkungen und Einstürze über Lösungshohlräumen, subaerische und subaquatische Rutschungen (Rutschungsvorgänge an Land und unter Wasser, bspw. Muren oder durch Seebeben ausgelöste Rutschungen von Sedimenten an Kontinentalabhängen), Glazialtektonik, Kryoturbation (Bodenbewegungen aufgrund des Wechsels von Frost- und Tauperioden während Kaltzeiten) und Impaktereignisse (Meteoriteneinschläge). Von diesen wird Impaktereignissen und Einstürzen über Lösungshohlräumen eine mögliche Beeinflussung der Sicherheit des Endlagers zugeschrieben. Durch atektonische Vorgänge ausgeschlossene Gebiete wurden im Zwischenbericht Teilgebiete „analog zu aktiven Störungszonen“ ausgewiesen, indem „ein Sicherheitsabstand von 1000 m auf die jeweiligen atektonischen Vorgänge addiert wird“ (BGE 2020b).

Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit

Bei der Anwendung des Kriteriums *Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit* wird von der BGE zwischen Bohrungen einerseits und Bergwerken andererseits unterschieden.

Bohrdaten wurden von der BGE bei den zuständigen Landes- und Bundesbehörden zweimal, zunächst zur Anwendung der Ausschlusskriterien und anschließend für die Anwendung der Mindestanforderungen, abgefragt. Bohrungen, „deren Einwirkungsbereich den endlagerrelevanten Bereich von 300 bis 1500 m unter GOK“ (BGE 2020b) erreichen, wurden mit einem Sicherheitsradius von

⁸ Die Geländeoberkante (GOK) ist in den Geowissenschaften und in der Geotechnik die Bezeichnung für die natürliche oder anthropogene Erdoberfläche auf dem trockenen Land.

⁹ Die Teufe ist ein bergmännischer Ausdruck, mit dem die Tiefe unter der Geländeoberfläche beschrieben wird. Im vorliegenden Bericht wird der Begriff, wo sinnvoll möglich, durch den umgangssprachlichen Begriff Tiefe ersetzt.

¹⁰ Nach § 2 Nr. 9. StandAG ist der einschlusswirksame Gebirgsbereich „der Teil eines Gebirges, der bei Endlagersystemen, die wesentlich auf geologischen Barrieren beruhen, im Zusammenwirken mit den technischen und geotechnischen Verschlüssen den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle in einem Endlager gewährleistet“.

25 m um den Bohrlochverlauf ausgeschlossen. Vertikale Bohrungen bzw. Bohrungen, deren Verlauf unbekannt ist und die daher als vertikal angenommen werden, werden in der Kartendarstellung entsprechend als Punkte abgebildet, abgelenkte Bohrungen als Linien, die der Projektion des Bohrlochverlaufs an die Oberfläche entsprechen.

Daten zu Lage und Erstreckung von Bergwerken sowie „des durch die bergbauliche Tätigkeit geschädigten Gebirgsbereiches“ (BGE 2020b) wurden von der BGE in mehreren Datenabfragen von den zuständigen Landes- und Bundesbehörden angefordert; dabei wurde zwischenzeitlich die Methodik zur Kriterienanwendung weiterentwickelt. Vom weiteren Verfahren ausgeschlossen wurden Gebiete mit Bergwerken, deren Hohlräume im endlagerrelevanten Tiefenbereich von 300 bis 1500 m unter GOK liegen. Dabei wurden die Bereiche, in denen das Gebirge durch den Bergbau potentiell geschädigt sein kann, entweder anhand mitgelieferter Informationen oder durch die BGE selbst unter Zugrundelegung der maximalen horizontalen Ausdehnung des Grubengebäudes, der maximalen Tiefe und eines Grenzwinkels bestimmt.

Seismische Aktivität

Beim Ausschluss von Gebieten aufgrund des Kriteriums *seismische Aktivität* hat sich die BGE gemäß § 22 Abs. 2 Nr. 4. StandAG an der Kartendarstellung der Erdbebenzonen in DIN EN 1998-1/NA 2011-01 orientiert. Ausgeschlossen wurden Gebiete mit einer örtlichen seismischen Gefährdung größer als in Erdbebenzone 1. Dazu wurde die Konturlinie, die den Übergang zwischen den Erdbebenzonen 1 und 2 in der Kartendarstellung markiert, digitalisiert. Die Datenlieferungen für diese Zweck waren „sehr heterogen und enthielten [...] meist thematisch verwandte aber nur in wenigen Fällen die konkret erfragten Informationen“ (BGE 2020b). Hervorzuheben ist, dass der Nationale Anhang zur DIN EN 1998-1 zwischenzeitlich überarbeitet und im Juli 2021 veröffentlicht wurde. Die BGE beabsichtigt, den aktualisierten Anhang im weiteren Standortauswahlverfahren zu berücksichtigen.

Vulkanische Aktivität

Die BGE hat zur Anwendung des Ausschlusskriteriums *Vulkanische Aktivität* bei den Geologischen Diensten der Bundesländer und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) Daten zu Gebieten abgerufen, in denen quartärer¹¹ Vulkanismus stattgefunden hat oder innerhalb der nächsten Million Jahre Vulkanismus erwartet wird. Im Bericht zur Anwendung der Ausschlusskriterien (BGE 2020b) wird ausgeführt, dass Prognosen über zukünftigen Vulkanismus aus keinem Bundesland vorliegen.

Zur Ermittlung ausgeschlossener Gebiete wurde auf Grundlage einer Literaturlauswertung „die Verteilung quartärer Eruptionszentren herangezogen“ (BGE 2020b). Um die Eruptionszentren wurde ein Sicherheitsabstand von 10 km berücksichtigt.

Grundwasseralter

Durch das Ausschlusskriterium *Grundwasseralter* soll sichergestellt werden, dass in der Umgebung eines Endlagers keine Grundwässer existieren, die „am aktuellen hydrologischen Kreislauf teilnehmen“, so die Begründung des StandAG (Fraktionen CDU/CSU, SPD und BÜNDNIS 90/DIE

¹¹ Das Quartär ist die jüngste Periode der Erdgeschichte. Sie begann vor 2,6 Millionen Jahren und dauert bis in die Gegenwart an.

GRÜNEN 2017) und damit einen Schadstofftransport aus dem Endlager in den Lebensraum von Menschen ermöglichen. In der Gesetzesbegründung wird weiterhin darauf hingewiesen, dass „die Konzentration der Isotope Tritium [^3H] und Kohlenstoff-14 [^{14}C] im Grundwasser des vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereiches oder Einlagerungsbereiches“ (Fraktionen CDU/CSU, SPD und BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN 2017) als Bewertungsgrundlage herangezogen werden können.

Die BGE orientiert sich bei der ersten Anwendung der Ausschlusskriterien am Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd), der dazu in seinem Abschlussbericht 2002 festhielt: „Das Grundwasser im Wirtsgestein und einschlusswirksamen Gebirgsbereich eines Standortes (einer Region) sowie in sicherheitsrelevanten Bereichen ihrer Umgebung darf kein Tritium und/oder Kohlenstoff-14 enthalten“ (Appel et al. 2002). Da zum jetzigen Zeitpunkt weder einschlusswirksame Gebirgsbereiche noch Einlagerungsbereiche bekannt sind, wird „ein großräumiger Ausschluss von Gebieten auf Basis des Ausschlusskriteriums „Grundwasseralter““ seitens der BGE als „nicht zielführend“ beschrieben (BGE 2020b). Stattdessen „erfolgt eine punktuelle Ermittlung ausgeschlossener Gebiete“ (BGE 2020b).

In zwei Datenabfragen wurden Informationen zum Grundwasseralter, ^3H - und ^{14}C -Gehalten sowie Lage, Bezeichnung der hydrogeologischen Einheit etc. bei den Bundes- und Landesbehörden abgefragt. Im Ergebnis zeigt sich, dass alle Datenpunkte mit relevanten Informationen zum Grundwasseralter entweder durch Bohrungen oder Bergwerke bereits im Rahmen des Ausschlusskriteriums *Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit* erfasst sind. Es werden „insgesamt 58 Datenpunkte und 96 Linien“ ausgewiesen, durch die jedoch „kein zusätzlicher Ausschluss“ erfolgt (BGE 2020b).

4.2 Anwendung der Ausschlusskriterien im Landkreis Cuxhaven

Im Folgenden wird die Anwendung der Ausschlusskriterien durch die BGE innerhalb des Landkreises Cuxhaven, insbesondere im Bereich der Teilgebiete 067, 068 und 075, dargestellt und eine Bewertung hinsichtlich Nachvollziehbarkeit und Plausibilität vorgenommen.

Großräumige Vertikalbewegungen

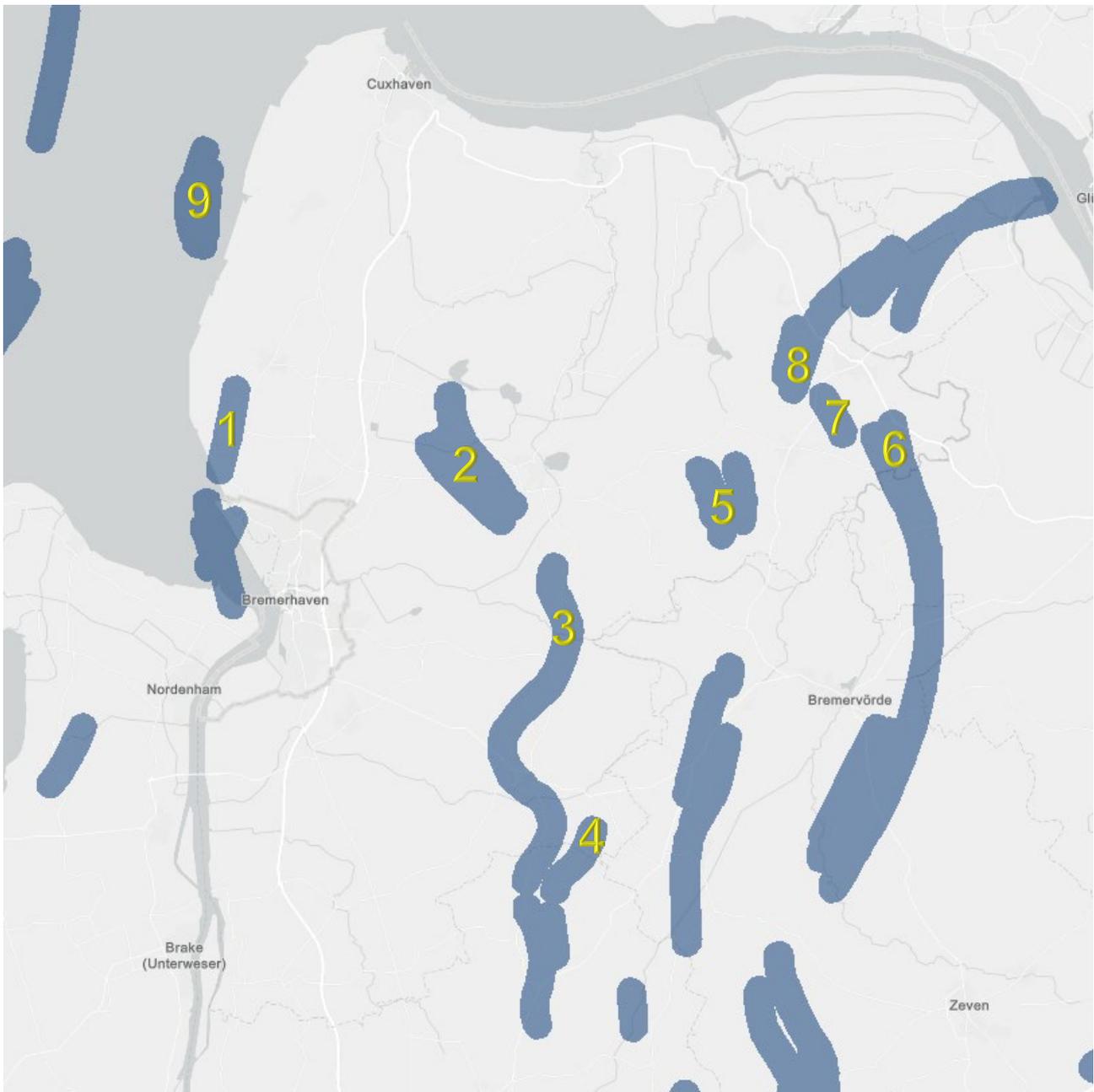
Durch Anwendung des Ausschlusskriteriums *großräumige Vertikalbewegungen* wird von der BGE im Rahmen des Zwischenberichts Teilgebiete kein Ausschluss vorgenommen; entsprechend wird auch im Landkreis Cuxhaven kein Gebiet aufgrund dieses Kriteriums ausgeschlossen. Die Begründung, Hebungsraten von 1000 m werden im Nachweiszeitraum nicht erreicht, ist auf Basis der vorliegenden Daten nachvollziehbar, sollte aber im Laufe des Verfahrens wissenschaftlich diskutiert werden. Möglicherweise entspricht das Ausschlusskriterium in seiner derzeitigen Form nicht den Erfordernissen einer auf Langzeitsicherheit gerichteten Berücksichtigung von Hebungsbewegungen der Erdkruste (siehe dazu auch Kapitel 6) und sollte präzisiert werden.

Für den Landkreis Cuxhaven hat die Anwendung dieses Kriteriums keine Auswirkung hinsichtlich des Standortauswahlverfahrens. Es ist nicht zu erwarten, dass das Kriterium bei erneuter Anwendung in den nächsten Phasen des Standortauswahlverfahrens zu einem Ausschluss eines der hier betrachteten Teilgebiete führt. Sollte das Kriterium im Rahmen des lernenden Verfahrens angepasst werden und beispielsweise im Rahmen zukünftiger Wechsel von Kalt- und Warmzeiten und damit einhergehender Vergletscherungen zu erwartende Hebungs- und Senkungsbewegungen berücksichtigen, wird eine angepasste Bewertung des Kriteriums auch für die Teilgebiete des Landkreises Cuxhaven nötig sein.

Aktive Störungszonen

Im Landkreis Cuxhaven sind insgesamt mindestens 32 *aktive Störungszonen* ausgewiesen worden. In den in Abbildung 4-1 dargestellten ausgeschlossenen Gebieten sind jeweils mehrere aktive Störungszonen verortet.

Abbildung 4-1: Aktive Störungszonen im Landkreis Cuxhaven



Quelle: BGE 2020f, bearbeitet

Die Ident.-Nummern der aktiven Störungszonen in den dargestellten ausgeschlossenen Gebieten können Tabelle 4-1 entnommen werden. In der Tabelle gelb unterlegte Störungszonen überlagern Teilgebietssegmente der Salzstöcke im Landkreis Cuxhaven. Sie führen nicht zu einem Ausschluss der darunterliegenden Salzstöcke durch die BGE. Dieser Umstand ist nur dadurch zu erklären, dass

diese Störungen von der BGE als Scheitelstörungen der darunterliegenden Salzstöcke interpretiert werden (siehe die Erläuterungen zu Scheitelstörungen in Kapitel 4.1). Die aktiven Störungszonen im ausgeschlossenen Gebiet Nr. 2 (Nummerierung gemäß Abbildung 4-1) überschneiden sich mit den Salzstöcken Westerwanna und Alfstedt aus Teilgebiet 067, die im ausgeschlossenen Gebiet Nr. 3 mit dem Salzstock Beverstedt (ebenfalls 067) und die im ausgeschlossenen Gebiet Nr. 5 mit dem Salzstock Armstorf (Teilgebiet 068). Alle anderen Störungszonen führen zu einem vollständigen Ausschluss des Gebiets.

Tabelle 4-1: Störungszonen im Landkreis Cuxhaven

Ausgeschlossenes Gebiet (Nr. gemäß Abbildung 4-1)	Störungszonen-Ident.			
1	0003597AG(2.1)	0004048AG(2.1)		
2	0002346AG(2.1)	0002349AG(2.1)	0003127AG(2.1)	0002833AG(2.1)
	0002832AG(2.1)	0002346AG(2.1)	0002345AG(2.1)	0002348AG(2.1)
	0002347AG(2.1)	0002350AG(2.1)		
3	0002146AG(2.1)	0003598AG(2.1)	0002686AG(2.1)	0003600AG(2.1)
4	0003599AG(2.1)			
5	0002143AG(2.1)	0003128AG(2.1)	0002835AG(2.1)	0002144AG(2.1)
6	0002893AG(2.1)	0002370AG(2.1)		
7	0003129AG(2.1)			
8	0003130AG(2.1)	0003162AG(2.1)	0002834AG(2.1)	0003164AG(2.1)
	0003163AG(2.1)	0002499AG(2.1)	0003611AG(2.1)	0003608AG(2.1)
9	0002342AG(2.1)	0002343AG(2.1)	0002344AG(2.1)	0002771AG(2.1)
	0003122AG(2.1)	0003123AG(2.1)		

Quelle: Daten aus der interaktiven Kartendarstellung zum Zwischenbericht Teilgebiete (BGE 2020f)

Die Anwendung des Ausschlusskriteriums *Aktive Störungszonen* im Zwischenbericht Teilgebiete durch die Vorhabenträgerin ist nachvollziehbar. Der Umgang mit Scheitelstörungen an Salzstöcken sollte im weiteren Verfahren überarbeitet werden. Wie in Kapitel 4.1 dargestellt ist die Annahme, dass Scheitelstörungen sich nicht in den Gesteinskörper des Salinars fortsetzen und grundsätzlich nicht in Zusammenhang mit Sockelstörungen an der Salzstockbasis stehen, stark vereinfachend. Bei der Ausweisung von Standortregionen im nächsten Verfahrensschritt sollten Scheitelstörungen aufgrund aller vorliegenden Informationen jeweils im Detail bewertet werden, insbesondere dann, wenn sie von Scheitelgräben oder parallel zum Störungsmuster angelegten glazialen Rinnenbildungen begleitet werden (siehe dazu auch die Ausführungen zu Abwägungskriterium 11 in Kapitel 6.1.1 ff).

Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit

Aus der interaktiven Kartendarstellung zum Zwischenbericht Teilgebiete (BGE 2020f) geht hervor, dass im Landkreis Cuxhaven kein Ausschluss aufgrund stillgelegter oder in Betrieb befindlicher Bergwerke vorgenommen wurde. Es wurden jedoch eine größere Zahl von Bohrungen als ausgeschlossene Gebiete markiert. Auch ausgeschlossene Gebiete aufgrund von Bohrungen können nur mittels der interaktiven Karte zum Zwischenbericht Teilgebiete identifiziert werden. Sie werden ebenfalls nur mit einer Ident.-Nr. bezeichnet, nicht jedoch mit den Namen der Bohrungen. Eine Zuordnung

der ausgeschlossenen Gebiete konnte mit Hilfe der Bohrpunktkarten der BGR¹² und des niedersächsischen Landesamtes für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG)¹³ vorgenommen werden. Auf Bohrungen, die sich auf der Fläche von Teilgebieten oder in deren unmittelbarer Nähe befinden und für die Bewertung der Ausweisung von Teilgebieten relevant sein können, wird im Folgenden näher eingegangen.

Im nördlichen Segment des Teilgebiets 067 wird nördlich von Lüdingworth die Bohrung mit der Ident.-Nr. 0027029AG(3.2) mit einem Radius von 25 m ausgeschlossen. Es handelt sich wahrscheinlich um die Bohrung Altenbruch 1, die eine Tiefe von 1260 m unter GOK erreicht. Etwa 1000 m südwestlich, knapp außerhalb des Teilgebiets 067, befindet sich zudem die Bohrung Altenbruch 2. Auch diese Bohrung wurde als ausgeschlossenes Gebiet mit der Ident.-Nr. 0027030AG(3.2) gekennzeichnet. In beiden Bohrungen wurden Gesteine des Rotliegenden erbohrt (siehe dazu Kapitel 5.2)

Weiter sind auf der Fläche des mittleren Segments des Teilgebiets 067, das sich zwischen den Ortschaften Neuenwalde und Hainmühlen in Nordwest-Südost-Richtung erstreckt, zwei Bohrungen von der BGE als ausgeschlossene Gebiete gekennzeichnet worden. Nordöstlich von Hymendorf befindet sich die Bohrung Westerwanne 1001 mit der Ident.-Nr. 0033638AG(3.2). Westlich von Alfstedt wurde mit der Ident.-Nr. 0033680AG(3.2) die Bohrung Alfstedt 1 ausgeschlossen. Westlich der Fläche dieses Teilgebietssegments wurde darüber hinaus die Tiefbohrung Alfstedt 2 mit der Ident.-Nr. 0027047AG(3.2) ausgeschlossen. Die Bohrung Westerwanne 1001 erreichte eine Tiefe von 480,3 m unter GOK in Gesteinen der Oberkreide. Die Bohrung Alfstedt 2 wurde bis in eine Tiefe von 1809 m unter GOK vorgetrieben und erbohrte dabei Sedimente des Unterjura. In der Bohrung Alfstedt 1 wurden in Tiefen zwischen 693,80 m und der Endtiefe von 804,90 m unter GOK Gesteine des Zechsteins angetroffen (siehe dazu auch Kapitel 5.2).

Im Salzstock Osterbruch, dem nördlichsten Segment des Teilgebiets 068 im Landkreis Cuxhaven, wurde zwischen den Ortschaften Belum und Bülsdorf die Bohrung Neuhaus 1 mit der Ident.-Nr. 0035343AG(3.2) aus dem Standortauswahlverfahren ausgeschlossen. Mit der Ident.-Nr. 0033646AG(3.2) wurde im Ort Osterbruch zudem die Bohrung Osterbruch 1 ausgeschlossen. Etwa vier Kilometer östlich wurde bei Auestade, knapp außerhalb der Fläche des Teilgebiets 068, die Tiefbohrung Odisheim 1 mit der Ident.-Nr. 0027060AG(3.2) ausgeschlossen. In den Bohrungen Neuhaus 1 und Osterbruch 1 wurden Rotliegend-Gesteine erbohrt, die Bohrung Odisheim 1 erreichte ihre Endtiefe bei 1509,5 m unter GOK in Gesteinen des Keupers. Eine weitere Bohrung im Teilgebiet 068 wurde im Bereich des Salzstocks Odisheim mit der Ident.-Nr. 0033639AG(3.2) ausgeschlossen. Es handelt sich um die Bohrung Monopol 1, die eine Endtiefe von 955,5 m unter GOK in Gesteinen des Zechsteins erreicht. Im südlichen Segment des Teilgebiets 068 wurde die Bohrung Basdahl 1 mit der Ident.-Nr. 0035413AG(3.2) ausgeschlossen.

Im Teilgebiet 075 wurden nahe Westersode die drei Bohrungen Varel, B1-Varrel und Westersode 2 mit den Ident.-Nr. 0035354AG(3.2), 0022876AG(3.2) und 0035351AG(3.2) ausgeschlossen. Alle Bohrungen erreichten Endtiefen um 907 m. Ein Schichtenverzeichnis für die Bohrung Westersode 2 ist nicht verfügbar, die anderen Bohrungen erreichten Gesteine der Kreide. Zwischen Lamstedt und Laumühlen wurden die Bohrungen Hemmoor 2 mit der Ident.-Nr. 0027058AG(3.2) und UE 63 Ihlbeck mit der Ident.-Nr. 0022878AG(3.2) ausgeschlossen. In Hemmoor 2 wurde in einer Endtiefe von

¹² <https://boreholemap.bgr.de/mapapps/resources/apps/boreholemap/index.html?lang=de>

¹³ <https://nibis.lbeg.de/cardomap3/?permalink=2UtzQkmr#>

1766,60 m unter GOK Keuper-Steinsalz erbohrt. Die Bohrung UE 63 Ihlbeck erreichte nur eine Tiefe von 329 m unter GOK in tertiären Gesteinen (siehe dazu auch Kapitel 5.2).

Im südlichsten Segment des Teilgebiets 075, das sich südlich von Bremerhaven, östlich der Ortschaft Sandstedt erstreckt, befinden sich die drei Bohrungen Kassebruch T2 (1.), Kassebruch T2 (2.) und Kassebruch 1. Beide Bohrungen Kassebruch T2 haben den gleichen Bohransatzpunkt; sie wurden entweder direkt benachbart abgeteuft oder die erste Bohrung mit der folgenden Bohrung vertieft. Ihre Ident.-Nr. sind 0027056AG(3.2) und 0027057AG(3.2). Sie lassen sich, da sie in der Kartendarstellung direkt übereinander liegen, nicht einer der beiden Bohrungen zuordnen. Im Folgenden werden sie daher als eine Bohrung behandelt. Etwa einen Kilometer nordöstlich liegt die Bohrung Kassebruch 1 mit der Ident.-Nr. 0027054AG(3.2) (siehe auch Kapitel 5.2).

Die Methodik zum Ausschluss von Gebieten auf Grund bergbaulicher Tätigkeit ist nachvollziehbar. Offen bleibt, warum die Schichtenverzeichnisse der betreffenden Bohrungen nicht zur Anwendung der Mindestanforderungen bzw. zur Verifizierung der aus 3D-Modellen entnommenen Informationen zu Teufenlage und Mächtigkeit der relevanten Wirtsgesteine herangezogen wurden (siehe dazu auch Kapitel 5.2). Im Nachgang der Veröffentlichung des Zwischenberichts Teilgebiete wurden ab dem 10. Juni 2021 über die interaktive Kartendarstellung der BGE Schichtenverzeichnisse veröffentlicht, die im Zwischenbericht Teilgebiete zur Bewertung herangezogen wurden. Keines davon befindet sich auf dem Gebiet des Landkreises Cuxhaven.

Seismische Aktivität

Aufgrund des Kriteriums *Seismische Aktivität* wurde im Bereich des Landkreises Cuxhaven kein Ausschluss vorgenommen. Seismisch aktive Gebiete befinden sich im Wesentlichen im Westen und Südwesten des Bundesgebiets.

Vulkanische Aktivität

Das Ausschlusskriterium *vulkanische Aktivität* führte im Landkreis Cuxhaven zu keinem Ausschluss. Die Gebiete, die aufgrund quartären Vulkanismus' ausgeschlossen wurden, befinden sich ausschließlich in der Eifel bzw. im Gebiet des Egergrabens.

Unter der Maßgabe, im ersten Schritt des Standortauswahlverfahrens den ungerechtfertigten Ausschluss möglicherweise geeigneter Gebiete zu vermeiden, kann die Anwendung des Ausschlusskriteriums *Vulkanische Aktivität* als nachvollziehbar angesehen werden (siehe auch Chaudry und Neles (2020)). Allerdings wurden durch diese Anwendung große Gebiete, für die in der Zukunft unter Umständen Vulkanismus erwartet werden kann, außer Acht gelassen. Dies betrifft beispielsweise die Gebiete, in denen tertiärer Vulkanismus nachgewiesen ist. So wies auch die BGR in ihrem Vortrag zum Ausschlusskriterium *Vulkanische Aktivität* während des ersten Beratungstermins der Fachkonferenz Teilgebiete darauf hin, dass sowohl Gebiete mit zukünftigem Vulkanismus bisher nicht ausgeschlossen wurden als auch das Neuaufreten oder das Wiederaufleben älterer Vulkane im Zwischenbericht unberücksichtigt blieb. Auch die Verlagerung vulkanischer Aktivität wurde demnach bisher außer Acht gelassen (May 2021).

Das Ausschlusskriterium *Vulkanische Aktivität* wurde somit im vorliegenden Schritt des Standortauswahlverfahrens nur unvollständig angewendet. Im weiteren Verfahren sollte geprüft werden, inwieweit die Einbeziehung tertiärer Eruptionszentren und eines größeren Sicherheitsabstands bei der Anwendung des Kriteriums notwendig sind (siehe dazu auch May (2019)). Auch unter Einbeziehung

tertiären Vulkanismus‘ ist jedoch im Gebiet des Landkreises Cuxhaven nicht mit einem Ausschluss zu rechnen.

Grundwasseralter

Im Gebiet des Landkreises Cuxhaven wurden drei Ausschlüsse aufgrund des Grundwasseralters vorgenommen. Die Datenpunkte mit den Ident-Nr. 0000091AG(6.0), 0000019AG(6.0) und 0000037AG(6.0) im Dreieck zwischen den Ortschaften Berensch, Altenwalde und Oxstedt stimmen mit der Lage der vier hydrogeologischen Aufschlussbohrungen Oxstedter Heide I bis III sowie UE 93 Klein Helmers-Berg überein. Wie in Kapitel 4.1 ausgeführt, erfolgt durch das Kriterium Grundwasseralter kein zusätzlicher Ausschluss über die zugehörigen Bohrlöcher hinaus.

Die Methodik zur Anwendung des Kriteriums im Rahmen des Zwischenberichts Teilgebiete kann aufgrund der zur Verfügung stehenden Datenlage nachvollzogen werden. Im weiteren Verfahren müssen standortspezifische Beprobungen vorgenommen werden. Da der Landkreis Cuxhaven durch mächtige quartäre Lockersedimente und teils schwach verfestigte tertiäre Sedimentgesteine geprägt ist, können ein hydraulischer Anschluss auch tieferer Grundwasserstockwerke an oberflächennahe Grundwasserleiter und damit das Auftreten junger Grundwässer in der Umgebung potentiell geeigneter Wirtsgesteine nicht ausgeschlossen werden.

5 Wirtsgesteine und Mindestanforderungen

Im Folgenden werden die fünf Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG sowie die Methodik der Anwendung im Zwischenbericht Teilgebiete dargestellt. Die Ergebnisse, die sich daraus für den Landkreis Cuxhaven ergeben, werden für jedes Ausschlusskriterium erläutert und Schlussfolgerungen diskutiert (Kapitel 5.2).

5.1 Anwendungsmethodik

Die in § 23 StandAG festgelegten Mindestanforderungen werden auf potentielle Wirtsgesteine angewandt, die auf Grundlage der stratigraphischen Tabelle von Deutschland und vertiefender Informationen wie Bohrdaten, 3D-Modellen etc. ausgewiesen werden (siehe auch Kapitel 2). Die BGE hat Informationen zu den Mindestanforderungen in zwei Datenabfragen bei den zuständigen Bundes- und Landesbehörden abgerufen und dazu, analog zur Datenabfrage für Ausschlusskriterien, eine Arbeitshilfe (BGE 2018) formuliert. Auf Grundlage der erhaltenen Daten wurde die Erfüllung der Mindestanforderungen für Gebiete, die nicht durch ein Ausschlusskriterium aus dem Verfahren ausgeschlossen sind, von der BGE überprüft.

Gemäß § 23 Abs. 1 StandAG werden bei der Standortauswahl nur die Wirtsgesteine Steinsalz, Tongestein und Kristallingestein in Betracht gezogen. Im Fachbericht zur Anwendung der Mindestanforderungen werden die möglichen Wirtsgesteine definiert. Als Steinsalz in steiler Lagerung, der Wirtsgesteinstyp, der die Teilgebiete 067 und 068 aufbaut, werden demnach Salzstrukturen bezeichnet, „bei denen die Deckgebirgsschichten infolge eines zunehmenden Salzaufstiegs durchbrochen wurden“ (BGE 2020c). Steinsalzschichten, die entsprechend ihrer ursprünglichen Entstehung flach lagern, werden von der BGE als stratiforme Steinsalzformationen bezeichnet (siehe Fußnote 4 in Kapitel 2). Dies trifft auf das Teilgebiet 075 zu.

Da der komplexe innere Aufbau eines Salzstocks „ohne detaillierte Kenntnisse der jeweiligen Salzstruktur nicht beschrieben werden“ (BGE 2020c) kann, wird von der BGE zunächst die gesamte Salzstruktur als Wirtsgestein betrachtet. Wichtig ist dabei, „dass Halit der gesteinsbildende Hauptbestandteil“ (BGE 2020c) ist. Das wird seitens der BGE immer dann als gegeben angesehen, wenn die im Schichtenverzeichnis von Bohrungen verwendeten Gesteinsnamen auf Steinsalz als Hauptkomponente hinweisen (BGE 2020c).

Als Ton oder Tonstein werden Sedimentgesteine bezeichnet, die überwiegend (mediane Korngröße) aus Mineralkörnern mit einer Korngröße von weniger als 0,002 mm zusammengesetzt sind. Während das schwach verfestigte, plastisch verformbare Lockersediment als Ton bezeichnet wird, handelt es sich bei Tonsteinen um diagenetisch¹⁴ verfestigte tonige Gesteine. Von der BGE werden im Standortauswahlverfahren sowohl Ton als auch Tonstein in der Bezeichnung Tongesteine zusammengefasst. Sowohl das Festgestein Tonstein als auch das Lockergestein Ton werden als mögliches Wirtsgestein betrachtet.

¹⁴ Als Diagenese wird die Umwandlung von Lockersedimenten in Festgesteine durch die Wirkung von Druck und chemischen Reaktionen bezeichnet. Nach Füchtbauer (1988) werden unter Begriff alle mechanischen und chemischen Vorgänge zusammengefasst, die ein Sediment von seiner Ablagerung bis zum Beginn einer Metamorphose, der Veränderung durch Druck und Temperatur bei tieferer Versenkung in die Erdkruste, verändern.

Im Folgenden wird die Anwendung der einzelnen Mindestanforderungen für Steinsalz in steiler und stratiformer Lagerung und für Tongestein dargestellt. Die Anwendung für die Teilgebiete im Landkreis Cuxhaven werden in Kapitel 5.2 diskutiert und die Anwendung bewertet.

Gebirgsdurchlässigkeit

Für Steinsalz sowie für Tongestein wird in dieser Phase des Standortauswahlverfahrens grundsätzlich angenommen, dass aufgrund deren bekannter Eigenschaften die Gebirgsdurchlässigkeit ausreichend gering ist (BGE 2020c), um die Mindestanforderung, eine Gebirgsdurchlässigkeit von weniger als 10^{-10} m/s, zu erfüllen. Widersprechende Erkenntnisse liegen bisher nicht vor.

Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs

Nach § 23 Abs. 5 Nr. 2 StandAG muss der Gebirgsbereich, der den einschlusswirksamen Gebirgsbereich aufnehmen soll, mindestens 100 m mächtig sein. Im Fachbericht der BGE zur Anwendung der Mindestanforderungen (BGE 2020c) wird dargestellt, dass „für alle steil stehenden Salzstrukturen, die eine Mächtigkeit von mindestens 100 m aufweisen, [...] diese Mindestanforderung im jetzigen Verfahrensschritt als erfüllt“ gilt.

Als Mächtigkeit des ewG in Teilgebieten in Tongestein wurde die Mächtigkeit der stratigraphischen Einheit, in der sich das Tongestein befindet, innerhalb der Suchparameter von 300 m bis 1500 m unter GOK, angegeben. Als Tongestein ausgewiesene stratigraphische Einheiten bestehen in aller Regel nicht nur aus Ton, sondern auch aus gröberen Gesteinspartikeln wie Silt oder Sand. Im Fachbericht zur Anwendung der Mindestanforderungen wird ausgeführt, dass in als relevante Abfolge identifizierten stratigraphischen Einheiten auch Gesteinsformationen enthalten sein können, die die Mindestanforderungen nicht erfüllen; es lägen allerdings Hinweise vor, die grundsätzlich belegten, dass Tongesteine dieser stratigraphischen Einheit in ausreichender Mächtigkeit vorkommen könnten (BGE 2020c). Diese ungenaue Vorgehensweise im ersten Schritt des Standortauswahlverfahrens wird auf die geringe stratigraphische Auflösung der zur Kriterienanwendung genutzten 3D-Modelle zurückgeführt.

Für Steinsalz in stratiformer Lagerung wird durch die BGE analog zu Tongesteinen vorgegangen. Auch hier erfüllt in der Regel nicht die gesamte stratigraphische Einheit die Anforderungen, die an ein Wirtsgestein für ein Endlager zu stellen sind. Im Fachbericht zur Anwendung der Mindestanforderungen wird jedoch darauf hingewiesen, dass „Informationen aus Bohrungen überwiegend als Beleg für die Erfüllung der Mindestanforderung“ (BGE 2020c) dienen.

Minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs

Die generelle Anforderung, dass die Oberfläche des ewG mindestens 300 m unter der Geländeoberkante liegen muss, wird in § 23 Abs. 5 Nr. 3 StandAG für Steinsalz in steiler Lagerung ergänzt um das Vorhandensein einer Salzscheibe von mindestens 300 m Mächtigkeit, d. h. eines Bereiches von mindestens 300 m Salz, der oberhalb des ewG zum Schutz gegen Erosion und Wasserzutritt stehen bleiben soll. Für die Ausweisung von Teilgebieten betrachtet die BGE mit Vorhandensein einer 300 m mächtigen Salzscheibe auch die Mindestanforderung von 300 m Abstand zur Geländeoberkante als erfüllt. Dabei wird lediglich die Mächtigkeit des Salzstocks zur Bewertung herangezogen; lässt sich aus den genutzten 3D-Modellen oder anderen Informationen der Schluss ableiten, dass innerhalb einer Salzstruktur 400 m Mächtigkeit erreicht werden – 300 m Salzscheibe + 100 m Mindestmächtigkeit – wird die Anforderung als erfüllt angesehen.

Für Teilgebiete in Tongesteinen wird die Mindestanforderung als erfüllt angesehen, wenn sie Tiefen von mehr als 300 m unter GOK erreichen. Die zusätzliche Anforderung an Tongesteine gemäß § 23 StandAG, dass eine Beeinträchtigung des ewG durch Dekompaktion¹⁵ des Tongesteins nach einer Schädigung des Deckgebirges durch intensive Erosion, beispielsweise in der Folge von Eiszeiten, ausgeschlossen werden kann, kann nach Aussage der Vorhabenträgerin „derzeit nicht beantwortet werden“ und wird daher „grundsätzlich als erfüllt angesehen“ (BGE 2020c).

Für Vorkommen von Steinsalz in stratiformer Lagerung wird analog zum Vorgehen für Tongesteine verfahren und die Mindestanforderung als erfüllt angesehen, wenn die Gesteine Tiefen von mehr als 300 m unter GOK erreichen. Anteile des Gesteinskörpers, die höher als 300 m unter GOK liegen, werden, wie auch bei Tongesteinen, nicht berücksichtigt. Eine Salzschwebe von 300 m analog zu Steinsalzvorkommen in steiler Lagerung wird für Steinsalz in stratiformer Lagerung durch das StandAG nicht gefordert.

Fläche des Endlagers

Für Gebiete mit Steinsalz in steiler Lagerung wird, wie in der Begründung zum Gesetzentwurf des StandAG (Fraktionen CDU/CSU, SPD und BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN 2017) für das Wirtsgestein Salz vorgeschlagen, eine Fläche von 3 km² als Mindestflächenbedarf angenommen. Die Fläche der maximalen Ausdehnung wurde für Salinare unter Zuhilfenahme geologischer 3D-Modelle berechnet und die Mindestanforderung als erfüllt angesehen, wenn eine horizontale Ausdehnung von mindestens 3 km² vorliegt.

Bei Tongestein wurde die maximale Ausdehnung des potentiellen Wirtsgesteins mit Hilfe von geologischen 3D-Modelle oder 2D-Karten ermittelt und die Mindestanforderung bei einer horizontalen Ausdehnung von 10 km², ebenfalls angelehnt an die Begründung zum StandAG (Fraktionen CDU/CSU, SPD und BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN 2017) als erfüllt angesehen (BGE 2020c).

Auch für den Flächenbedarf für ein Endlager im Wirtsgestein Steinsalz in stratiformer Lagerung wird ein Flächenbedarf von 3 km² angenommen. Zur Methodik der Flächenermittlung in Gebieten mit stratiformem Steinsalz enthält der Fachbericht zu den Mindestanforderungen (BGE 2020c) keinen Hinweis. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass die Flächenermittlung analog zu den Wirtsgesteinen Tongestein und Steinsalz in steiler Lagerung mittels 3D-Modellen und Karten erfolgte.

Erhalt der Barrierewirkung

Die Mindestanforderung *Erhalt der Barrierewirkung* stellt eine Negativ-Anforderung dar: Informationen, die gegen einen Erhalt der Barrierewirkung über den Zeitraum von einer Million Jahren sprechen, dürfen nicht vorliegen. Die BGE übernimmt den Gesetzestext fast wörtlich in den Fachbericht zu den Mindestanforderungen. Demnach wird die Mindestanforderung als nicht erfüllt angesehen, wenn „klare Erkenntnisse oder Daten vorliegen, dass der Erhalt der Barrierewirkung zweifelhaft erscheint“ (BGE 2020c). Eine konkrete Abfrage nach Daten und Informationen, die gegen den Erhalt

¹⁵ Wie in Kapitel 2 ausgeführt entstehen Tongesteine durch Sedimentation feiner Gesteinspartikel z.B. in Seen oder Meeresbecken. Durch die Auflast jüngerer Gesteine werden sie im Laufe der Erdgeschichte zusammengedrückt, d. h. kompaktiert. Wenn die Auflast durch überlagernde Gesteine verringert wird, z.B. durch Erosion, können Tongesteine dekompaktieren und bestimmte Eigenschaften, die sie als Wirtsgestein qualifizieren, verlieren.

der Barrierewirkung von Gesteinseinheiten über den geforderten Zeitraum sprechen, erfolgt der Arbeitshilfe (BGE 2018) zufolge nicht.

5.2 Anwendung der Mindestanforderungen für die Teilgebiete im Landkreis Cuxhaven

Im Vergleich zu den Ausschlusskriterien werden die Mindestanforderungen von Seiten der BGE deutlich weniger umfangreich diskutiert. Da es auch hier Interpretationsspielraum gibt, wäre eine im Detail tiefere Diskussion hinsichtlich der konkreten Umsetzung wünschenswert. Die erneute Anwendung von Mindestanforderungen im Rahmen des Standortauswahlverfahrens nach § 16 Abs. 2 StandAG erfolgt erst nach übertägiger Erkundung der nach § 14 Abs. 1 StandAG ermittelten Standortregionen.

Auf dem Gebiet des Landkreises Cuxhaven erfüllen die Salzstöcke Altenbruch/Westerwanna/Alfstedt/Beverstedt (067), Armstorf/Odisheim/Osterbruch (068) und die Salzstruktur Glückstadt-Graben, nördliches Norddeutsches Becken (075) sowie Tongesteine des Tertiär und des Unterjura (Tabelle 5-1) alle Mindestanforderungen und werden als identifizierte Gebiete ausgewiesen.

Darüber hinaus wurden auch für die Salinare Krautsand (IG 148_00IG_S_s_z-ro), Spieka/Cuxhaven (IG 157_00IG_S_s_z-ro) und Bramel (IG 161_00IG_S_s_z-ro) sowie Tongesteine der Unterkreide, die am nördlichen Rand des norddeutschen Beckens gebildet wurden (IG 202_01IG_T_f_kru), alle Mindestanforderungen als erfüllt angesehen und die Gebiete als identifizierte Gebiete ausgewiesen. Sie wurden im weiteren Verfahren nach Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien ausgeschlossen und deshalb nicht als Teilgebiete benannt. Daher werden sie im Folgenden nicht betrachtet.

Tabelle 5-1: Zuordnung Nummerierungen identifizierter Gebiete zu Teilgebieten

Regionalgeologische Einheit / Strukturname	Teilgebiets-Nr.	Identifiziertes Gebiet
Norddeutsches Becken	004	053_00IG_T_f_tpg
Norddeutsches Becken	006	188_00IG_T_f_ju
Altenbruch/Westerwanna/Alfstedt/Beverstedt	067	159_00IG_S_s_z-ro
Basdah/ Armstorf/Odisheim/ Osterbruch/Belmlusen/ Süderhastedt/ Tellingstedt/ Pahlhude/ Grevenhorst	068	163_00IG_S_s_z-ro
Glückstadt-Graben, nördliches Norddeutsches Becken	075	189_01IG_S_f_km

Quelle: Eigene Darstellung

Im Detail wird jedes identifizierte Gebiet in Form eines Steckbriefs in der Anlage IG-Steckbriefe (BGE 2020e) dargestellt. Jeder Steckbrief besteht aus einem Lageplan und einer tabellarischen Zusammenstellung von Charakteristika. Diese werden ergänzt durch einen Profilschnitt und einen Textteil, der in die Abschnitte „Allgemeine Geologie“ und „Lokale, spezifische Geologie“ gegliedert ist. Die im tabellarischen Teil wiedergegebenen Informationen zur Bewertung der Mindestanforderungen sind in Tabelle 5-2 zusammengestellt. Der Textabschnitt der Anlage IG-Steckbriefe (BGE 2020e) enthält keine standort- oder gebietsspezifischen Informationen, sondern lediglich allgemeine Informationen zur Geologie von Norddeutschland und der Entstehung von Salinargesteinen bzw. der jeweiligen Tongesteine.

Die Ermittlung von identifizierten Gebieten im Rahmen der Anwendung der Mindestanforderungen fußt im Wesentlichen auf generischen Annahmen. Dies gilt insbesondere für die Mindestanforderungen *Gebirgsdurchlässigkeit* und *Erhalt der Barrierewirkung*. Wie in Kapitel 5.1 ausgeführt sind für das Wirtsgestein Tongestein darüber hinaus auch die Mindestanforderungen hinsichtlich Mächtigkeit und minimaler Teufe nur in vereinfachter Form angewendet worden.

Die Anwendung der Mindestanforderungen in steilstehenden Salinargesteinen erfolgte auf Grundlage der „in den geologischen 3D-Modellen der Länder ausgewiesenen Salzdiapire“ (BGE 2020c) und wurde nur im Falle des Fehlens von Daten durch Informationen aus dem InSpEE¹⁶-Bericht (BGR 2016a) ergänzt. Vorhandene lokale Daten, z. B. aus den Schichtenverzeichnissen von Bohrungen, die bei der Anwendung des Ausschlusskriteriums *Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit* erfasst wurden, spielten bei der Anwendung der Mindestanforderungen auf Salzstöcke keine Rolle.

Für die Anwendung der Mindestanforderungen auf Gebiete mit Tongestein und Steinsalz in stratiformer Lagerung wurde ähnlich wie für Steinsalz in steiler Lagerung vorgegangen. Die Anforderungen wurden anhand von 3D-Modellen geprüft und nur in Fällen, in denen keine Modelle vorlagen, auf die „Auswertung geowissenschaftlicher Karten [...] und Bohrungsdaten“ (BGE 2020c) zurückgegriffen.

Gemäß BGE (2020c) wurde für die Anwendung der Mindestanforderungen in Gebieten mit Steinsalz in steiler Lagerung die minimale Teufenlage des potentiellen ewG angegeben, bei der „die geforderte 300 m mächtige Salzscheibe oberhalb eines potentiellen ewG“ berücksichtigt wurde. Ausgehend von der den geologischen 3D-Modellen der Länder entnommenen Lage des Strukturtops, also des höchsten Punkts eines Salzstocks, wurde demnach die minimale Tiefe des ewG jeweils 300 m unterhalb des Strukturtops angenommen. Deshalb muss eine Abweichung der Tiefenangaben zu Salzstöcken in den Angaben des Zwischenberichts Teilgebiete von Literaturwerten um 300 m erwartet werden.

Aus der Zusammenstellung in Tabelle 5-2 geht die rein generische Anwendung der Mindestanforderungen *Gebirgsdurchlässigkeit* und *Erhalt der Barrierewirkung* hervor. Es ist jeweils nur die Feststellung „erfüllt“ bzw. für Steinsalz in steiler Lagerung grundsätzlich der Wert 10^{-12} m/s angegeben¹⁷. Spezifische Informationen aus dem Gebiet des Landkreises Cuxhaven sind nicht in die Bewertung eingeflossen.

¹⁶ Im Forschungsprojekt InSpEE wurde das Informationssystem über Salzstrukturen (BGR 2016a) als Planungsgrundlage, für Auswahlkriterien und zur Potenzialabschätzung für die Errichtung von Salzkavernen zur Speicherung von erneuerbaren Energien (Wasserstoff und Druckluft) erstellt. Unter anderem wurden Datenblätter zu allen norddeutschen Salzstöcken zusammengestellt.

¹⁷ Dieser Wert wird in Anlage 1 zu § 24 Abs. 3 StandAG als Obergrenze für eine günstige Bewertung des Indikators Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit des Gesteinstyps innerhalb des geowissenschaftlichen Abwägungskriteriums zur Bewertung des Transports radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich aufgeführt.

Tabelle 5-2: Charakteristika der betrachteten Teilgebiete zur Anwendung der Mindestanforderungen

	TG 004	TG 006
Wirtsgesteinstyp	Tongestein	Tongestein
Stratigraphie	Paläogen (Tertiär)	Lias (Unterjura)
Bundesländer	Niedersachsen, Bremen, Hamburg, Schleswig-Holstein, Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg, Berlin und Sachsen-Anhalt	Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen, Sachsen-Anhalt, Schleswig-Holstein
Gebirgsdurchlässigkeit	erfüllt	erfüllt
Mächtigkeit	max. 1055 m	max. 1200 m
Teufenlage der Struktur	400 - 1500 m u. GOK	400 - 1500 m u. GOK
Gesamtfläche	62.885 km ²	18.564 km ²
Barriereintegrität	erfüllt	erfüllt

	TG 067	TG 068	TG 075
Wirtsgesteinstyp	Steinsalz in steiler Lagerung	Steinsalz in steiler Lagerung	Steinsalz in stratiformer Lagerung
Stratigraphie	Zechstein / Rotliegend (Perm)	Zechstein / Rotliegend (Perm)	Mittlerer Keuper
Bundesländer	Niedersachsen	Niedersachsen, Schleswig-Holstein, teilweise unterhalb der Elbe	Hamburg, Niedersachsen und Schleswig-Holstein
Gebirgsdurchlässigkeit	10 ⁻¹² m/s	10 ⁻¹² m/s	erfüllt
Mächtigkeit	750 m	700 m	max. 880 m (Keuper)
Teufenlage der Struktur	730 – 1500 m u. GOK	800 – 1500 m u. GOK	640-1500 m u. GOK (Keuper)
Gesamtfläche	59 km ²	274 km ²	475 km ²
Barriereintegrität	erfüllt	erfüllt	erfüllt

Quelle: Eigene Darstellung nach (BGE 2020e)

Das pauschale Vorgehen bei der Anwendung der Mindestanforderung *Gebirgsdurchlässigkeit* erscheint plausibel im ersten Schritt der Phase 1 des Standortauswahlverfahrens. Im weiteren Verfahren werden gezielt Daten zur Ermittlung der Gebirgsdurchlässigkeit in Standortregionen bzw. an Standorten mit den Wirtsgesteinen Steinsalz oder Tongestein erhoben werden müssen.

Gleiches gilt für die Anwendung der Mindestanforderung *Erhalt der Barrierewirkung*. Aufgrund fehlender Informationen erfolgte keine standortspezifische Betrachtung. Informationen, die Zweifel an der langfristigen Barrierewirkung von Wirtsgesteinen begründen, können auf eine Fülle von

möglichen Ursachen zurückgeführt werden: die lithologische¹⁸ Ausprägung des Gesteins und seiner Umgebung, sedimentäre Strukturen, tektonische Überprägungen etc. könnten beispielsweise dazu herangezogen werden. Die Anforderung ist wesentlich für das Ziel einer sicheren Endlagerung und beinhaltet die Herausforderung, zu einer sehr umfassenden Kenntnis des möglichen späteren Standorts zu kommen. Bei der erneuten Anwendung der Mindestanforderungen sollte detailliert dargestellt werden, welche Informationsquellen zur Bewertung der Anforderung *Erhalt der Barrierewirkung* herangezogen wurden. Im Fall von Tongesteinen ist diese Anforderung darüber hinaus in direkter Beziehung zur Gefahr einer Dekompaktion von Tongesteinen nach intensiver Erosion zu sehen, die nach § 23 Abs. 5 Nummer 3. StandAG als Teil der Mindestanforderung *minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs* zu bewerten ist und bisher von der Vorhabenträgerin pauschal als erfüllt angesehen wird. Auch diese Mindestanforderung muss im weiteren Verfahren standortspezifisch bewertet werden.

Im Folgenden wird jeweils auf die Anwendung der Mindestanforderungen *Mächtigkeit*, *Minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs* und *Fläche des Endlagers* für das Teilgebiet 067 sowie die Segmente der Teilgebiete 004, 006, 068 und 075 im Landkreis Cuxhaven eingegangen.

5.2.1 Teilgebiet 004: Tongesteine des Tertiärs

Das Teilgebiet 004 umfasst, wie in Kapitel 3.1 dargestellt, Tonsteine des Tertiärs, genauer des unteren Eozäns und oberen Paläozäns, in weiten Teilen von Norddeutschland. Es erstreckt sich auf einer Fläche von 62.885 km² über die Bundesländer Niedersachsen, Bremen, Hamburg, Schleswig-Holstein, Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg, Berlin, Sachsen-Anhalt. Weite Teile des Landkreises Cuxhaven wurden als Teilgebiet 004 ausgewiesen (siehe Abbildung 5-1).

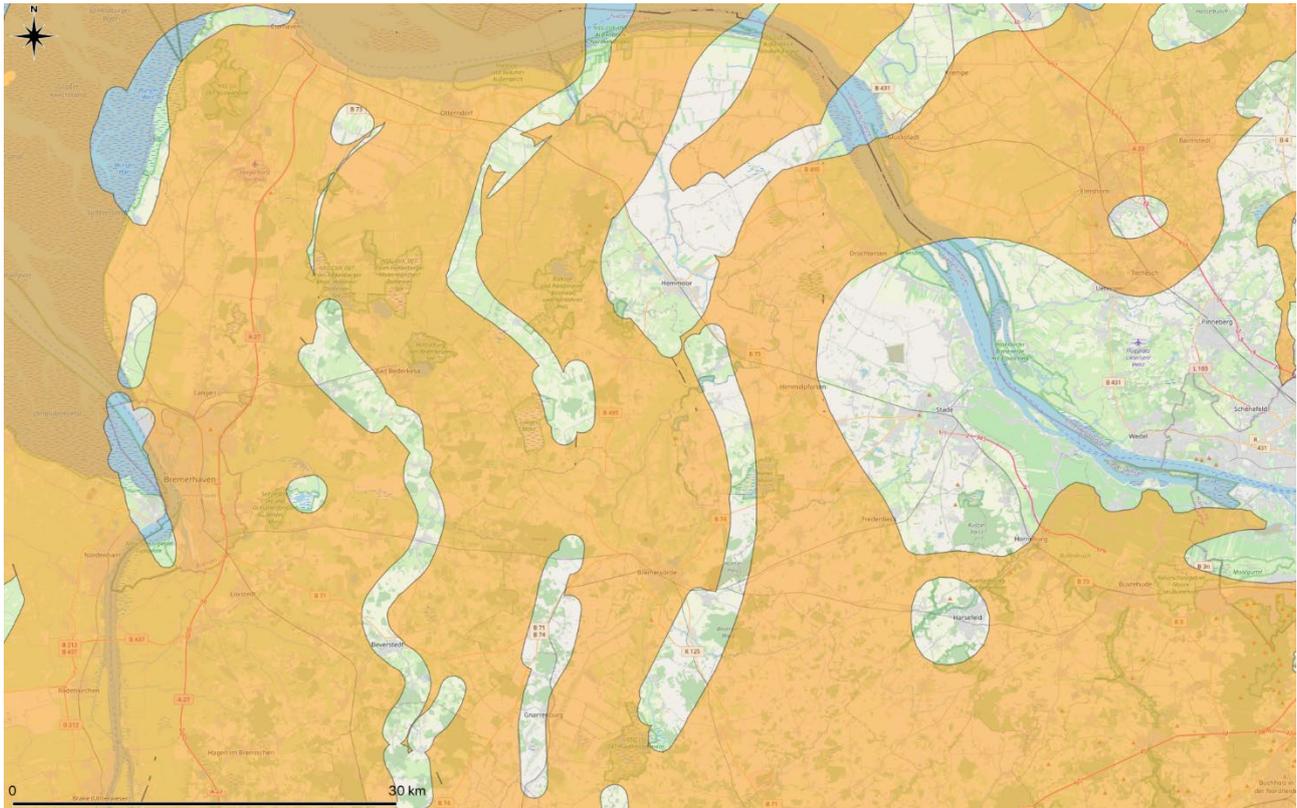
Die Angaben zur Anwendung der Mindestanforderungen im Zwischenbericht beziehen sich auf das gesamte Teilgebiet. Nach dem IG-Steckbrief wird die Mächtigkeit mit 100-1060 m angegeben, die „Teufenlage der Basisfläche“ (BGE 2020e) mit 400-1500 m und die Gesamtfläche mit 62.885 km². Damit erfüllt das Gebiet die Mindestanforderungen hinsichtlich des Flächenbedarfs, der Teufenlage und der Mächtigkeit. Inwieweit diese pauschale Bewertung der Mindestanforderungen auf den Landkreis Cuxhaven übertragbar ist, lässt sich nur stichprobenartig bewerten. Dazu werden im Folgenden drei Tiefbohrungen im Landkreis Cuxhaven betrachtet, die im Teilgebiet 004 liegen.

In der Bohrung B 8 – Wingst wurden in einer Tiefe von 286 m bis in eine Tiefe von 770 m unter GOK Tongesteine erbohrt, die wahrscheinlich dem Eozän zuzuordnen sind. Im Schichtenverzeichnis ist die stratigraphische Einordnung in das Eozän mit einem Fragezeichen versehen worden. Nach den Ergebnissen der Bohrung liegen also Tongesteine mit einer ausreichenden Mächtigkeit in der geforderten Tiefe vor.

Nach dem Schichtenverzeichnis der Bohrung B 10 – Oxstedt stehen in einer Tiefe zwischen 400 und 490 m Tiefe unter GOK schwach kiesige Tongesteine des Eozäns an; weiter wird auch zwischen 490 und 710 m unter GOK Eozän angegeben, allerdings ohne lithologische Informationen. Auch im Untergrund von Oxstedt befinden sich demnach Gesteine des Eozän, die unter Umständen die geforderten Gesteinseigenschaften, eine ausreichende Tiefe und Mächtigkeit aufweisen.

¹⁸ Als Lithologie wird die Lehre von der Zusammensetzung eines (Sediment-)Gesteins hinsichtlich Mineralbestand und Korngröße bezeichnet.

Abbildung 5-1: Das Teilgebiet 004 im Landkreis Cuxhaven



Quelle: Eigene Darstellung. Erstellt mit QGis, Kartengrundlage OpenStreetMap, Shape-Daten des Teilgebiets bereitgestellt von der BGE mbH unter <https://www.bge.de/de/endlagersuche/wesentliche-unterlagen/zwischenbericht-teilgebiete/>

In der Bohrung Alfstedt 2, südwestlich von Bad Bederkesa, wurden in einer Tiefe von 450 – 853 m unter GOK Gesteine des Unter-Eozän und Paläozän erbohrt. Angaben zum Gesteinstyp sind dem Schichtenverzeichnis nicht zu entnehmen. Auch hier stehen damit Gesteine des gesuchten Alters an. Das Vorkommen erfüllt die Mindestanforderungen hinsichtlich Mächtigkeit und Teufenlage.

Die Angaben zur Fläche des Teilgebiets 004 im Zwischenbericht beziehen sich auf die Fläche des gesamten Gebiets in Norddeutschland. Die Segmente im Landkreis Cuxhaven verfügen jedoch jeweils über eine ausreichende Fläche, um die Mindestanforderung, die die BGE für die Ausweisung von Teilgebieten mit 10 km² annimmt (BGE 2020c), zu erfüllen.

Die Vorgehensweise zur Berechnung der für das Endlager bzw. einen ewG zur Verfügung stehenden Fläche wird im Fachbericht (BGE 2020c) nicht im Detail dargestellt. Eine Prüfung der von der BGE zur Verfügung gestellten Shape-Dateien mit Hilfe des Geoinformationssystems QGis legt nahe, dass die angegebenen Flächen lediglich aus der Projektion der maximalen Flächenausdehnung des Gesteinskörpers, wie sie in der Kartendarstellung wiedergegeben wird, berechnet wurde. Für alle fünf Teilgebiete bzw. identifizierten Gebiete im Landkreis Cuxhaven stimmen diese Angaben überein. Allerdings wird keine Beziehung zwischen den dargestellten und berechneten Flächen und der jeweils vorhandenen Mächtigkeit, die lokal sehr unterschiedlich sein kann, hergestellt. Auch die Darstellung der Vorgehensweise im Fachbericht (BGE 2020c) untermauert die Annahme, dass die im Zwischenbericht angegebene Mächtigkeit identifizierter Gebiete nicht für die gesamte angegebene Fläche besteht. Entsprechend kann aufgrund der vorliegenden Informationen auch nicht davon

ausgegangen werden, dass die erforderliche Mindestmächtigkeit des Wirtsgesteins über die gesamte dargestellte Fläche der identifizierten Gebiete und Teilgebiete im Landkreis Cuxhaven erfüllt ist.

Generell führt die Anwendungsmethodik auf Gesteinseinheiten, die sich über mehrere tausend Quadratkilometer erstrecken, zu sehr ungenauen Angaben, die sich nicht auf einzelne Segmente dieser Gebiete übertragen lassen. Die Stichproben aus drei Bohrungen zeigen aber, dass es im Landkreis Cuxhaven möglich sein kann, Tongesteine des Eozäns und Paläozäns in ausreichender Tiefe und Mächtigkeit anzutreffen. Die Methodik zur Anwendung der Mindestanforderungen erscheint, bezogen auf das Teilgebiet 004, nachvollziehbar. Am Vergleich der Angaben des IG-Steckbriefs mit den Schichtenverzeichnissen von Bohrungen auf der Fläche des Gebiets wird dies deutlich. Bei erneuter Anwendung der Mindestanforderungen im weiteren Verfahren sollte geprüft werden, ob die nicht gekoppelte Anwendung der Anforderungen Fläche und Mächtigkeit, wie sie im Zwischenbericht Teilgebiete vorgenommen wurde, den Vorgaben des StandAG entspricht.

5.2.2 Teilgebiet 006: Tongesteine des unteren Jura

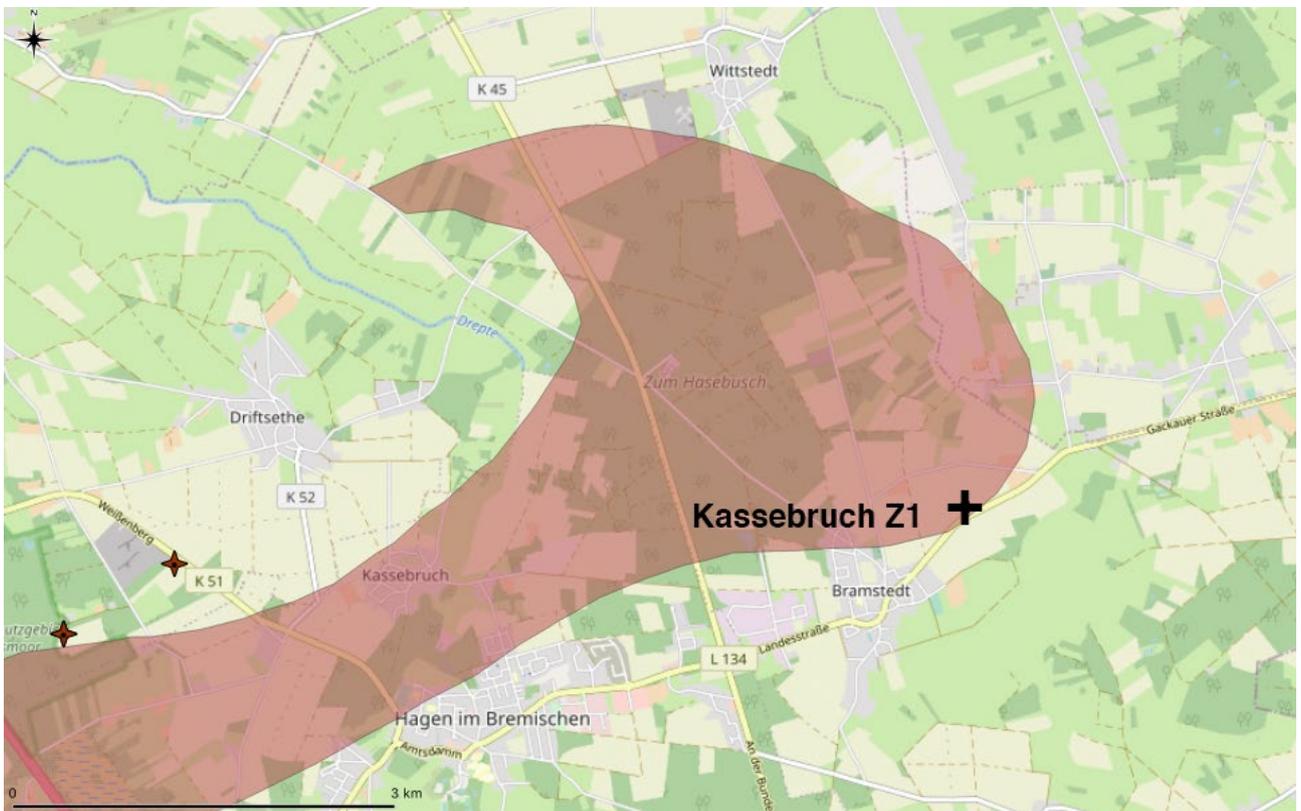
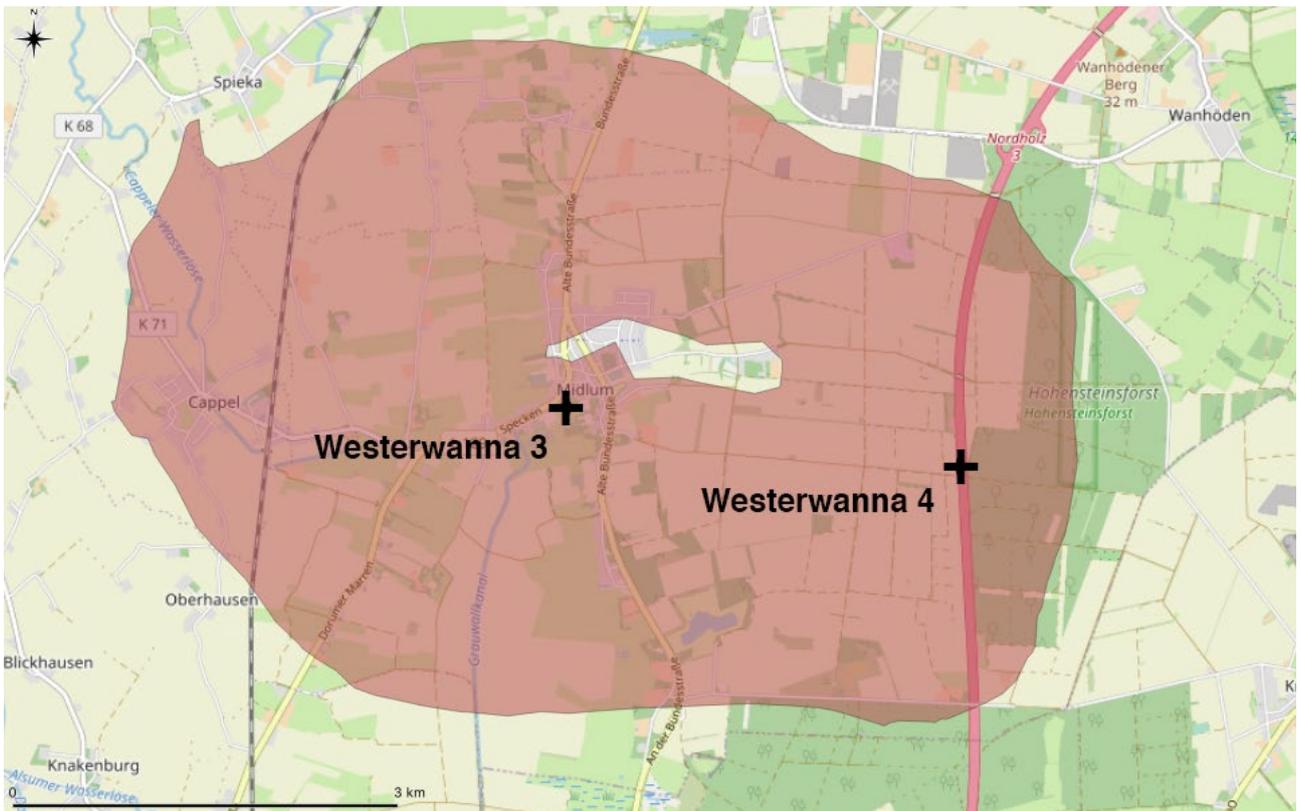
Im IG-Steckbrief für das Teilgebiet 006 wird die Mächtigkeit mit maximal 1200 m angegeben, die „Teufenlage der Strukturbasis“ (BGE 2020e) mit 400-1500 m und die Gesamtfläche mit 18564 km². Da das Teilgebiet Unterjura-Gesteine in ganz Norddeutschland umfasst, können die tatsächlichen Verhältnisse im Landkreis Cuxhaven davon deutlich abweichen.

Im nördlichen Segment (siehe Abbildung 5-2) wurden zwei Bohrungen mit den Bezeichnungen Westerwanna 3 und Westerwanna 4 in eine Tiefe von mehr als 1500 m abgeteuft. Gesteine des Unterjura wurden in der Bohrung Westerwanna 3 in einer Tiefe von 1073 – 1189 m unter GOK erbohrt, in der Bohrung Westerwanna 4 in 1129 – 1409,2 m Tiefe unter GOK. Auch im südlichen Segment des Teilgebiets 006 wurden in der Bohrung Kassebruch Z1 die Gesteine des Unterjura in einer Tiefe von 1397 – 1503 m unter GOK angetroffen.

Während die Mindestanforderungen im Zwischenbericht Teilgebiete nur sehr pauschal für ein großes Verbreitungsgebiet von Unterjura-Gesteinen bewertet wurden, existieren für den Landkreis Cuxhaven demnach Bohrungen, die das Vorkommen von Unterjura-Gesteinen mit ausreichender Mächtigkeit innerhalb der von der BGE festgelegten maximalen Suchtiefe von bis zu 1500 m (siehe dazu (BGE 2020i, Kapitel 4.1.5) bestätigen. Die Schichtenverzeichnisse der Bohrungen enthalten allerdings keine Angaben zur Lithologie der Unterjura-Gesteine. Daher kann anhand der vorliegenden Informationen keine Aussage dazu getroffen werden, ob die Unterjura-Gesteine im Landkreis Cuxhaven tonig ausgebildet sind und damit als Endlager-Wirtsgestein in Frage kommen.

Die Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“ kann für die beiden Teilgebietssegmente aufgrund ihrer Fläche in der interaktiven Karte (BGE 2020f), die jeweils größer als 10 km² ist, als erfüllt angenommen werden. Bei dieser Fläche handelt es sich um die Projektion des Teilgebietssegmentes an die Oberfläche. Im Zwischenbericht Teilgebiete sind keine weiteren Informationen zur Raumlage enthalten. Entsprechend erlaubt die Darstellung im Zwischenbericht Teilgebiete keinen Rückschluss darauf, ob eine ausreichende horizontale Fläche zur Errichtung eines Endlagers auch innerhalb des Gesteinskörpers zur Verfügung steht.

Abbildung 5-2: Bohrungen im Teilgebiet 006 im Landkreis Cuxhaven



Quelle: Eigene Darstellung. Erstellt mit QGIS, Kartengrundlage OpenStreetMap, Shape-Daten des Teilgebiets bereitgestellt von der BGE mbH unter <https://www.bge.de/de/endlagersuche/wesentliche-unterlagen/zwischenbericht-teilgebiete/>

Die Ergebnisse der Anwendung der Mindestanforderungen zu Mächtigkeit und minimaler Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs sowie zur Fläche des Endlagers im Rahmen des Zwischenberichts Teilgebiete für das Teilgebiet 006 im Landkreis Cuxhaven sind nachvollziehbar. Ob die Vorkommen von Unterjura-Gesteinen im Landkreis Cuxhaven tatsächlich zur Errichtung eines Endlagers geeignet sind, kann wahrscheinlich erst durch standortspezifische Untersuchungen in den weiteren Schritten des Standortauswahlverfahrens ermittelt werden.

5.2.3 Teilgebiet 067: Salzstöcke Altenbruch/Westerwanna/Alfstedt/Beverstedt

Wie oben dargestellt, erfolgte die Anwendung der Mindestanforderungen *Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs*, *Minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs* und *Fläche des Endlagers* im Wesentlichen auf Grundlage von 3D-Modellen der geologischen Landesämter, in diesem Fall des niedersächsischen Landesamts für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG). Für das identifizierte Gebiet Altenbruch/Westerwanna/Alfstedt/Beverstedt werden im IG-Steckbrief folgende Angaben zu diesen Mindestanforderungen gemacht:

- Eine Mächtigkeit von 750 m
- Eine Teufenlage der Struktur von 730-1500 m unter GOK
- Eine Gesamtfläche von 59 km²

Diese Werte wurden mit veröffentlichten Literaturdaten abgeglichen. Aus den Datenblättern des Forschungsprojekts InSpEE (BGR 2016c; 2016e; 2016b; 2016i) zu den vier Salzstöcken (siehe Tabelle 5-3), die von der BGE zum identifizierten Gebiet 159_00IG_S_s_z-ro bzw. Teilgebiet 067 zusammengefasst wurden, lässt sich entnehmen, dass jeder der Salzstöcke eine Sekundärmächtigkeit von mindestens 5000 m aufweist. Die Fläche jedes einzelnen der vier Salzstöcke beträgt mehr als 3 km².

Die Teufenlage des Strukturtops wird für die Salzstöcke Westerwanna und Altenbruch jeweils mit 1002 m u. GOK angegeben, für Beverstedt mit 914 m u. GOK und für Alfstedt mit 505 m u. GOK. Laut Jaritz (1983) erreicht der Salzstock Altenbruch „nirgends eine geringere Teufe als ca. 1000 m unter NN“. Für den Salzstock Beverstedt wird die Kulmination, d. h. der höchste Punkt der Salzstockoberfläche, mit „knapp 1000 m unter NN“ angegeben, für Westerwanna mit „ca. 1100 m unter NN“ (Jaritz 1983). Zum Salzstock Alfstedt wird angegeben, „nur unbedeutende Teile“ lägen „weniger als 700 m unter NN“ (Jaritz 1983).

Tabelle 5-3: Strukturinformationen zu den Salzstöcken Altenbruch/Westerwanna/Alfstedt/Beverstedt (Teilgebiet 067)

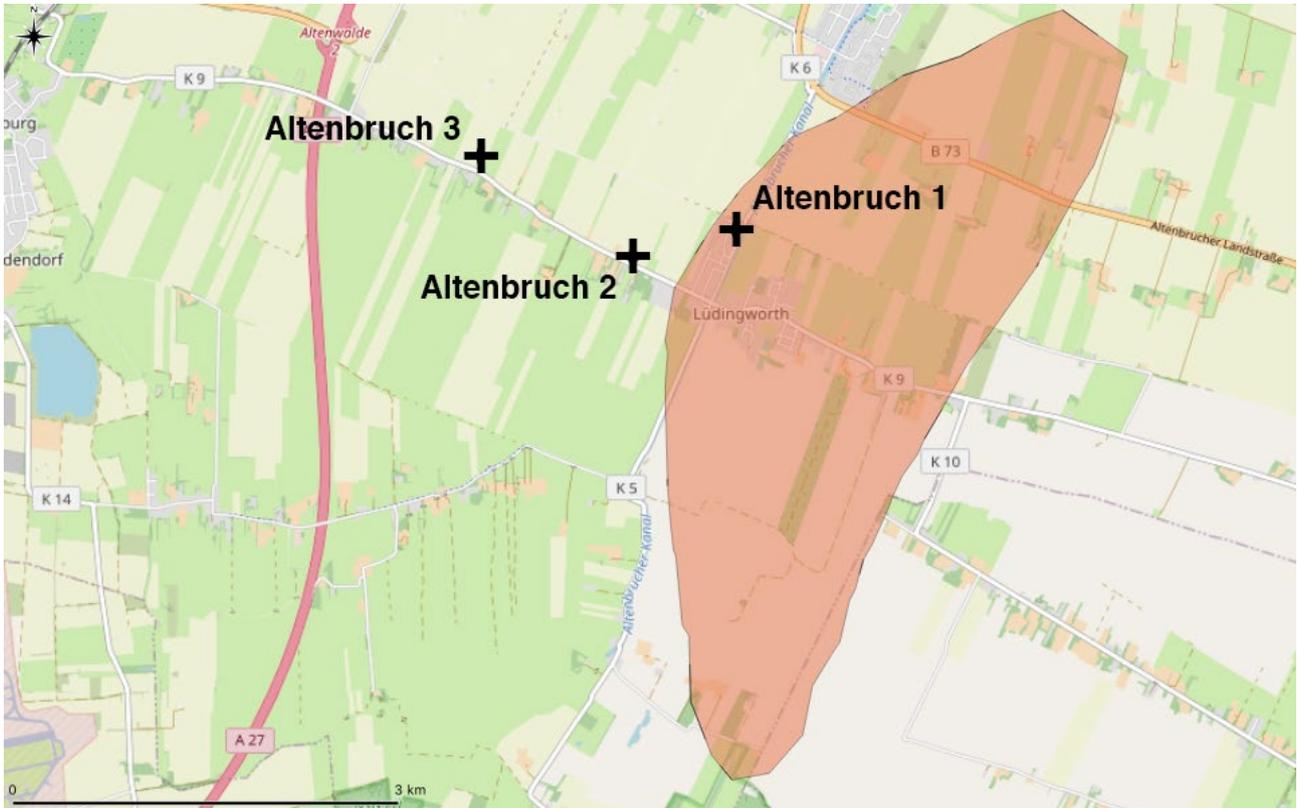
	Altenbruch	Westerwanna	Alfstedt	Beverstedt
Strukturtop [m u. GOK]	1002	1002	505	914
Sekundärmächtigkeit [m]	5000	5000	5500	5100
Maximalausdehnung [km]	14 x 6	10 x 4.5	16 x 4.5	12 x 4.5

Quelle: Eigene Darstellung mit Daten aus (BGR 2016a)

Im Bereich des Teilgebiets 067 wurden in der Vergangenheit eine Reihe von Bohrungen abgeteuft. Im nördlichen Segment des Teilgebiets, dem Salzstock Altenbruch, befinden sich die Bohrungen Altenbruch 1 bis 3 (siehe Abbildung 5-3). In der Bohrung Altenbruch 3 wurde kein Steinsalz des Zechsteins oder Rotliegenden erbohrt. Die Bohrung endete in 1630 m Tiefe unter GOK in Gesteinen

des mittleren Keupers. In der Bohrung Altenbruch 2 erteufte in 1461 m Tiefe unter GOK Gesteine des Rotliegenden. In der Bohrung Altenbruch 1 konnten Gesteine des Rotliegenden ab einer Tiefe von 1090 m bis zur Endtiefe von 1260 m unter GOK angetroffen werden. Ob es sich bei diesen Rotliegend-Gesteinen jeweils um Salinargesteine handelt, geht aus den Schichtenverzeichnissen der Bohrungen nicht hervor.

Abbildung 5-3: Bohrungen im Bereich des Salzstocks Altenbruch

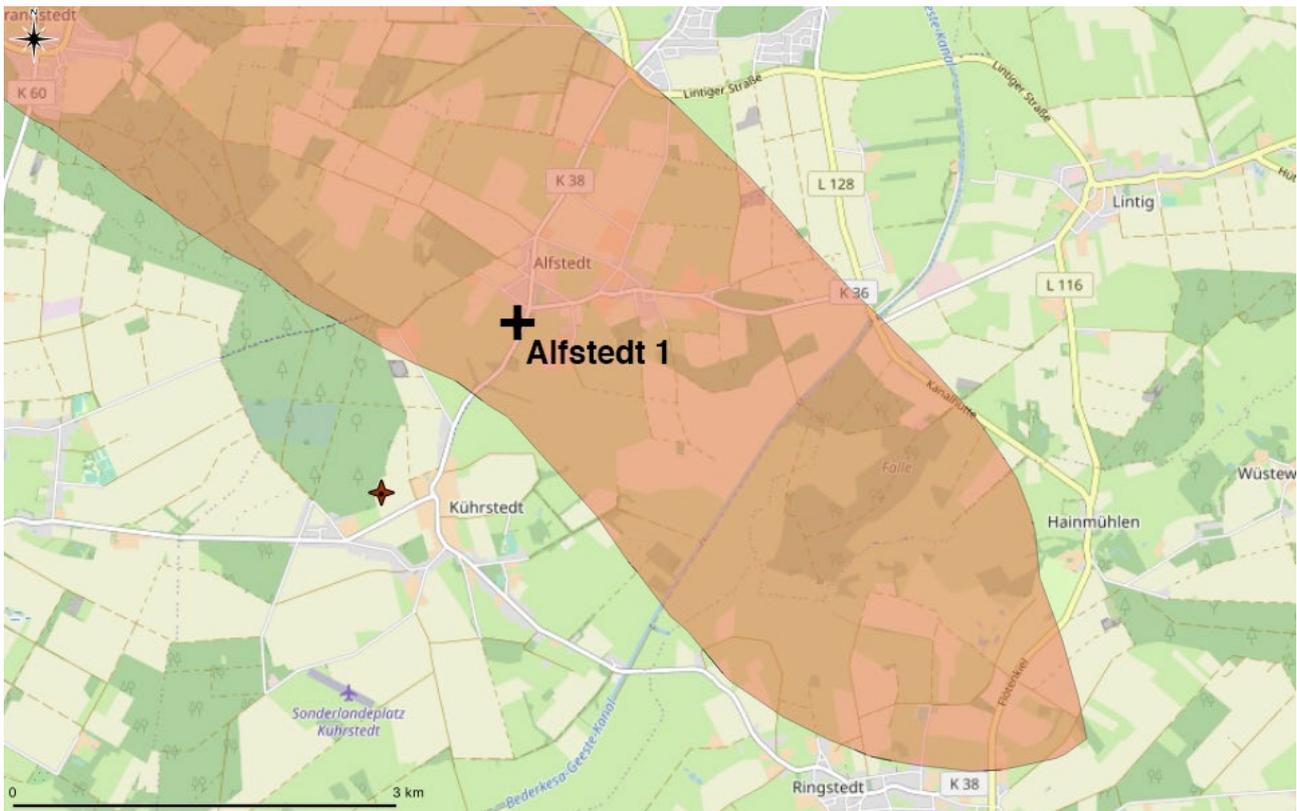


Quelle: Eigene Darstellung. Erstellt mit QGIS, Kartengrundlage OpenStreetMap, Shape-Daten des Teilgebiets bereitgestellt von der BGE mbH unter <https://www.bge.de/de/endlagersuche/wesentliche-unterlagen/zwischenbericht-teilgebiete/>

Im größten Segment des Teilgebiets 067 wurden in der Bohrung Alfstedt 1 (siehe Abbildung 5-4) ab einer Tiefe von 693,80 m unter GOK Gesteine des Zechsteins erbohrt. Von einer Tiefe von 749 m bis zur Endtiefe von 804,90 m unter GOK handelt es sich nach dem Schichtenverzeichnis um Steinsalz.

Wie in Kapitel 3.2 ausgeführt, wird das Teilgebiet 067 als Doppelsalinar bezeichnet, das aus Salinargesteinen des Rotliegenden und des Zechsteins besteht. Die oben genannten Bohrungen bestätigen diesen Befund hinsichtlich des Wirtsgesteins. Aus der Bohrung Alfstedt 1 geht hervor, dass Steinsalz auch innerhalb der im Zwischenbericht Teilgebiete angegebenen Tiefe ansteht.

Abbildung 5-4: Bohrung Alfstedt 1 im Teilgebiet 067



Quelle: Eigene Darstellung. Erstellt mit QGIS, Kartengrundlage OpenStreetMap, Shape-Daten des Teilgebiets bereitgestellt von der BGE mbH unter <https://www.bge.de/de/endlagersuche/wesentliche-unterlagen/zwischenbericht-teilgebiete/>

Ausgehend von den Strukturinformationen des Forschungsprojekts InSpEE, müsste der höchste Punkt der Salzmauer Altenbruch/Westerwana/Alfstedt/Beverstedt bei 505 m unter GOK und nach Abzug einer Salzscheibe von 300 m bei 805 m unter GOK liegen. Das steht im Widerspruch zur Angabe im Zwischenbericht Teilgebiete (750 m). Hinsichtlich der Bewertung der Mindestanforderung ergibt sich durch diese Diskrepanz jedoch keine Änderung.

Gleiches gilt für die Angaben zur Mächtigkeit; durch die tiefere Lage des Strukturtops gemäß den Literaturdaten von 805 m müsste die Mächtigkeit innerhalb der Suchparameter bis zu einer Tiefe von 1500 m mit 695 m angegeben werden. Für die Erfüllung der Mindestanforderung spielt dieser Unterschied keine Rolle.

Die Fläche des Teilgebiets wurde als Summe über alle Segmente berechnet. Jedes einzelne der drei Segmente des Teilgebiets 067 ist darüber hinaus groß genug, um die Mindestanforderung eines Flächenbedarfs von 3 km², die die BGE bei der Bearbeitung zu Grunde legt, zu erfüllen.

Die Methodik der Anwendung der Mindestanforderungen für das Teilgebiet 067 ist nachvollziehbar. Durch Nutzung der vorhandenen Literaturdaten und Schichtenverzeichnisse zusätzlich zur Auswertung des niedersächsischen 3D-Modells wäre eine präzisere Charakterisierung des Teilgebiets möglich gewesen.

5.2.4 Teilgebiet 068: Salzstöcke Armstorf/Odisheim/Osterbruch

Wie in Kapitel 3.2 dargestellt, befinden sich nur Teile des identifizierten Gebiets bzw. Teilgebiets Basdahl / Armstorf / Odisheim / Osterbruch / Belmhusen / Süderhastedt / Tellingstedt / Pahlhude / Grevenhorst innerhalb des Landkreises Cuxhaven. Für diese Segmente, die Salzstöcke Armstorf, Odisheim und Osterbruch, werden im IG-Steckbrief folgende Angaben zu den Mindestanforderungen *Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs*, *Minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs* und *Fläche des Endlagers* gemacht:

- Eine Mächtigkeit von 700 m
- Eine Teufenlage der Struktur von 800-1500 m unter GOK
- Eine Gesamtfläche von 274 km²

Diese Daten wurden mit veröffentlichten Literaturdaten abgeglichen. Aus den Datenblättern des Forschungsprojekts InSpEE (BGR 2016d; 2016f; 2016g) zu den drei Salzstöcken (siehe Tabelle 5-4), lässt sich entnehmen, dass jeder der Salzstöcke eine Sekundärmächtigkeit von mindestens 5000 m aufweist. Die Fläche jedes einzelnen der vier Salzstöcke beträgt mehr als 3 km².

Tabelle 5-4: Strukturinformationen zu den Salzstöcken Armstorf/Odisheim/Osterbruch (Teilgebiet 068)

	Armstorf	Odisheim	Osterbruch
Strukturtop [m u. GOK]	1007	800	601
Sekundärmächtigkeit [m]	5300	5500	6000
Maximalausdehnung [km]	18 x 4	12 x 6.5	15 x 5

Quelle: Eigene Darstellung mit Daten aus (BGR 2016a)

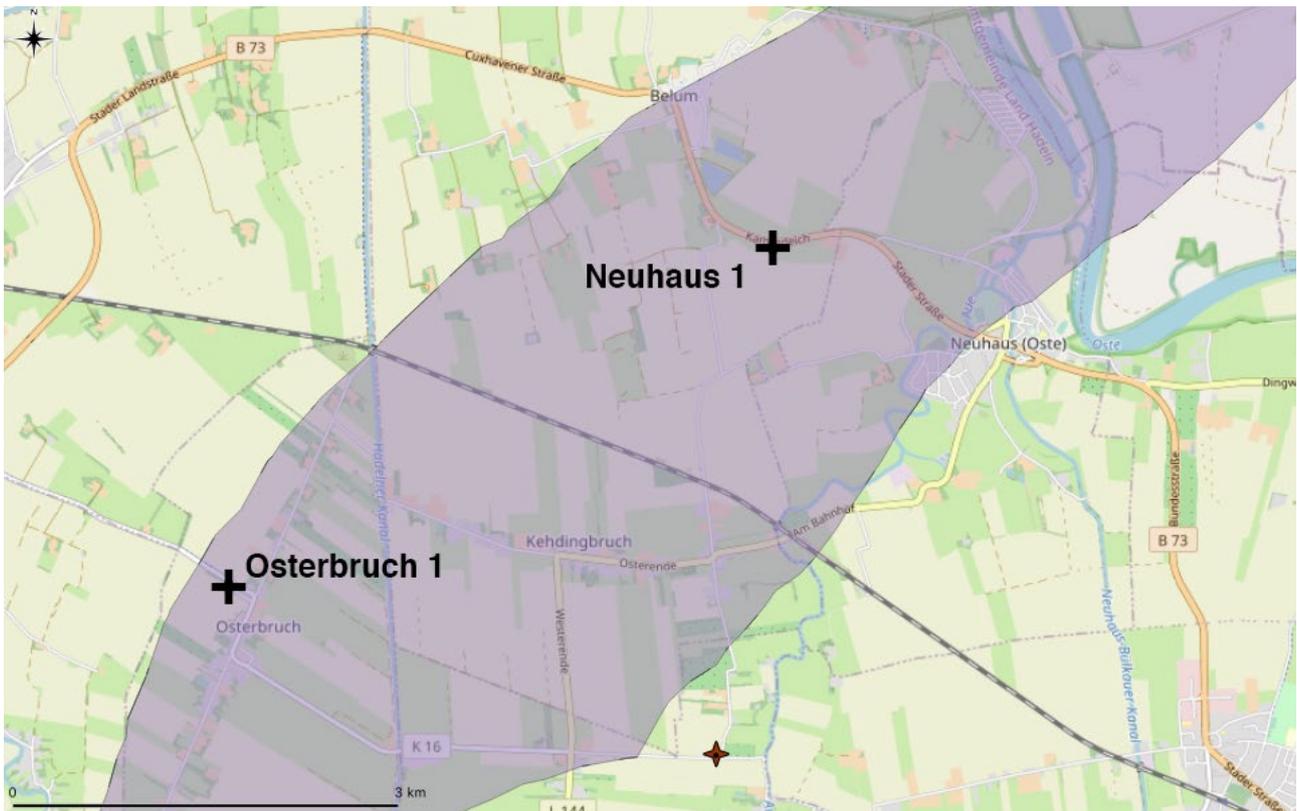
Die Teufenlage des Strukturtops wird für den Salzstock Armstorf mit 1007 m unter GOK angegeben, für den Salzstock Odisheim mit 800 m unter GOK und für Osterbruch mit 601 m unter GOK. Jaritz (1983) gibt für Armstorf eine Tiefe von mehr als 1000 m unter NN an, für Odisheim eine Kulmination von ca. 850 m und für Osterbruch von ca. 750 m unter NN.

In der Bohrung Neuhaus 1 wurden im nördlichen Segment des Teilgebiets 068 in einer Tiefe von 1020 m bis zur Endtiefe von 1203 m unter GOK Gesteine des Rotliegenden erbohrt. Die Bohrung Osterbruch 1 ist in einer Tiefe von 980 m bis zur Endtiefe von 1123 m unter GOK auf Rotliegend-Gesteine gestoßen (siehe Abbildung 5-5).

Die Bohrung Monopol erteufte Gesteine des Zechsteins in einer Tiefe von 862 m bis zur Endtiefe von 955,5 m unter GOK (siehe Abbildung 5-6).

Keines der veröffentlichten Schichtenverzeichnisse der Bohrungen enthält Angaben zur Lithologie. Sie zeigen lediglich, dass Gesteine der als Teilgebiet 068 ausgewiesenen Abfolgen des Rotliegenden und des Zechsteins im Gebiet anstehen. Es kann jedoch keine Aussage darüber getroffen werden, ob es sich dabei um Steinsalz handelt, das als Wirtsgestein in Frage kommt.

Abbildung 5-5: Bohrungen im Bereich des Salzstocks Osterbruch



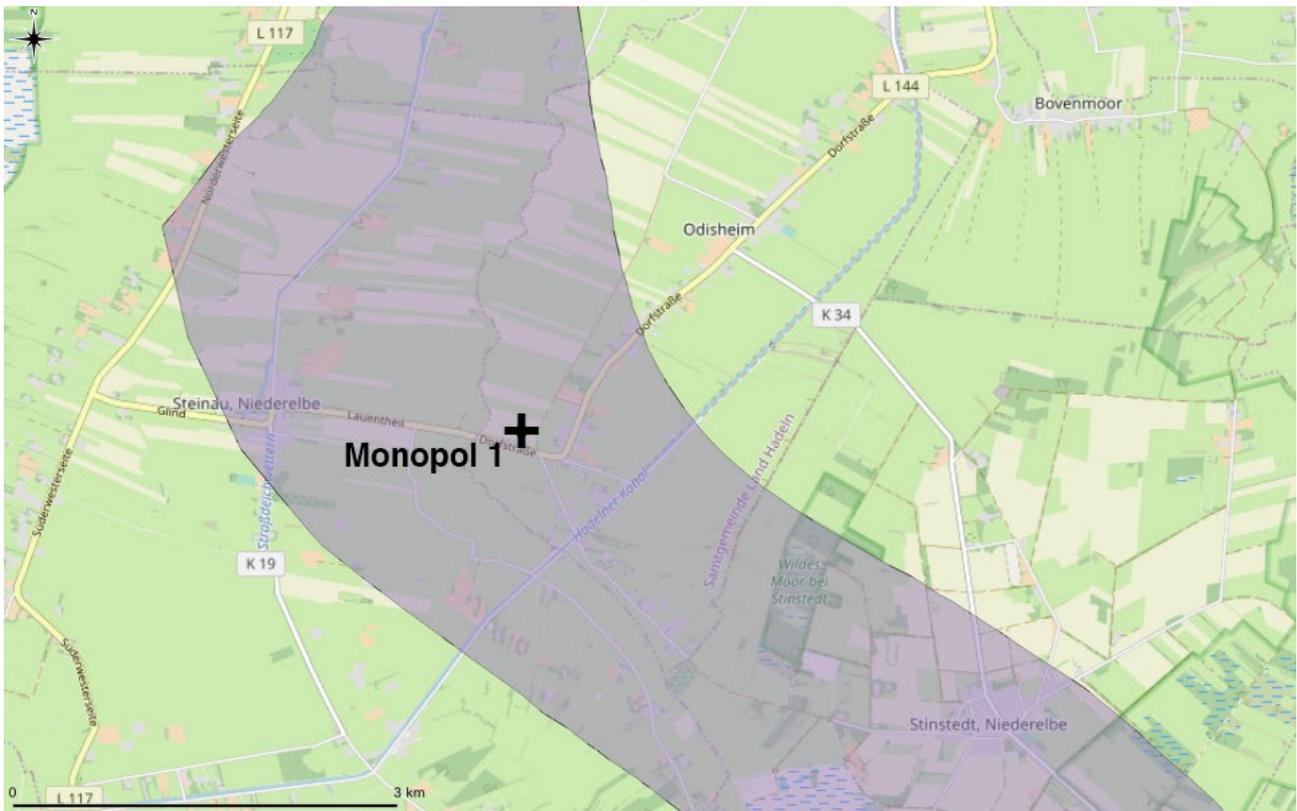
Quelle: Eigene Darstellung. Erstellt mit QGis, Kartengrundlage OpenStreetMap, Shape-Daten des Teilgebiets bereitgestellt von der BGE mbH unter <https://www.bge.de/de/endlagersuche/wesentliche-unterlagen/zwischenbericht-teilgebiete/>

Keiner der drei Salzstöcke des Teilgebiets, die im Landkreis Cuxhaven liegen, liegt bei Berücksichtigung einer Salzscheibe von 300 m in der im IG-Steckbrief angegebenen Teufenlage der Salzstockoberfläche von 800 m unter GOK. Die Angabe im Zwischenbericht Teilgebiete bezieht sich auf die gesamte Salzmauer, deren höchster Punkt im Salzstock Pahlhude mit 504 m unter GOK liegt (BGR 2016h). Auch bei einer separaten Bewertung der Salzstöcke Armstorf, Odisheim und Osterbruch muss jedoch die Mindestanforderung *Minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs* als erfüllt angesehen werden.

Auch die Mindestanforderung *Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs* ist für die drei Salzstöcke erfüllt. Die Angabe zur Fläche des identifizierten Gebiets im Zwischenbericht Teilgebiete bezieht sich, wie auch die Teufenlage der Struktur, auf das gesamte Gebiet und wurde aus der an die Oberfläche projizierten Hüllfläche der Salzstruktur abgeleitet. Wie für die Salzstöcke Altenbruch/Westerwana/Alfstedt/Beverstedt ausgeführt, ist nicht nachvollziehbar, ob der Gesteinskörper auf der gesamten Fläche über die angegebene Mächtigkeit verfügt.

Die Anwendung der Mindestanforderungen ist für die Segmente des Teilgebiets 068 im Landkreis Cuxhaven nachvollziehbar. Dass im nördlichen Segment des Salzstocks in zwei Bohrungen ab ca. 1000 m unter GOK Rotliegend-Gesteine angetroffen wurden, ist ein Hinweis darauf, dass die Einordnung als Doppelsalinar vom Internbautyp 2 möglicherweise nicht für die gesamte Struktur zutreffend ist. Ob daher im nördlichen Segment des Teilgebiets ein geeignetes Vorkommen von Steinsalz zur Errichtung eines Endlagers zu erwarten ist, sollte im nächsten Verfahrensschritt geklärt werden.

Abbildung 5-6: Bohrung Monopol 1 im Teilgebiet 068



Quelle: Eigene Darstellung. Erstellt mit QGIS, Kartengrundlage OpenStreetMap, Shape-Daten des Teilgebiets bereitgestellt von der BGE mbH unter <https://www.bge.de/de/endlagersuche/wesentliche-unterlagen/zwischenbericht-teilgebiete/>

5.2.5 Teilgebiet 075: Stratiformes Steinsalz des mittleren Keupers

Auch das Teilgebiet 075 mit der Bezeichnung „Glückstadt-Graben, nördliches Norddeutsches Becken“ erstreckt sich über den Landkreis Cuxhaven hinaus. Wie schon für die Teilgebiete 004, 006 und 068 dargestellt wurde das Gebiet durch die BGE als Ganzes bewertet. Alle Angaben im Zwischenbericht beziehen sich damit auch auf die Teile des identifizierten Gebiets, die nördlich und östlich der Elbe in Schleswig-Holstein liegen.

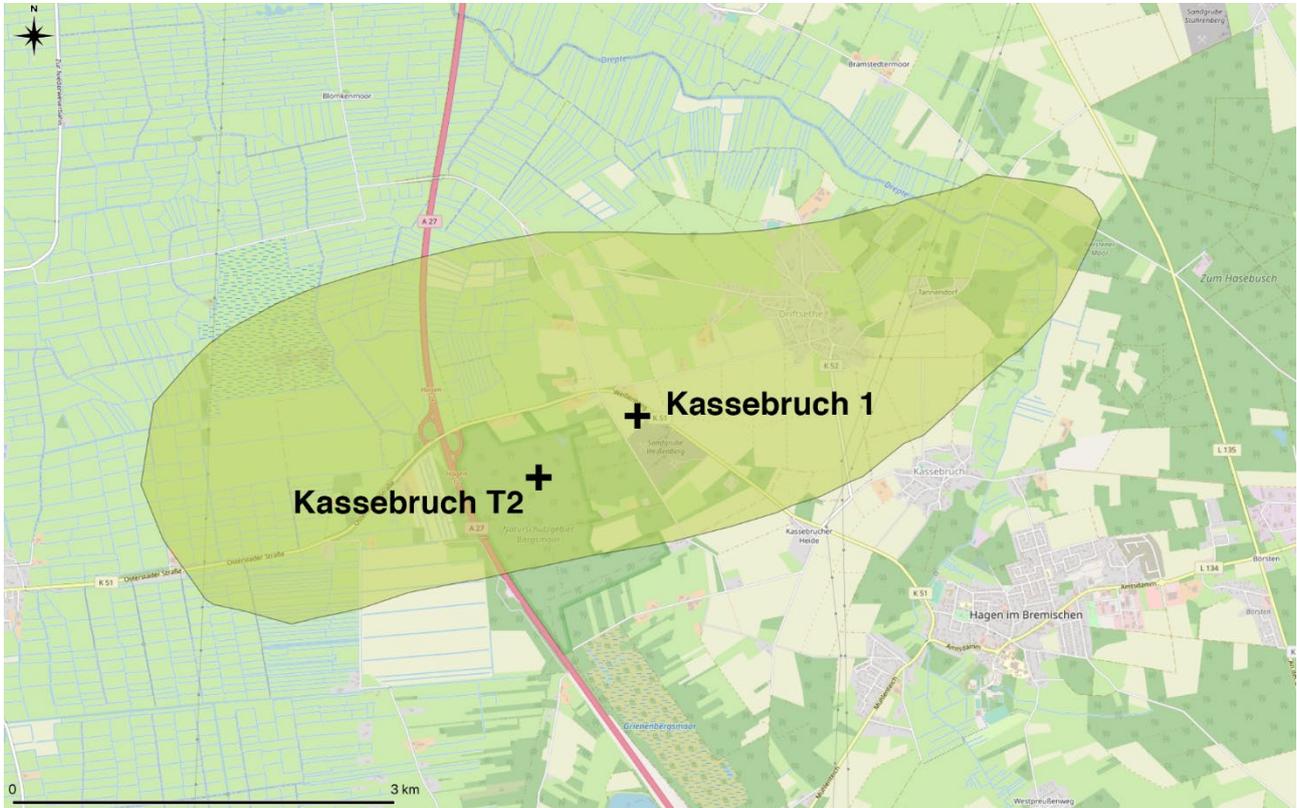
Im IG-Steckbrief werden die Mächtigkeit mit maximal 880 m (Keuper) angegeben, die „Teufenlage der Struktur“ (BGE 2020e) mit 640 – 1500 m unter GOK und die Gesamtfläche mit 475 km².

Die Angabe zur Mächtigkeit bezieht sich offensichtlich auf den gesamten Keuper. Im mittleren Keuper (etwa vor 238 bis 208 Millionen Jahren) wurden in diesem Teilgebiet acht Steinsalzlager gebildet, die als Wirtsgestein in Frage kommen. Sie werden mit den Buchstaben A bis H vom ältesten zum jüngsten Steinsalzlager unterschieden. Nach (Klaus et al. 2014) weisen die Steinsalzlager C bis G nicht die geforderte Mindestmächtigkeit von 100 m auf; das jüngste Steinsalzlager H kann jedoch „eine Mächtigkeit von mehreren hundert Metern Mächtigkeit erreichen“. Darauf wird auch im IG-Steckbrief der BGE verwiesen.

Ob in einem der Segmente des Gebiets im Landkreis Cuxhaven ein Steinsalzlager des Keupers die erforderliche Mindestmächtigkeit von 100 m erreicht, ist aus den Informationen des Zwischenberichts Teilgebiete nicht zu entnehmen. Wie in Kapitel 4.2 dargestellt, wurden im Landkreis Cuxhaven mehrere Bohrungen auf der Fläche des Teilgebiets abgeteuft. Im südlichen Segment des Teilgebiets

erreichte die Bohrung Kassebruch T2 eine Endtiefe von 3627,5 m unter GOK in Gesteinen des unteren Buntsandsteins. In der Bohrung Kassebruch 1 wurden in der Endtiefe von 1461 m unter GOK Gesteine des oberen Keupers erbohrt. Abbildung 5-7 zeigt die Lage der Bohrungen.

Abbildung 5-7: Lage der Bohrungen im südlichen Segment des Teilgebiets 075



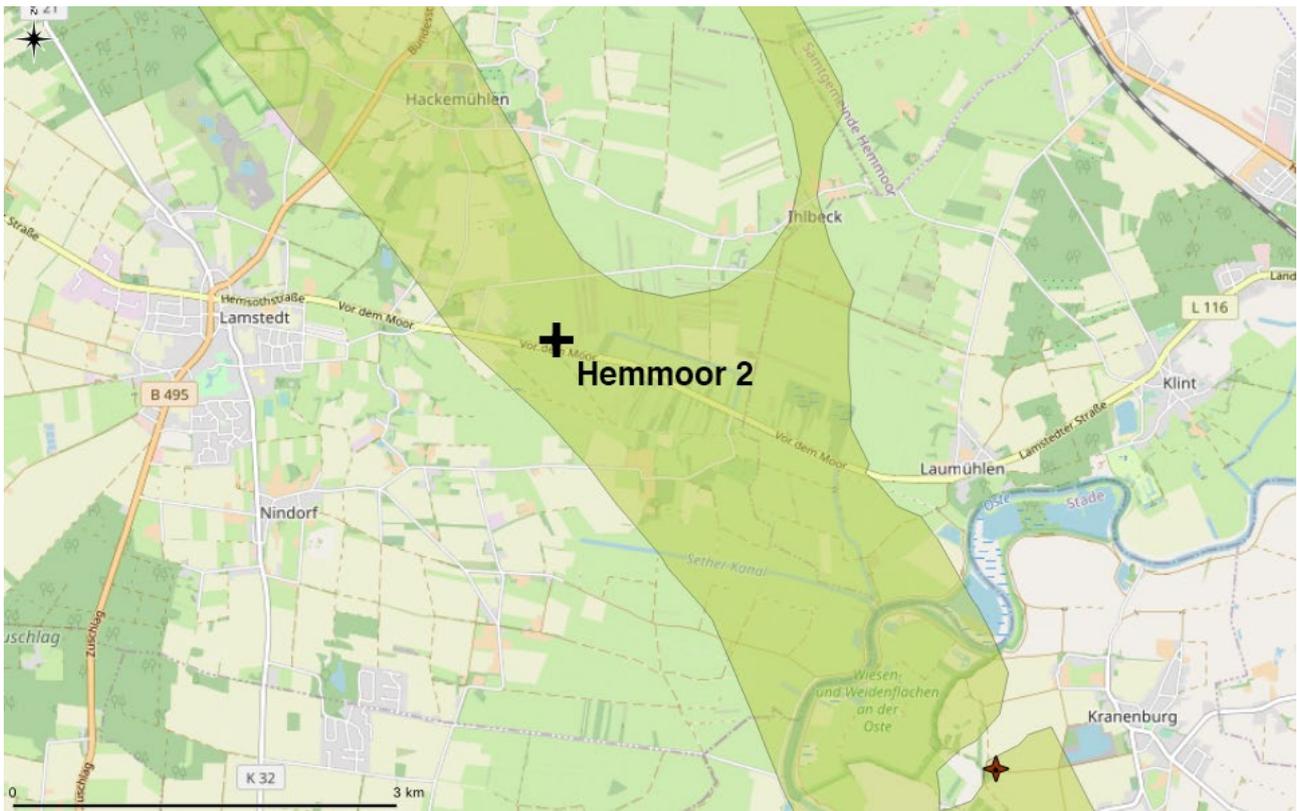
Quelle: Eigene Darstellung. Erstellt mit QGis, Kartengrundlage OpenStreetMap, Shape-Daten des Teilgebiets bereitgestellt von der BGE mbH unter <https://www.bge.de/de/endlagersuche/wesentliche-unterlagen/zwischenbericht-teilgebiete/>

In der Bohrung Kassebruch T2 wurde bis zur Untergrenze des Suchraums für ein Endlager von 1500 m Tiefe Gesteine bis zum Norium, das entspricht dem jüngsten Teil des mittleren Keupers, erbohrt. Ein Steinsalzlager wäre, wenn überhaupt, nur unterhalb einer Tiefe von 1459 m unter GOK zu erwarten. Es böte dann innerhalb des Suchraums keine ausreichende Mächtigkeit. Das in der Bohrpunktkarte des LBEG hinterlegte Schichtenverzeichnis gibt für die Bohrung Kassebruch T2 ab 1459 m Tiefe unter GOK die Bezeichnung Steinmergelkeuper an. Dieser heute nicht mehr gebräuchliche stratigraphische Name verweist ebenfalls auf die jüngste Folge innerhalb des mittleren Keupers, in der kein Salzlager gebildet wurde.

Tatsächlich werden die gesuchten Vorkommen von Keuper-Steinsalz in der Bohrung Kassebruch T2 erst einer Tiefe von 1679 m unter GOK angetroffen. Dass auch in der benachbarten Bohrung Kassebruch 1 bis zur Endtiefe in fast 1500 m unter GOK keine Gesteine des mittleren Keupers angetroffen wurden, deutet darauf hin, dass im südlichen Segment des Teilgebiets 075 im Landkreis Cuxhaven möglicherweise kein geeignetes Vorkommen stratiformen Keuper-Steinsalzes ansteht.

Im östlichen Segment des Teilgebiets wurde in der Bohrung Hemmoor 2, ähnlich wie in Kassebruch T2, ab 1482,50 m Tiefe unter GOK Steinmergelkeuper angetroffen (siehe oben). Steinsalz steht dort erst in einer Tiefe ab 1758 m unter GOK an.

Abbildung 5-8: Lage der Bohrung Hemmoor 2 im östlichen Segment des Teilgebiets 075



Quelle: Eigene Darstellung. Erstellt mit QGIS, Kartengrundlage OpenStreetMap, Shape-Daten des Teilgebiets bereitgestellt von der BGE mbH unter <https://www.bge.de/de/endlagersuche/wesentliche-unterlagen/zwischenbericht-teilgebiete/>

Aus einer einzelnen Bohrung lassen sich keine Rückschlüsse auf ein größeres Gebiet wie das östliche Segment des Teilgebiets 075 ziehen. Im Bereich Hemmoor befindet sich nach Angaben von Klaus et al. (2014) ein Salzkissen, also eine Aufwölbung von Salinargestein mit einer möglichen Verdickung der Schicht bzw. einer Akkumulation von Steinsalz. Es kann daher nicht ausgeschlossen werden, dass sich an anderer Stelle innerhalb des östlichen Segments des Teilgebiets ausreichend mächtige Steinsalzlagen in geeigneter Tiefe befinden. Im Bereich der Bohrung Hemmoor jedoch steht innerhalb des von der BGE festgelegten Suchraums bis zu einer Tiefe von 1500 m kein geeignetes Wirtsgestein an. Zum nördlichen Segment des Teilgebiets 075 im Landkreis Cuxhaven waren keine Bohrungsdaten oder andere Literaturinformationen verfügbar.

Die Angaben zur Teufenlage des Teilgebiets 075 im Zwischenbericht sind insofern plausibel, als sie sich nur auf Gesteine des Keupers beziehen, nicht jedoch auf die Steinsalzlager des Keupers. Gleiches gilt für die Angaben zur Mächtigkeit der Keuper-Gesteine im Teilgebiet. Die Flächen jedes Segments des Teilgebiets 075 im Landkreis Cuxhaven ist groß genug, um die Mindestanforderung zu erfüllen, die die BGE im Fachbericht (BGE 2020c) mit 3 km² definiert. Keine der Bohrungen im Bereich des Teilgebiets 075 im Landkreis Cuxhaven deutet auf das Vorhandensein geeigneter Wirtsgesteine in einer Tiefe von weniger als 1500 m unter GOK hin.

Insgesamt ist die Methodik der Anwendung der Mindestanforderungen für das Teilgebiet 075 nachvollziehbar. Die Befunde aus Schichtenverzeichnissen von Bohrungen im Landkreis Cuxhaven zeigen jedoch, dass die Ergebnisse der sehr pauschalen Anwendung der Mindestanforderungen nicht auf die gesamte Fläche des Teilgebiets im Landkreis Cuxhaven übertragbar sind.

6 Geowissenschaftliche Abwägungskriterien

In Kapitel 6.1 werden die elf geowissenschaftlichen Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG dargestellt. Die Anwendungsmethodik wird erläutert und die Bewertung von Teilen der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien mittels Referenzdaten beschrieben. Für die Teilgebiete im Landkreis Cuxhaven wird auf die individuell bewerteten Abwägungskriterien im Detail eingegangen. Die Ergebnisse, die zur Ausweisung dieser Teilgebiete geführt haben, werden dargestellt und Schlussfolgerungen diskutiert (Kapitel 6.2).

6.1 Anwendungsmethodik

Die identifizierten Gebiete, auf die kein Ausschlusskriterium zutrifft, in denen geeignete Wirtsgesteine vorkommen und die darüber hinaus alle Mindestanforderungen erfüllen, werden mit Hilfe geowissenschaftlicher Abwägungskriterien dahingehend bewertet, ob sie gemäß § 13 Abs. 1 StandAG „günstige geologische Voraussetzungen für die sichere Endlagerung radioaktiver Abfälle erwarten lassen“. Die geowissenschaftlichen Abwägungskriterien sind jeweils mit Indikatoren unterlegt, die zur Bewertung heranzuziehen sind. Eine Bewertung der Indikatoren und Kriterien erfolgt als günstig, bedingt günstig oder weniger günstig/ungünstig (Bezeichnung im StandAG) bzw. nicht günstig (Bezeichnung gemäß Umsetzung der BGE).

Für die Bewertung der Abwägungskriterien werden detaillierte, standortspezifische Informationen benötigt, die zum jetzigen Zeitpunkt für die untersuchten identifizierten Gebiete selten oder nur unvollständig vorliegen. Eine gebietspezifische Anwendung der Abwägungskriterien ist daher bei der Ausweisung von Teilgebieten noch nicht möglich. Daher greift die BGE auf Referenzdatensätze zurück. Darin werden die bewertungsrelevanten Eigenschaften der betrachteten Gesteinstypen anhand verfügbarer Informationen beschrieben und die Bandbreite an Werten, die einzelne Indikatoren annehmen können, mit Hilfe von Literaturdaten festgelegt.

Die Bewertung von Kriterien mittels Referenzdaten erfolgte also für alle Teilgebiete eines Wirtsgesteinstyps jeweils identisch. Die Referenzdaten für Steinsalz, Tongestein und kristalline Gesteine sind in der Unterlage „Referenzdatensätze zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien im Rahmen von § 13 StandAG“ (BGE 2020g) festgehalten. Darin „erfolgt keine Differenzierung von Steinsalz in steiler Lagerung und stratiformem Steinsalz“ (BGE 2020g).

Die BGE hält fest, dass „bei wenig, keinen oder nicht eindeutigen Daten [...] stets von einer tendenziell günstigen Annahme ausgegangen“ wird (BGE 2020g). Auf diese Weise soll vermieden werden, im ersten Verfahrensschritt aufgrund einer schlechten Datenlage schon Gebiete auszuschließen, die sich als geeignet erweisen könnten.

Die geowissenschaftlichen Abwägungskriterien sind:

1. Kriterium zur Bewertung des Transportes radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen im ewG: Dieses Kriterium dient der Bewertung eines möglichen Transports von Schadstoffen aus dem Endlager durch Grundwasser.
2. Kriterium zur Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper: Das Einschlussvermögen der Gesteine, die den ewG aufbauen, soll mittels Modellrechnungen abgeleitet werden. Solange die dazu benötigten Detailinformationen nicht vorliegen, werden fünf Indikatoren zur Bewertung herangezogen (StandAG 2017 Anlage 2).

3. Kriterium zur Bewertung der räumlichen Charakterisierbarkeit: Das Kriterium dient der Bewertung, wie gut sich die relevanten Eigenschaften der Gesteine in einem betrachteten Raum ermitteln lassen. Darüber hinaus wird die Übertragbarkeit dieser Eigenschaften auf den ewG und seine Umgebung beurteilt.
4. Kriterium zur Bewertung der langfristigen Stabilität der günstigen Verhältnisse: Mit diesem Kriterium wird beurteilt, inwieweit sich wesentliche sicherheitsrelevante Merkmale der Gesteine, in denen der ewG ausgewiesen werden soll, in der Vergangenheit verändert haben und solche Änderungen auch in der Zukunft zu erwarten sind.
5. Kriterium zur Bewertung der günstigen gebirgsmechanischen Eigenschaften: Durch die Errichtung eines Endlagerbergwerks sollen im Gestein keine zusätzlichen Wegsamkeiten entstehen, durch die später Schadstoffe aus dem Endlager entweichen können.
6. Kriterium zur Bewertung der Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten: Mit diesem Kriterium soll beurteilt werden, wie leicht das Gestein im ewG Risse bildet, und ob solche Risse durch das Gestein selbst, beispielsweise durch duktile Verformung, wieder verschlossen werden.
7. Kriterium zur Bewertung der Gasbildung: Die Entstehung von Gasen im Endlager soll möglichst vermieden werden. Zur Beurteilung wird das Wasserangebot im Einlagerungsbereich betrachtet.
8. Kriterium zur Bewertung der Temperaturverträglichkeit: Radioaktive Abfälle geben immer Wärme ab. Durch dieses Kriterium wird beurteilt, ob und in welchem Maße sich dadurch Eigenschaften des Gesteins negativ verändern, beispielsweise durch Festigkeitsverlust.
9. Kriterium zur Bewertung des Rückhaltevermögens im einschlusswirksamen Gebirgsbereich: Es soll beurteilt werden, wie gut das Gestein im ewG geeignet ist, über lange Zeiträume radioaktive Stoffe zurückzuhalten. Dazu werden verschiedene Eigenschaften des Gesteins und des Grundwassers im ewG betrachtet.
10. Kriterium zur Bewertung der hydrochemischen Verhältnisse: Die chemischen Eigenschaften des Grundwassers und der Gesteine im ewG sollen nicht nur vor der Einlagerung, sondern auch nach Verschluss des Bergwerks langfristig zur Zurückhaltung der Schadstoffe im Endlager beitragen.
11. Kriterium zur Bewertung des Schutzes des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durch das Deckgebirge: Das Deckgebirge, also die Gesteinsschichten, die das Wirtsgestein überlagern, soll langfristig Schutz gegen Erosion und das Eindringen von Grundwasser bieten.

Bei Gebieten mit Steinsalz in steiler Lagerung wurden für acht von elf Kriterien Referenzdatensätze verwendet. Lediglich die Kriterien 2, 3 und 11 wurden gebietsspezifisch bewertet (BGE 2020h). Bei Gebieten mit Steinsalz in stratiformer Lagerung und Gebieten mit Tongestein sollen gemäß BGE (2020d) außerdem für Kriterium 4 zur langfristigen Stabilität der günstigen Verhältnisse gebietsspezifische Daten ausgewertet werden. Die Anwendung dieser gebietsspezifisch bewerteten Kriterien durch die BGE auf die Teilgebiete 067, 068 und 075 wird in Kapitel 6.1 erläutert und bewertet. Im Folgenden werden die elf geowissenschaftlichen Abwägungskriterien und deren Anwendung durch die BGE bei der Ermittlung von Teilgebieten in Steinsalz näher erläutert.

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

Aus dem Endlager bzw. dem ewG sollen möglichst keine radioaktiven Stoffe entweichen können. Zur Bewertung eines möglichen Stofftransports und damit potentiellen Austrags von Schadstoffen aus dem Endlager beziehen sich die Indikatoren auf Eigenschaften, die die Grundwasserströmung und die Diffusion durch das Gestein betreffen. Als Indikatoren wurden die Parameter *Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers*, *Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit des Gesteinstyps*, *Charakteristischer effektiver Diffusionskoeffizient des Gesteinstyps für tritiiertes Wasser (HTO) bei 25 °C*, *Absolute Porosität* und *Verfestigungsgrad* herangezogen. Die Indikatoren *Absolute Porosität* und *Verfestigungsgrad* finden nur für Tongestein Anwendung. Das Kriterium wurde für alle Wirtsgesteine mittels Referenzdaten bewertet.

Zur Bewertung des Indikators *Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers* wurden allgemeine Materialeigenschaften des Wirtsgesteins Steinsalz herangezogen. Er wird für Steinsalz als günstig bewertet. Zur Begründung wird auf die allgemein geringe Durchlässigkeit bzw. Undurchlässigkeit von Steinsalz verwiesen, aufgrund derer ausschließlich diffusiver Transport denkbar ist (BGE 2020g).

Für Tongesteine wird dieser Indikator ebenfalls als günstig bewertet. Ausgehend von veröffentlichten Literaturwerten für die Porosität verschiedener Tongesteine und hydraulischen Gradienten, die der hydrogeologischen Karte von Niedersachsen entnommen wurden, wurden minimale und maximale Abstandsgeschwindigkeiten für verschiedene Tongesteinsvorkommen berechnet. Die BGE gibt an, „trotz breiter Schwankungen bei Alter, Teufe und Tonanteil“ könnten „alle berechneten Werte mit einer Ausnahme als günstig bewertet werden“ (BGE 2020g). Es wird darauf hingewiesen, dass „die tatsächliche Abstandsgeschwindigkeit [...] sich jedoch nur mit standortspezifischen Untersuchungen ermitteln“ (BGE 2020g) lasse.

Der als ungünstig bewertete Referenzwert wurde mit Daten aus dem in Belgien als Wirtsgestein untersuchten Boom Clay berechnet. Dabei handelt es sich um einen nur schwach verfestigten Ton, der von allen im Referenzdatensatz verwendeten Werten möglicherweise am ehesten zur Verwendung als Analogon zu den tertiären Tonsteinen Norddeutschlands geeignet ist. Die grundsätzlich günstige Bewertung dieses Indikators muss daher in Frage gestellt werden.

Der Indikator *Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit des Gesteinstyps* wurde anhand von Literaturdaten, bspw. aus Untersuchungen im Bergwerk Morsleben, der Schachanlage Asse und der Waste Isolation Pilot Plant in New Mexico (USA) für Steinsalz bewertet. Er wurde ebenfalls als günstig eingestuft. Auch für Tongesteine wurden Literaturwerte herangezogen, unter anderem aus Gesteinen, die im Rahmen der Erkundung bzw. Forschung zur Endlagerung in der Schweiz und in Frankreich gewonnen wurden. Der Indikator wird für Tongesteine als günstig bewertet.

Für den Indikator *Charakteristischer effektiver Diffusionskoeffizient des Gesteinstyps für tritiiertes Wasser (HTO) bei 25 °C* wird darauf hingewiesen, dass eine experimentelle Bestimmung der Diffusionsgeschwindigkeit mit tritiiertem Wasser für Steinsalz nicht durchführbar sei, da das Steinsalz vom Wasser gelöst würde. Er wird daher anhand allgemeiner Materialeigenschaften bewertet. Aufgrund der geringen Porosität von Steinsalz wird von einer „sehr geringen Diffusionsgeschwindigkeit“ (BGE 2020g) ausgegangen und der Indikator für Steinsalz mit günstig bewertet. Für Tongesteine werden experimentell ermittelte Werte aus den Untertagelaboren in Mont Terri in der Schweiz und Bure in Frankreich herangezogen. Da der effektive Diffusionskoeffizient in allen Fällen geringer als $10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$ bestimmt wurde, wird der Indikator als günstig bewertet.

Der Indikator *Charakteristischer effektiver Diffusionskoeffizient des Gesteinstyps für tritiiertes Wasser (HTO) bei 25 °C* dient der Bewertung der Diffusionsgeschwindigkeit innerhalb eines Wirtsgesteins bzw. ewG. Für Tongesteine Anlage 1 zu § 24 StandAG vor, die Diffusionsgeschwindigkeit mittels der Indikatoren *Absolute Porosität* und *Verfestigungsgrad* zu bewerten. Dies hat die BGE im Zwischenbericht Teilgebiete nicht getan, sondern wie für Steinsalz und kristalline Gesteine den effektiven charakteristischen Diffusionskoeffizient herangezogen. Eine Begründung, warum die Indikatoren *absolute Porosität* und *Verfestigungsgrad* nicht genutzt werden, ist den Teilgebietssteckbriefen und dem Referenzdatensatz nicht zu entnehmen. Zum Indikator *absolute Porosität* wird im Referenzdatensatz (BGE 2020g) festgehalten, „da standortspezifisch Untersuchungen durchgeführt werden müssen“, könne „der Indikator als „günstig“ bewertet werden“. Zum Indikator *Verfestigungsgrad* wird ausgeführt: „Da zum jetzigen Zeitpunkt jedoch keine dieser ortsspezifischen Daten vorliegen, werden standortspezifische Untersuchungen durchgeführt werden müssen. Eine allgemeine Aussage zur Ausprägung des Verfestigungsgrades des Wirtsgesteins Tongestein kann nicht erfolgen. Deshalb sind alle drei Wertungsgruppen möglich“ (BGE 2020g).

Das Kriterium zur *Bewertung des Transportes radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich* wurde für Steinsalz und Tongesteine entsprechend der Indikatorbewertungen als günstig bewertet.

Kriterium 2 zur Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper

Das Kriterium zur *Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper* wird auf Grundlage gebietspezifischer Daten anhand der Indikatoren *Barrierenmächtigkeit*, *Grad der Umschließung des Einlagerungsbereichs durch einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich*, *Teufe der oberen Begrenzung des erforderlichen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs* und *Flächenhafte Ausdehnung bei gegebener Mächtigkeit* bewertet. Der Indikator 5 – *Vorhandensein von Gesteinsschichten mit hydraulischen Eigenschaften und hydraulischem Potenzial, die die Induzierung beziehungsweise Verstärkung der Grundwasserbewegung im einschlusswirksamen Gebirgsbereich ermöglichen können* – findet nur für Teilgebiete in Tongestein Anwendung. Da dem Kriterium aufgrund der für den Zwischenbericht Teilgebiete zur Verfügung stehenden Datenlage eine besondere Bedeutung zukomme, wird die Gesamtbewertung des Kriteriums durch den am schlechtesten bewerteten Indikator bestimmt (BGE 2020j).

Durch die Erfüllung des Indikators *Barrierenmächtigkeit* soll gezeigt werden, dass die Gesteine des ewG als Barriere den Einschluss der eingelagerten Abfallstoffe über mindestens eine Million Jahre gewährleisten. Dazu wird ein Abstand von mehr als 150 m zum Rand des Gesteinskörpers als günstig angenommen. Da die genaue Lage des ewG noch nicht bekannt ist, bewertet die BGE eine Mächtigkeit des Wirtsgesteins von 300 m generell als günstig (BGE 2020h).

Durch den Indikator *Grad der Umschließung des Einlagerungsbereichs durch einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich* wird sichergestellt, dass die eingelagerten Abfälle vollständig vom Wirtsgestein umschlossen sind, um einen Transport von Schadstoffen aus dem Endlager möglichst zu verhindern. Es wird seitens der Vorhabenträgerin „zum jetzigen Zeitpunkt [...] davon ausgegangen, dass Wirtsgestein und einschlusswirksamer Gebirgsbereich Teil ein und desselben Gesteinskörpers sind“, der die funktionalen Eigenschaften des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches“ aufweise und „die Anlage eines Endlagerbergwerks“ erlaube. Daher erfolge die Bewertung des Indikators „für alle identifizierten Gebiete aller Wirtsgesteine“ als günstig (BGE 2020h).

Der Indikator *Teufe der oberen Begrenzung des erforderlichen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs* dient dem Ausweis, dass das Endlager einen hinreichenden vertikalen Abstand von der Oberfläche bzw. der Biosphäre, und damit von Mensch und Umwelt, hat. Eine Tiefe von 500 m unter GOK wird dabei nach Anlage 2 zu § 24 StandAG als günstig angesehen.

Zur Bewertung des Indikators *Flächenhafte Ausdehnung bei gegebener Mächtigkeit* wird für Steinsalz in steiler Lagerung, der Begründung zum Gesetzesentwurf des StandAG (Fraktionen CDU/CSU, SPD und BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN 2017) folgend, ein Mindestflächenbedarf von 3 km² angesetzt. Als günstig sind nach Anlage 2 zu § 24 Abs. 3 StandAG Gesteinskörper mit einer Ausdehnung von deutlich mehr als dem 2-fachen Flächenbedarf zu bewerten, als bedingt günstig potentielle Wirtsgesteine mit einer Ausdehnung von etwa dem 2-fachen Flächenbedarf und als weniger günstig Gesteinseinheiten mit einer flächenhaften Ausdehnung von deutlich weniger als dem 2-fachen Flächenbedarf. Nach dem Fachbericht zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien (BGE 2020h) wird für Steinsalz ein Flächenangebot von 3 – 6 km² als weniger günstig, 6 – 9 km² als bedingt günstig und größer 9 km² als günstig übersetzt. Für Gebiete in Tongesteinen gilt eine Fläche von 10 – 20 km² als weniger günstig, 20 – 30 km² als bedingt günstig und mehr als 30 km² als günstig. Die Bewertung der identifizierten Gebiete wurde „nach der jeweiligen Gesamtfläche des identifizierten Gebiets ohne eine etwaige Teilflächenprüfung“ (BGE 2020h) vorgenommen.

Für Tongesteine wird nach Anlage 2 zu § 24 StandAG zusätzlich der Indikator *Vorhandensein von Gesteinsschichten mit hydraulischen Eigenschaften und hydraulischem Potenzial, die die Induzierung beziehungsweise Verstärkung der Grundwasserbewegung im einschlusswirksamen Gebirgsbereich ermöglichen können* herangezogen. Im Fachbericht zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien (BGE 2020h) wird ausgeführt, eine „abschließende Bewertung der identifizierten Gebiete im Tongestein“ nach diesem Indikator sei „zum jetzigen Zeitpunkt aufgrund fehlender Detailinformationen nicht sinnvoll möglich“. Daher wird er im Zwischenbericht Teilgebiete für alle identifizierten Gebiete in Tongesteinen als günstig bewertet.

Kriterium 3 zur Bewertung der räumlichen Charakterisierbarkeit

Das Kriterium zur *Bewertung der räumlichen Charakterisierbarkeit* dient als Maß dafür, wie gut sich die Eigenschaften eines Wirtsgesteins in einem Teilgebiet oder im weiteren Verfahren in einer Standortregion oder an einem Standort beschreiben lassen, und wie gut sich punktuell gewonnene Erkenntnisse aus der Erkundung auf den ewG oder Einlagerungsbereich übertragen lassen. Die Gesteinsausbildung, das Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit, die Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich sowie die räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften dienen hierbei als Indikatoren. Die Bewertung erfolgte jeweils anhand von Fachliteratur.

Für Salinare mit Gesteinen des Rotliegenden, sogenannte Doppelsalinare, wurden die Indikatoren *Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich, Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften* und *Gesteinsausbildung* abhängig von ihrem Internbautyp (siehe dazu Kapitel 6.1.3 f.) bewertet. Auf diese Weise soll eine Abschätzung des Anteils an Gesteinen des Zechsteins ermöglicht werden (BGE 2020h). Während im Rotliegenden Salzgesteine und Tonsteine von häufig geringer Mächtigkeit miteinander wechsellagern und nach dem Aufstieg in einem Salzdiapir häufig miteinander vermischt sind, sind die Gesteine des Zechsteins oft durch mächtige Lagen sehr reinen Steinsalzes gekennzeichnet.

Der Indikator *Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit* wurde für Steinsalz in steiler Lagerung grundsätzlich als bedingt günstig bewertet, da der Salzdiapirismus als tektonischer Prozess selbst zur Überprägung¹⁹ der beteiligten Gesteine führt (BGE 2020h).

Für Gebiete mit Tongesteinen und stratiformen salinaren Gesteinen erfolgte die Bewertung aller Indikatoren auf Basis geologischer Übersichten und Zusammenfassungen aus Modellierungsprotokollen, die durch Fachliteratur ergänzt wurden.

Kriterium 4 zur Bewertung der langfristigen Stabilität der günstigen Verhältnisse

Das Endlager soll für einen Zeitraum von einer Million Jahren Sicherheit vor den schädlichen Wirkungen der eingelagerten Abfallstoffe bieten. Mit dem Kriterium zur *Bewertung der langfristigen Stabilität der günstigen Verhältnisse* wird eine Aussage dazu getroffen, ob die zum Zeitpunkt der Standortauswahl als günstig bewerteten Verhältnisse auch langfristig gewährleistet werden können. Das Kriterium wird für Gebiete mit Steinsalz in steiler Lagerung anhand von Referenzdaten, für Gebiete mit Tongestein oder Steinsalz in stratiformer Lagerung individuell bewertet.

In Anlage 4 zu § 24 Abs. 3 StandAG (2017) wird ausgeführt, Indikatoren zur Bewertung des Kriteriums *Bewertung der langfristigen Stabilität der günstigen Verhältnisse* seien „insbesondere die Zeitspannen, über die sich die Betrachtungsmerkmale „Mächtigkeit“, flächenhafte beziehungsweise räumliche „Ausdehnung“ und „Gebirgsdurchlässigkeit“ des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht wesentlich verändert haben“. Die BGE beschränkt sich bei der Bewertung des Kriteriums auf diese drei Indikatoren.

Nach dem Referenzdatensatz sind aus vorhandener Literatur „nur indirekt Aussagen zu Änderungen der Indikatoren Mächtigkeit, Ausdehnung und Gebirgsdurchlässigkeit über die Zeit ableitbar“ (BGE 2020g). Es werden eine Reihe von Prozessen aufgeführt, die Auswirkungen auf die räumlichen Eigenschaften Mächtigkeit und Ausdehnung haben können. Diese Prozesse werden für die Bewertung der beiden Indikatoren jedoch nicht herangezogen, da im Referenzdatensatz von einer günstigen Ausgangssituation ausgegangen werde. Grundlage dafür ist die Feststellung, dass der Diapirismus an den norddeutschen Salzstöcken im Wesentlichen zum Erliegen gekommen ist und keine oder nur noch sehr geringe Hebungsvorgänge stattfinden. Es wird darauf hingewiesen, dass „für belastbare Aussagen zu diesen Prozessen [...] standortspezifische Untersuchungen nötig“ (BGE 2020g) seien.

Zum Indikator *langfristige Stabilität der Gebirgsdurchlässigkeit* wird ausgeführt, dass im Nachdiapirstadium von Salzstöcken keine wesentlichen Änderungen der Gebirgsdurchlässigkeit mehr stattfinden. Alle Indikatoren des Kriteriums und entsprechend auch das Kriterium selbst werden für Salzstöcke als günstig bewertet (BGE 2020g).

Für Gebiete mit Tongestein und Steinsalz in stratiformer Lagerung werden die drei Indikatoren „aufgrund der Datenlage gemeinsam betrachtet und dementsprechend meistens gleich bewertet“ (BGE 2020h). Die Bewertung des Kriteriums erfolgte jeweils „anhand der Bewertung des am schlechtesten bewerteten Indikators“ (BGE 2020h).

¹⁹ Als Überprägung wird die Veränderung von Gesteinen durch tektonische Prozesse bezeichnet. Diese Veränderungen reichen von der Änderung der ursprünglichen Lagerungsverhältnisse eines Gesteins durch Verstellung oder Faltung bis zur teilweisen Aufschmelzung und Umkristallisation (Anatexis) unter Einfluss von Druck und Temperatur während tektonischer Beanspruchung.

Kriterium 5 zur Bewertung der günstigen gebirgsmechanischen Eigenschaften

Das Kriterium zur *Bewertung der günstigen gebirgsmechanischen Eigenschaften* dient der Beurteilung, inwiefern die Errichtung eines Endlagerbergwerks das jeweilige Wirtsgestein schädigt und unter Umständen zur Entstehung erhöhter Permeabilität²⁰ in der Umgebung des Grubengebäudes führt. Es soll nach Anlage 5 zu § 24 Abs. 4 StandAG mit Hilfe zweier Indikatoren bewertet werden:

1. das Gebirge kann als geomechanisches Haupttragelement die Beanspruchung aus Auffahrung und Betrieb ohne planmäßigen tragenden Ausbau, abgesehen von einer Kontursicherung, bei verträglichen Deformationen aufnehmen
2. um Endlagerhohlräume sind keine mechanisch bedingten Sekundärpermeabilitäten außerhalb einer unvermeidbaren konturnah entfestigten Auflockerungszone zu erwarten

Die Bewertung der Indikatoren für Steinsalz erfolgt mittels des Referenzdatensatzes anhand von Erfahrungswerten und Literaturstudium. Beide Indikatoren werden nach Darstellung in Anlage 1 A zum Fachbericht Teilgebiete und Anwendung Geowissenschaftliche Abwägungskriterien (BGE 2020a) als günstig bewertet. Nach dem Referenzdatensatz erfolgt die Bewertung jedoch zusammenfassend für das Kriterium ohne Unterscheidung der Indikatoren.

Begründet wird die günstige Einschätzung des Kriteriums mit der Standfestigkeit von Salzgestein, das keinen tragenden Ausbau benötige, sowie der Annäherung an Werte für die Gebirgsfestigkeit durch Betrachtung der Gesteinsdruckfestigkeit. Mit Verweis auf Lux und Eberth (2002b) wird dargestellt, dass Steinsalz günstige gebirgsmechanische Eigenschaften biete. Zum Beleg werden weitere Literaturquellen sowie praktische Erfahrungen angeführt.

Im Referenzdatensatz (BGE 2020g) wird für die Anwendung des Kriteriums in Gebieten mit Tongestein ausgeführt, dass die Beurteilung des Indikators zur Aufnahme der Beanspruchung aus Auffahrung und Betrieb durch das Gebirge für Tongestein von einer Reihe von Parametern abhängt, die standortspezifisch ermittelt werden müssen. Anhand verschiedener Beispiele wird die Bandbreite der möglichen Gebirgsdruckfestigkeit in Tongesteinen dargestellt. Der Indikator wird als nicht günstig eingestuft. Der Indikator zur Bildung von Sekundärpermeabilitäten wird unter Verweis auf eine Literaturquelle als günstig bewertet; auch dieser Indikator müsse aber „für eine gezielte Bewertung standortspezifisch“ (BGE 2020g) bewertet werden. Das Kriterium wird für Gebiete in Tongestein zusammenfassend als nicht günstig bewertet.

Kriterium 6 zur Bewertung der Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten

Mit der Bewertung der *Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten* soll sichergestellt werden, dass es auch dann nicht zu einem erhöhten Stofftransport aus dem Endlager kommt, wenn durch die Errichtung eines Endlagerbergwerks induzierte Schädigungen des Gebirges in Betracht gezogen werden. Dabei wird zur Bewertung aller Indikatoren im Rahmen des Referenzdatensatzes auf Erfahrungs- und Literaturwerte zurückgegriffen.

Der Indikator *Verhältnis repräsentative Gebirgsdurchlässigkeit/repräsentative Gesteinsdurchlässigkeit* wird bei einem Wert kleiner als 10 als günstig bewertet. für einen Wert zwischen 10 und 100 erfolgt die Bewertung als bedingt günstig, über 100 als weniger günstig. Dabei wird „aufgrund des Fehlens von ortsbezogenen In-situ-Messwerten [...] das Gebirge als unverritz betrachtet (BGE

²⁰ Als Permeabilität bezeichnet man die Durchlässigkeit der Struktur für andere Stoffe wie z.B. Gase oder Flüssigkeiten.

2020g). Für Steinsalz in steiler Lagerung wird der Indikator mit 1 angegeben und damit mit günstig bewertet, da „die Gebirgs- und Gesteinsdurchlässigkeit gleich ist“ (BGE 2020g). Für Tongestein wird im Referenzdatensatz (BGE 2020g) angenommen, dass „bei Abwesenheit von Standortdaten [...] ein ausreichend großer Bereich für einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich mit geringer oder keiner Klüftung existiert. Gebirgs- und Gesteinsdurchlässigkeit können damit die gleiche Größenordnung haben“. Damit wäre ein Verhältnis von < 10 anzunehmen und der Indikator als günstig zu bewerten.

Der Indikator *Erfahrungen über die Barrierewirksamkeit der Gebirgsformationen* wird nach Anlage 6 zu § 24 Abs. 4 StandAG mit Hilfe von sieben Erfahrungsbereichen bewertet: 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. Laut StandAG ist ein Wirtsgesteinstyp als günstig einzustufen, wenn dieser „anhand eines oder mehrerer Erfahrungsbereiche als gering durchlässig oder geologisch dicht identifiziert wird und dies auch unter geogener oder technogener²¹ Beanspruchung der Fall ist“ (BGE 2020g). Für Teilgebiete in Steinsalz sieht die BGE drei der Erfahrungsbereiche als erfüllt an. Da Salzformationen laut (BGE 2020g) damit „mehrere der Erfahrungsbereiche“ erfüllen, werden sie für diesen Indikator standortunabhängig in die Wertungsgruppe günstig eingeordnet. Gleiches gilt für Tongesteine, für die nach dem Referenzdatensatz zwei der Erfahrungsbereiche erfüllt sind.

Der Indikator *Rückbildung der Sekundärpermeabilität durch Risschließung* wird anhand von Materialeigenschaften des Wirtsgesteins bewertet. Ausgehend von der Feststellung, dass „für die genaue Bewertung der Fragestellung Angaben erforderlich sind, die erst im späteren Rahmen der Endlagerplanung vorliegen können“ (BGE 2020g), wird in Phase 1 des Standortauswahlverfahrens vorerst eine qualitative Einschätzung des Gesteinsverhaltens, basierend auf den bisher im Bergbau und der Forschung gemachten Erfahrungen, angewendet. Aufgrund dieser Erfahrungswerte werden für Salinalgesteine deren viskosen Eigenschaften hervorgehoben, durch die Klüfte im Gestein verheilen können. Die BGE folgt damit (Lux und Eberth 2002a) in ihrer Einschätzung, dass die „Sekundärpermeabilität signifikant reduziert“ wird und bewertet deshalb diesen Indikator für Steinsalz in steiler Lagerung grundsätzlich mit günstig. Für Tongesteine werden im Referenzdatensatz (BGE 2020g) eine Reihe von Mechanismen erläutert, die zur Risschließung beitragen können. Der Indikator wird als günstig bewertet.

Auch zur Beurteilung des Indikators *Rückbildung der mechanischen Eigenschaften durch Rissverheilung* liegen für Steinsalz in der ersten Phase des Standortauswahlverfahrens keine Werte vor, „so dass vorerst eine auf dem Wirtsgestein basierende Bewertung stattfinden muss“ (BGE 2020g). Unter erneutem Verweis auf Lux und Eberth (2002a) wird der Indikator als günstig bewertet. Für Tongestein werden, ähnlich wie beim Indikator zur Risschließung, im Referenzdatensatz Mechanismen zur Rissverheilung aufgeführt, jedoch keine Information zur Bewertung des Indikators gegeben. Der Indikator wird jedoch als günstig bewertet. Den Indikatoren folgend wurde auch das Kriterium für Gebiete in Tongestein und Steinsalz als günstig bewertet.

²¹ Unter geogener Beanspruchung ist der Einfluss von Kräften zu verstehen, die durch geologische Prozesse, bspw. Senkung oder Hebung der Erdkruste durch Eisbedeckung während Kaltzeiten, wirken können. Technogene, also durch den Einsatz von Technik durch Menschen verursachte Beanspruchungen können insbesondere während der Errichtung und des Betriebs des Endlagerbergwerks entstehen.

Kriterium 7 zur Bewertung der Gasbildung

Die Gasbildungsrate im Endlagerbergwerk soll möglichst gering sein, damit der Gasdruckaufbau klein bleibt und so die Integrität der geologischen Barriere nicht gefährdet wird. Die im Endlagerbergwerk maßgeblich auftretende Gasbildung resultiert aus der Korrosion und Radiolyse von Metall, hier der Abfallbehälter oder der Abfälle selbst, beim Kontakt mit Wasser bzw. Lösungen. Die Menge des Gases, das sich potentiell bilden kann, ist einerseits vom Angebot an Metall und andererseits vom Angebot an Wasser oder Feuchtigkeit abhängig. Da sich die verfügbare Metallmenge aus dem Abfall ergibt, wird die Gasbildung anhand des Indikators *Wasserangebot im Einlagerungsbereich* (StandAG 2017) bewertet. Als Wertungsgruppe gibt das StandAG „trocken“ bis „feucht“ an, ohne dies weiter zu definieren.

Steinsalz ist ein vergleichsweise trockenes Gestein, aber auch darin liegt Wasser in wasserhaltigen Mineralen, als interkristallines Porenwasser oder in Einschlüssen vor. Da der genaue Wassergehalt des jeweiligen Salzgesteins und die daraus resultierende Bewertung derzeit in aller Regel nicht bekannt ist, erfolgt hier die Bewertung anhand von Referenzdaten. In der Arbeitshilfe zu den geowissenschaftlichen Abwägungskriterien (BGE 2020d) erläutert die BGE, dass bei der Bewertung der Gasbildung neben dem Wasserangebot auch die Temperatur und das chemische Milieu am Einlagerungsort zu berücksichtigen sind. Eine Gesamtbetrachtung ist entsprechend im Verlauf des Verfahrens noch standortspezifisch erforderlich. Im Referenzdatensatz (BGE 2020g) werden aus Studien Wassergehalte meist < 1 Gewichtsprozent bzw. zwischen 0,84 % und 3,13 % ermittelt. Entsprechend werden der Indikator „Wassergehalt im Einlagerungsbereich“ und daraus resultierend das Kriterium zur *Bewertung der Gasbildung* für Steinsalz für die Phase 1 des Standortauswahlverfahrens zunächst als günstig bewertet.

Für Tongestein werden im Referenzdatensatz (BGE 2020g) die komplexen Prozesse erläutert, die zur Gasbildung in einem Endlager führen können und inwiefern in Tongesteinen enthaltenes Wasser zu diesen Prozessen beitragen kann. Der Indikator und das Kriterium werden für Tonstein als günstig bewertet.

Kriterium 8 zur Bewertung der Temperaturverträglichkeit

Durch Temperaturerhöhung im Wirtsgestein aufgrund der Abgabe von Wärme der eingelagerten Abfälle sollen weder ein Festigkeitsverlust noch Sekundärpermeabilität, also Wegsamkeiten für den Transport von Fluiden, entstehen. Zur Beurteilung der Temperaturverträglichkeit des Wirtsgesteins dient das Kriterium 8, das mittels Referenzdaten bewertet wird. Indikatoren sind die *Neigung zur Bildung wärmeinduzierter Sekundärpermeabilitäten* und die *Temperaturstabilität hinsichtlich Mineralumwandlungen*.

Sie werden im Referenzdatensatz für Steinsalz gestützt auf Literaturangaben zu physikalischen und geochemischen Eigenschaften von Steinsalz bewertet. Eine Alternative zur Bewertung mit Literaturdaten böten nur In-Situ-Versuche und Laborversuche an Proben der konkreten zu betrachtenden Standortregionen oder Standorte. Der Indikator *Neigung zur Bildung wärmeinduzierter Sekundärpermeabilitäten* wird als günstig bewertet. Begründet wird diese Einstufung mit einem positiven thermischen Expansionskoeffizienten für Steinsalz (BGE 2020g). Auch der Indikator *Temperaturstabilität hinsichtlich Mineralumwandlungen* wird als günstig bewertet. Temperaturbedingte Mineralumwandlungen in Salinalgesteinen finden nach dem Referenzdatensatz (BGE 2020g) als Entwässerung von Salzhydraten statt. Gestützt auf Literaturangaben wird davon ausgegangen, dass

Mineralumwandlungen im Temperaturbereich bis 100 °C (siehe § 27 Abs. 4 StandAG) nicht zu erwarten sind.

Für Tongesteine wird der Indikator *Neigung zur Bildung wärmeinduzierter Sekundärpermeabilitäten* „auf Basis eines positiven thermischen Expansionskoeffizienten als „günstig“ eingestuft“ (BGE 2020g). Begründet wird diese Bewertung damit, dass „unterschiedliche Materialeigenschaften für die Wirtsgesteinstypen als vorteilhaft gesehen werden“ (BGE 2020g). Zur Bewertung des Indikators *Temperaturstabilität hinsichtlich Mineralumwandlungen* wird im Referenzdatensatz im Wesentlichen der Prozess der Illitisierung von 3-Schicht-Tonmineralen beschrieben, der unter anderem dazu führt, dass die Quelfähigkeit von Tongesteinen verloren geht. Der Indikator wird im Referenzdatensatz als günstig bewertet. Gleiches gilt für das Kriterium.

Kriterium 9 zur Bewertung des Rückhaltevermögens im einschlusswirksamen Gebirgsbereich

Schadstoffe, die im Endlager nach der Einlagerung freigesetzt werden, sollen möglichst im ewG bzw. dem Einlagerungsbereich verbleiben. Dazu können verschiedene physikalische, geochemische und hydrochemische Eigenschaften des Wirtsgesteins beitragen, die mittels des Kriteriums *zur Bewertung des Rückhaltevermögens im einschlusswirksamen Gebirgsbereich* abgeprüft werden. Die Bewertung erfolgt anhand des Referenzdatensatzes.

Die Indikatoren *Sorptionskoeffizienten für die betreffenden langzeitrelevanten Radionuklide*, *Gehalt an Mineralphasen mit großer reaktiver Oberfläche*, *Ionenstärke des Grundwassers* und *Öffnungsweiten der Gesteinsporen im Nanometerbereich* werden im Referenzdatensatz für Steinsalz mittels Literaturwerten beurteilt.

Der Indikator *Sorptionskoeffizienten für die betreffenden langzeitrelevanten Radionuklide* wird dabei mit Bezug auf verschiedene Literaturquellen als weniger günstig bewertet, weil Sorption in Steinsalz bzw. an der Oberfläche von Halit-Kristallen praktisch nicht stattfindet (BGE 2020g). Nach jetzigem Kenntnisstand gibt es wenige experimentelle Untersuchungen zur Sorption der genannten Radionuklide im Steinsalz. Mehrere Literaturquellen attestieren dem Wirtsgestein Steinsalz eine „sehr geringe“ bis „nicht signifikante“ Sorption (BGE 2020g), weshalb der Indikator „Sorptionskoeffizienten für die betreffenden langzeitrelevanten Radionuklide“ als weniger günstig eingestuft wurde. Darüber hinaus sind in homogenem Steinsalz keine großen Mengen an Mineralphasen mit großer reaktiver Oberfläche wie Tonminerale und Eisen- und Mangan-Hydroxide und -Oxihydrate zu erwarten (BGE 2020g). Zwar kann im Oberrotliegenden ein hoher Tonanteil vorausgesetzt werden, aber da der Einlagerungsbereich in möglichst reinem, homogenem Steinsalz realisiert wird, kommt auch hier die Sorptionsfähigkeit des Tongesteins nicht zum Tragen.

Für Gebiete mit Tongestein wird der Indikator im Referenzdatensatz als günstig bewertet. Zur Begründung wird unter Bezugnahme auf verschiedene Fachliteratur auf die „im Vergleich zu den meisten anderen Mineralen [...] hohe Kationenaustauschkapazität“ (BGE 2020g) verwiesen. Tonsteine begünstigten damit „eine wirksame Behinderung der Ausbreitung von Radionukliden“ und es sei „für die meisten Elemente mit einer Sorption zu rechnen“.

Als nicht günstig wird für Steinsalz der Indikator *Gehalt an Mineralphasen mit großer reaktiver Oberfläche* bewertet. Möglichst reines Steinsalz besteht hauptsächlich aus dem Mineral Halit, welches nicht zu den Mineralphasen mit großer reaktiver Oberfläche zählt. In einem ewG in „möglichst reinem, homogenem Steinsalz“ sind aufgrund der Bildungsbedingungen des Gesteins „keine großen

Mengen an Mineralphasen mit großer reaktiver Oberfläche wie Tonminerale und Eisen- und Mangan-Hydroxide und -Oxihydrate zu erwarten“ (BGE 2020g).

Für Tongesteine wird dieser Indikator unter Verweis auf einen hohen Gehalt an Eisen- und Mangan-Hydroxiden und -Oxihydraten und die hohe reaktive Oberfläche von Tonmineralen als positiv bewertet. Letztere beeinflussen das Quellverhalten und Sorptionsvermögen des Gesteins, die aber abhängig von der Art und Menge der Tonminerale in einem Tongestein deutlich unterschiedlich ausgeprägt sein können (BGE 2020g).

Der Indikator *Ionenstärke des Grundwassers* wird als günstig bewertet. Im Referenzdatensatz (BGE 2020g) wird dargestellt, dass Grundwässer in der Umgebung von Salzstöcken durch Ablaugungsprozesse in der Regel hohe Ionenstärken aufweisen. Auch für Tongestein erfolgt eine günstige Bewertung des Indikators. Es wird jedoch darauf verwiesen, dass „im Tongestein [...] unterschiedliche Salinitäten des Wassers beobachtet werden, die regional schwanken können“ (BGE 2020g).

Zur Beurteilung des Indikators *Öffnungsweite der Gesteinsporen im Nanometerbereich* liegen nur wenige Daten zur Größe von Poren in Steinsalz oder deren Öffnungsweiten vor. Da Steinsalz eine sehr geringe Porosität besitzt und vorhandene Poren Fluidinklusionen enthalten, wird der Indikator auf Grundlage des Referenzdatensatzes (BGE 2020g) als günstig bewertet. Im Tongestein gibt es „generell einen sehr hohen Anteil an Poren mit geringem Durchmesser im Nanometerbereich“ (BGE 2020g). Es wird im Referenzdatensatz weiter ausgeführt, dass die Porengröße in Tongesteinen durch Trocknungsprozesse beeinflusst werden kann und innerhalb einer Tongesteinsformation stratigraphische und regionale Schwankungen der Porengröße auftreten können

Obwohl im Steinsalz eine hohe Ionenstärke angenommen werden kann und davon ausgegangen wird, „dass keine Poren mit Öffnungsweiten größer als im Nanometerbereich vorhanden sind“ (BGE 2020g), erfolgt die Gesamtbewertung für dieses Kriterium in Steinsalz als nicht günstig. Für Tongesteins-Gebiete wird das Kriterium als günstig bewertet.

Kriterium 10 zur Bewertung der hydrochemischen Verhältnisse

Durch das Kriterium *zur Bewertung der hydrochemischen Verhältnisse* soll sichergestellt werden, dass sich die Tiefenwässer und Mineralphasen im ewG durch die Errichtung des Endlagers und das dabei in das Gebirge eingebrachte Material nicht zu Ungunsten der Langzeitsicherheit verändern. Das Kriterium wird für alle Wirtsgesteine mittels Referenzdaten bewertet.

Die Indikatoren *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 und Geringe Karbonatkonzentration im Tiefenwasser* werden anhand von Literaturdaten bewertet.

Der Indikator *Chemisches Gleichgewicht zwischen dem Wirtsgestein im Bereich des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und dem darin enthaltenen tiefen Grundwasser* wird für Steinsalz als günstig bewertet: Nach dem Referenzdatensatz (BGE 2020g) kann das chemische Gleichgewicht „durch den Sättigungsindex dargestellt werden“, zu dem es in Phase 1 des Standortauswahlverfahrens jedoch noch „keine belastbaren Daten“ gibt. Als Indiz wird daher „eine niedrige Permeabilität zusammen mit einer hohen Mächtigkeit“ genutzt. Daraus kann auf lange Transportzeiten, resultierend

lange Verweilzeiten des Wassers und Einstellung eines chemischen Gleichgewichts geschlossen werden.

Für Tongestein wird der Indikator ebenfalls als günstig bewertet. Es wird „aufgrund geringer Fließgeschwindigkeiten [...] generell davon ausgegangen, dass sich Tongestein im chemischen Gleichgewicht mit dem Grundwasser befindet“ (BGE 2020g). Diese Aussage wird im Referenzdatensatz mit einer Auswahl von Quellen untermauert.

Neutrale bis leicht alkalische Bedingungen (pH-Wert 7 bis 8) im Bereich des Tiefenwassers, der zweite Indikator, wird für Steinsalz als nicht günstig bewertet. Unter Verweis auf Literaturquellen und darin enthaltene Messwerte wird für Steinsalz von neutralen bis leicht sauren Bedingungen ausgegangen (BGE 2020g). Für Tongestein hingegen wird mit neutralen bis leicht alkalischen für das Formationswasser gerechnet (BGE 2020g). Zur Veranschaulichung werden im Referenzdatensatz pH-Werte aus Tongesteinen verschiedener europäischer Länder sowie aus Japan dargestellt. Der Indikator wird für Tongestein als günstig bewertet.

Der Indikator *Anoxisch-reduzierendes Milieu im Bereich des Tiefenwassers* wird unter Verweis auf Literaturquellen als günstig beurteilt. Demnach sind für Salzstöcke und die enthaltenen Lösungen reduzierende Bedingungen zu erwarten (BGE 2020g). Zur Bewertung des Indikators für Tongesteine wird darauf verwiesen, dass in den „meisten tiefen Formationen [...] natürliche anoxisch-reduzierende Verhältnisse“ vorliegen, „wobei die mineralogische Zusammensetzung unter anoxischen Bedingungen in tonigen und tonig-mergeligen Gesteinen keinen Einfluss auf die Lösungen im Wirtsgestein nimmt“ (BGE 2020g). Der Indikator wird für Tongesteine als positiv bewertet.

Auch der Indikator *Möglichst geringer Gehalt an Kolloiden und Komplexbildnern im Tiefenwasser* wird für Steinsalz als günstig gekennzeichnet. Nach dem Referenzdatensatz (BGE 2020g) sind Tiefenwässer in Steinsalz nur als Porenwasser oder in Fluideinschlüssen enthalten, die wiederum nur geringe Mengen an Kolloiden enthalten. Unter der für den Referenzdatensatz getroffenen Annahme, dass ein Endlager in ungestörtem und unverritztem Steinsalz errichtet werden würde, wird auch ein Lösungszutritt mit Zufuhr von Kolloiden in das Grubengebäude ausgeschlossen. Grundsätzlich wird darüber hinaus festgehalten, dass „sich zuverlässige Aussagen zur Menge der Komplexbildner erst im weiteren Verlauf des Verfahrens machen“ lassen.

Im Referenzdatensatz für Tongesteine (BGE 2020g) wird dargestellt, dass „aufgrund hoher Salinitäten der Grundwässer die Stabilität der Kolloide als gering“ erwartet werden kann. Darüber hinaus sei organisches Material, durch dessen Oxidation sich Kolloide bilden, im Tongestein nur in geringer Menge vorhanden und die geringe durchschnittliche Porengröße in Tongesteinen wirke als Ultrafilter für Kolloide. Zu möglichen Komplexbildnern in Tongesteinen liegen keine Aussagen vor. Es werde jedoch erwartet, dass die Gehalte an Komplexbildnern in Tongesteinen nicht gering seien (BGE 2020g). Der Indikator wird als günstig bewertet.

Der letzte Indikator, *Geringe Karbonatkonzentration im Tiefenwasser*, wird für Steinsalz als günstig bewertet, weil die CO₂-Konzentration „im Promillebereich“ (BGE 2020g) liege. „Zuverlässige Aussagen zu eventuell erhöhten CO₂-Vorkommen“ seien jedoch nur aufgrund standortspezifischer Daten möglich. Für Tongesteine wird angenommen, dass die Karbonatkonzentration niedrig sei, jedoch durch karbonatische Zutrittswässer beeinflusst werden könne. In mergeligen Tongesteinen ist der Karbonatanteil höher als in sehr reinen Tongesteinen. Der Indikator wird als günstig bewertet.

Die Gesamtbewertung des Kriteriums erfolgt für Gebiete in Steinsalz mit nicht günstig, für Gebiete in Tongestein als günstig.

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

Das Kriterium zur *Bewertung des Schutzes des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durch das Deckgebirge* wird mittels gebietsspezifischer Daten bewertet. Ihm kommt, wie auch dem geowissenschaftlichen Abwägungskriterium 2, „aufgrund der Datenlage zum jetzigen Zeitpunkt eine besondere Bedeutung zu“ (BGE 2020h).

Der Indikator *Keine Ausprägung struktureller Komplikationen (zum Beispiel Störungen, Scheitelgräben, Karststrukturen) im Deckgebirge, aus denen sich subrosive, hydraulische oder mechanische Beeinträchtigungen für den ewG ergeben könnten* wird anhand von Literatur sowie Daten aus der Anwendung der Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen bewertet. Dabei werden Scheitelstörungen im Deckgebirge von Salzstöcken, wie in Kapitel 4.1 dargestellt, nicht berücksichtigt.

Auch die Indikatoren *Überdeckung des ewG mit grundwasserhemmenden Gesteinen, Verbreitung und Mächtigkeit grundwasserhemmender Gesteine im Deckgebirge sowie Verbreitung und Mächtigkeit erosionshemmender Gesteine im Deckgebirge des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs* wurden anhand vorliegender Daten und Literatur zum Aufbau des Deckgebirges bewertet. Insbesondere die Ergebnisse der Anwendung der Mindestanforderungen in Bezug auf die Teufenlage des Gebiets spielen hierbei eine Rolle. Dabei wird der Abstand zur Quartärbasis als Maß zur Bewertung herangezogen.

6.2 Anwendung der individuell bewerteten geowissenschaftlichen Abwägungskriterien für die Teilgebiete im Landkreis Cuxhaven

Im Folgenden wird auf die geowissenschaftlichen Abwägungskriterien 2, 3 und 11 sowie für die Tongesteinsgebiete auf das Kriterium 4 eingegangen. Diese Kriterien wurden nicht anhand von Referenzdaten, sondern individuell bewertet. Die Bewertung der Kriterien durch die BGE wird für jedes Teilgebiet dargestellt und die Nachvollziehbarkeit der Methodik, die zur Ausweisung der Teilgebiete führte, bewertet.

6.2.1 Teilgebiet 004: Tongesteine des Tertiärs

Kriterium 2 zur Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper

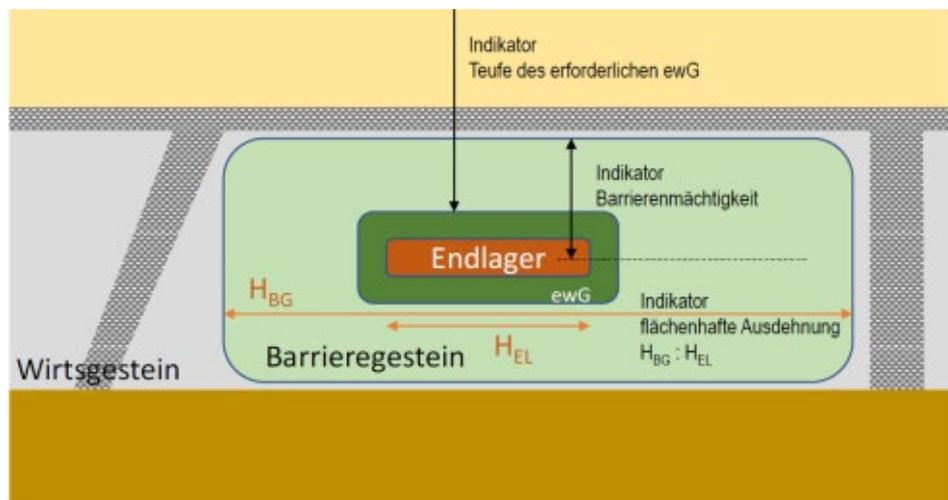
Alle Indikatoren und das Kriterium selbst wurden als günstig bewertet. Der nur für Gebiete in Tongestein angewandte Indikator *Vorhandensein von Gesteinsschichten mit hydraulischen Eigenschaften und hydraulischem Potenzial, die die Induzierung beziehungsweise Verstärkung der Grundwasserbewegung im einschlusswirksamen Gebirgsbereich ermöglichen können* wurde, wie in Kapitel 6 ausgeführt, für alle identifizierten Gebiete in Tongestein als günstig bewertet. Zur Begründung wird im Fachbericht zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien (BGE 2020h) auf Kapitel 7.2.3.2 der Arbeitshilfe zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien (BGE 2020d) verwiesen. Dieser Verweis führt jedoch nicht zum betreffenden Abschnitt der Arbeitshilfe, sondern zum Abschnitt „Anwendung – Barrierewirksamkeit“.

Im erklärenden Abschnitt „Anwendung – Potentialbringer“ wird unter Verweis auf verschiedene Quellen dargestellt, dass „Tongesteine als Grundwassergeringleiter [...] im ungestörten Schichtenpaket notwendigerweise zwischen verschiedenen Stockwerken von Grundwasserleitern“ (BGE 2020d) liegen. Es sei „allerdings beispielsweise denkbar, dass bei einer sehr mächtigen

Tonformation aufgrund der geringen Permeabilitäten“ „trotz Kontakt des Wirtsgesteins zu einem Grundwasserleiter, dieser Grundwasserleiter nicht als in unmittelbarer Nähe zum einschlusswirksamen Gebirgsbereich liegend eingestuft werden muss“. Nach Anlage 2 zu § 24 StandAG ist ein „Grundwasserleiter in Nachbarschaft zum Wirtsgestein/einschlusswirksamen Gebirgsbereich“ (StandAG 2017) als weniger günstig zu bewerten. Die Argumentation in der Arbeitshilfe erscheint der eindeutigen Formulierung im StandAG gegenüber nicht haltbar, wie auch an der Verwendung von Formulierungen wie „allerdings beispielsweise denkbar“, „trotz Kontakt“ und „nicht werden muss“ deutlich wird. Der fachlichen Einschätzung, dass im Zentrum eines ausreichend mächtigen Tongestein-Vorkommens in der Regel kein Anschluss an Potentialbringer vorliegt, soll hier nicht widersprochen werden. Nach dem StandAG erscheint jedoch eine Bewertung als weniger günstig angemessener.

Der Indikator *Barrierenmächtigkeit* wird als günstig eingestuft, da eine Mächtigkeit von mehr als 300 m innerhalb des Teilgebiets für eine Fläche von 24.667 km² vorhanden sei, also ein deutlich größeres Gebiet als den Mindestflächenbedarf von 10 km² (siehe dazu auch Kapitel 6.1). Nach Anlage 2 zu § 24 StandAG gilt eine Barrierenmächtigkeit von > 150 m als günstig. Die Anwendung der doppelten Mächtigkeit von 300 m wird in der Arbeitshilfe (BGE 2020d) damit begründet, dass die gebräuchliche Definition des Begriffs die räumliche Ausdehnung des Einlagerungsbereichs vernachlässige (siehe Abbildung 6-1).

Abbildung 6-1: Darstellung der räumlichen Konfiguration der sicherheitsrelevanten Bestandteile für einschlusswirksame Gebirgsbereiche im Wirtsgestein



Quelle: BGE 2020d

Die Anwendung des Indikators im Zwischenbericht Teilgebiete kann zum jetzigen Zeitpunkt, zu dem weder ein Standort noch ein Sicherheitskonzept gemäß § 10 EndlSiAnfV (2020) vorliegt, als nachvollziehbar und plausibel angesehen werden. Es muss allerdings eingeschränkt werden, dass durch die Bewertung dieses Indikators die tatsächlich als günstig zu betrachtende Fläche des Teilgebiets deutlich eingeschränkt wird. Wie in Kapitel 5.2 ausgeführt, ist zum Beispiel aus der Bohrung B 10 – Oxstedt ersichtlich, dass dort kein tertiäres Tongestein mit einer Mächtigkeit von 300 m ansteht.

Der Indikator *Grad der Umschließung des Einlagerungsbereichs durch einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich* wurde für alle identifizierten Gebiete als günstig bewertet, wie in Kapitel 6 dargestellt. Diese Anwendung ist nachvollziehbar, stellt jedoch eine sehr starke Vereinfachung dar. Die

Voraussetzung, dass Wirtsgestein und ewG Teil ein und desselben Gesteinskörpers seien, der wiederum über gute Einschlusseigenschaften verfügt, ist unter Sicherheitsgesichtspunkten zwar anzustreben. Es kann jedoch nicht zwingend davon ausgegangen werden, dass eine solche Konfiguration von ewG und Einlagerungsbereich in der Realität am Ende des Standortauswahlverfahrens möglich ist, weshalb die Endlagerkommission in ihrem Abschlussbericht (Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe 2016) auch andere Möglichkeiten zur Gewährleistung des sicheren Einschlusses aufgezeigt hat und das StandAG die Möglichkeit einer unvollständigen Umschließung vorsieht. Im weiteren Verfahren sollte in jeder Standortregion und an jedem Standort geprüft werden, ob eine vollständige Umschließung tatsächlich gewährleistet werden kann.

Der Indikator *Teufe der oberen Begrenzung des erforderlichen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs* wurde als günstig bewertet, da sich die Basisfläche des Teilgebiets in Tiefen von bis zu 1500 m (Untergrenze des von der BGE betrachteten Suchraums) befindet und daher die Ausweisung eines ewG in einer Tiefe von mehr als 500 m möglich ist. Die Methodik der Anwendung ist nachvollziehbar. Für die Segmente des Teilgebiets im Landkreis Cuxhaven wurde in Kapitel 5.2 an drei Bohrungen gezeigt, dass die Basislinie der tertiären Tongesteinsvorkommen deutlich höher und im Fall der Bohrung B 10 – Oxstedt auch oberhalb von 500 m unter GOK liegt. Das Ergebnis der Indikatorenbewertung ist also nicht direkt auf den Landkreis Cuxhaven übertragbar.

Auch der letzte Indikator, *Flächenhafte Ausdehnung bei gegebener Mächtigkeit (Vielfaches des Mindestflächenbedarfs)*, wurde für das Teilgebiet 004 als günstig bewertet, da die Fläche des Teilgebiets mit 62.885 km² größer als die für eine günstige Bewertung angesetzten 30 km² ist. Dabei wurde nur die Gesamtfläche des Teilgebiets berücksichtigt. Die Anwendung ist nachvollziehbar, jedoch sollte bei der Ausweisung von Standortregionen im weiteren Verfahren die Bewertung für jedes Segment innerhalb einer Standortregion geprüft werden.

Kriterium 3 zur Bewertung der räumlichen Charakterisierbarkeit

Alle Indikatoren und das Kriterium wurden als günstig bewertet. Der Indikator *Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)* wird als günstig bewertet. Im Steckbrief des Teilgebiets (BGE 2020j) wird ausgeführt, dass die Lage des ewG noch nicht bekannt sei und die Fazies²² im identifizierten Gebiet wechseln könne. Dennoch werde angenommen, dass ein ewG in regional einheitlichen Gesteinstypen gefunden werden könne. Es ist nachvollziehbar, dass dieser Indikator aufgrund der Datenlage, die für den Zwischenbericht Teilgebiete zur Verfügung steht, noch nicht individuell bewertet werden kann. Eine so generische Bewertung, wie sie für das Teilgebiet 004 vorgenommen wird, könnte jedoch in den Referenzdatensatz aufgenommen werden. Eine „individuelle Bewertung“ (BGE 2020h) ist nicht erkennbar.

Zum Indikator *Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit* wird festgehalten, er könne im identifizierten Gebiet jede mögliche Form annehmen (BGE 2020j). Dennoch wird angenommen, „dass ein weitgehend ungestörter einschlusswirksamer Gebirgsbereich, auch aufgrund der beträchtlichen Gesamtfläche des identifizierten Gebiets, ausgewiesen werden kann“ (BGE 2020j). Ähnlich wie für den ersten Indikator muss festgehalten werden, dass es sich nicht um eine individuelle, sondern um eine generische Bewertung auf Grundlage sehr allgemeiner Annahmen handelt. Die Methodik ist nachvollziehbar angesichts der Datengrundlage, könnte jedoch auch in

²² Als (Litho-)Fazies wird die Zusammensetzung eines Sedimentgesteins, insbesondere hinsichtlich der Korngröße seiner Bestandteile, bezeichnet. Im Fall von Beckensedimenten wie den tertiären Ablagerungen im Teilgebiet 004 kann zwischen einer feinkörnigen, tonigen Fazies des Beckeninneren und einer gröberen, siltigen oder sandigen Beckenrandfazies unterschieden werden.

den Referenzdatensatz aufgenommen und sollte spätestens nach Abschluss der obertägigen Erkundung anhand realer Daten bewertet werden.

Die günstige Bewertung des Indikators *Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich* stützt sich auf die Bildungsbedingungen des Gesteins. Da die Tonsteine des Tertiärs im Zentrum eines Sedimentationsbeckens abgelagert wurden, kann davon ausgegangen werden, dass ein ewG gefunden werden kann, in dem die Gesteinseigenschaften nur eine geringe Variationsbreite aufweisen. Diese Argumentation ist angesichts der Größe des Teilgebiets nachvollziehbar.

Aus dem gleichen Grund wird der Indikator *Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften* als günstig bewertet. Die Einschätzung ist nachvollziehbar. Auch die Bewertung dieser letzten beiden Indikatoren und damit die Bewertung des gesamten Kriteriums ist jedoch in keiner Weise als individuell zu bezeichnen und könnte daher Teil des Referenzdatensatzes sein.

Kriterium 4 zur Bewertung der langfristigen Stabilität der günstigen Verhältnisse

Das Kriterium und alle Indikatoren wurden als günstig bewertet. Nach Anlage 4 zu § 24 StandAG ist es als günstig zu bewerten, wenn sich die betrachteten Eigenschaften während der vergangenen 10 Millionen Jahre nicht wesentlich verändert haben. Im Steckbrief des Teilgebiets (BGE 2020j) wird ausgeführt, dass „seit dem Tertiär keine wesentlichen Änderungen“ für die drei Indikatoren Mächtigkeit, Ausdehnung und Gebirgsdurchlässigkeit anzunehmen seien. Da das Tertiär erst vor 2,6 Millionen Jahren endete, kann daraus zunächst keine günstige Bewertung der Indikatoren abgeleitet werden. Im Weiteren wird im Steckbrief für alle Indikatoren dargestellt, dass „seit mehr als zehn Millionen Jahren keine wesentliche Änderung“ der jeweils relevanten Eigenschaft stattgefunden habe. Diese Einschätzung wird nicht weiter begründet und ist auch dem Fachbericht zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien (BGE 2020h) nicht zu entnehmen.

Diese Vorgehensweise erscheint sehr pauschal, ohne dass die vorgenommene Bewertung nachvollziehbar begründet wird. Die Methodik, die zur Bewertung der Indikatoren und des Kriteriums als günstig führt, ist nicht nachvollziehbar.

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

Das Kriterium wurde nach der Bewertung des am schlechtesten eingestuften Indikators als bedingt günstig gekennzeichnet. Der Indikator *Keine Ausprägung struktureller Komplikationen (zum Beispiel Störungen, Scheitelgräben, Karststrukturen) im Deckgebirge, aus denen sich subrosive, hydraulische oder mechanische Beeinträchtigungen für den ewG ergeben könnten* wurde als bedingt günstig bewertet. Es existieren Nachweise zu atektonischen Strukturen und Störungen, die aber aufgrund der schlechten Datenlage nicht hinsichtlich ihrer hydraulischen Wirksamkeit beurteilt werden können (BGE 2020j). Die Bewertung ist nachvollziehbar.

Der Indikator *Überdeckung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs mit grundwasserhemmenden Gesteinen, Verbreitung und Mächtigkeit grundwasserhemmender Gesteine im Deckgebirge* wird als günstig bewertet. Begründet wird das mit einem Abstand der endlagerrelevanten Gesteine zur Basis des Quartärs von mehr als 150 m für große Teile des Gebiets. Die tertiären Gesteine, aus denen diese Überdeckung aufgebaut ist, werden als potentiell grundwasserhemmend angesehen.

Diese Vorgehensweise und Bewertung sind nachvollziehbar; allerdings sollte in weiteren Verfahrensschritt die genaue lithologische Zusammensetzung der Deckgesteine für alle Standortregionen in tertiären Tongesteinen geprüft werden. Die tertiären Sedimente können auch sandig oder siltig ausgebildet sein; in diesem Fall könnten sie unter Umständen nicht grundwasserhemmend wirksam sein.

Auch der Indikator *Verbreitung und Mächtigkeit erosionshemmender Gesteine im Deckgebirge des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs* wird als günstig bewertet. Zur Begründung wird ebenfalls auf den Abstand großer Teile des Gebiets von mehr als 150 m zur Quartärbasis verwiesen und die tertiären Deckgesteine als potentiell erosionshemmend bezeichnet. Diese Darstellung erscheint nicht nachvollziehbar. Die Gesteine des Tertiärs in Norddeutschland sind häufig nur schwach verfestigt. Sie werden vielfach von glazialen Rinnen, also Schmelzwasserrinnen, die sich unter den Gletschern der quartären Kaltzeiten gebildet haben, durchzogen. Diese Rinnen erreichen Tiefen von mehreren hundert Metern. Die Einstufung der tertiären Sedimente Norddeutschlands als erosionshemmend sollte überdacht und die Bewertung unter Umständen zu ungünstig, mindestens aber zu bedingt günstig angepasst werden.

6.2.2 Teilgebiet 006: Tongesteine des unteren Jura

Kriterium 2 zur Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper

Alle Indikatoren und das Kriterium selbst wurden als günstig bewertet. Die Begründung zur Bewertung des Indikators *Vorhandensein von Gesteinsschichten mit hydraulischen Eigenschaften und hydraulischem Potenzial, die die Induzierung beziehungsweise Verstärkung der Grundwasserbewegung im einschlusswirksamen Gebirgsbereich ermöglichen können* ist wortgleich mit der Begründung für das Teilgebiet 004 (siehe Kapitel 6.1.1.).

Auch die Darstellung der Bewertung des Indikators *Barrierenmächtigkeit* entspricht weitgehend dem Steckbrief zu Teilgebiet 004. Die maximale Mächtigkeit wird für das Teilgebiet 006 mit 1200 m angegeben. Eine günstige Barrierenmächtigkeit von mehr als 300 m wird für eine Fläche von 8.895 km² angegeben. Es wird ergänzt, dass „für einen Teil des identifizierten Gebietes [...] die Abdeckung mit Punktdaten aus dem 3D-Modell unvollständig“ (BGE 2020k) sei. Dieser Teil sei für die Bewertung nicht betrachtet worden und habe daher keinen Einfluss auf die Bewertung.

Einen Teil des identifizierten Gebiets bei der Ausweisung als Teilgebiet nicht zu betrachten bedeutet jedoch auch, dass eine mögliche weniger günstige Bewertung des Indikators und damit auch des Kriteriums nicht ausgeschlossen werden kann. Insofern ist die Methodik in diesem Fall nicht nachvollziehbar. Wie für das Teilgebiet 004 anhand der Bohrung B 10 – Oxstedt dargestellt, erfolgte die Bewertung jedoch über die gesamte Fläche und ohne Berücksichtigung abweichender Informationen zu einzelnen Segmenten. Daher ist davon auszugehen, dass auch bei einer Berücksichtigung der nicht betrachteten Teile des Gebiets als potentiell ungenügend hinsichtlich der Barrierenmächtigkeit keine Änderung der Bewertung für das gesamte Teilgebiet erfolgt wäre.

Wie in Kapitel 5.2 dargestellt wurden auf der Fläche des Teilgebiets in drei Bohrungen Gesteine des Unterjura angetroffen. In der Bohrung Westerwana 3 haben die Unterjura-Gesteine eine Mächtigkeit von 116 m, in Westerwana 4 von 280 m und in Kassebruch Z1 von 106 m. Es kann festgehalten werden, dass die günstige Bewertung des Indikators nicht uneingeschränkt auf die Segmente des Teilgebiets im Landkreis Cuxhaven übertragbar ist.

Die Indikatoren *Grad der Umschließung des Einlagerungsbereichs durch einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich*, *Teufe der oberen Begrenzung des erforderlichen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs* und *Flächenhafte Ausdehnung bei gegebener Mächtigkeit (Vielfaches des Mindestflächenbedarfs)* wurden ebenfalls wortgleich zu Teilgebiet 004 bewertet. Die Fläche des identifizierten Gebietes wird mit 18.564 km² angegeben.

Aufgrund der weitgehend identischen Bewertung und Begründung sind auch Nachvollziehbarkeit und Plausibilität der Kriterienanwendung analog zu Teilgebiet 004 einzuschätzen (siehe Kapitel 6.1.1).

Kriterium 3 zur Bewertung der räumlichen Charakterisierbarkeit

Alle Indikatoren und das Kriterium selbst wurden als günstig bewertet. Die Bewertung des Indikators *Gesteinsausbildung* wird identisch zu Teilgebiet 004 vorgenommen. Für den Indikator *Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit* erfolgt die Darstellung der Bewertung wortgleich zu Teilgebiet 004.

Zum Indikator *Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen* wird dargestellt, dass die Beckenfazies des Norddeutschen Beckens im Unterjura vorwiegend tonig ausgeprägt sei, so „dass ein einschlusswirksamer Gebirgsbereich mit geringen Variationsbreiten der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich identifiziert werden“ (BGE 2020k) könne. Diese Begründung erscheint nachvollziehbar.

Wie schon am Teilgebiet 004 erläutert, wird auch für das Teilgebiet 006 der Indikator *Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften* mit der gleichen Begründung nachvollziehbar als günstig bewertet. Die fast kongruente Anwendung des geowissenschaftlichen Abwägungskriteriums zur *Bewertung der räumlichen Charakterisierbarkeit* für die Teilgebiete 004 und 006 verdeutlicht allerdings noch einmal die Einschätzung, dass es sich hier um eine sehr pauschalisierte Kriterienanwendung handelt und eine Aufnahme in den Referenzdatensatz sinnvoll erscheint. Die einzig individuelle Bewertung ist die Darstellung des Sedimentationsraums; in stratigraphischen Formationen, die geeignete Tonformationen enthalten, ist jedoch auch immer von einem entsprechenden Ablagerungsraum und damit von einer geringen Variationsbreite der Gesteinseigenschaften auszugehen.

Kriterium 4 zur Bewertung der langfristigen Stabilität der günstigen Verhältnisse

Das Kriterium und alle Indikatoren wurden als günstig bewertet. Die Darstellung des Kriteriums mit Begründung und Bewertung der Indikatoren erfolgte wortgleich zu Teilgebiet 004. Wie oben dargestellt (Kapitel 6.1.1), erscheint die Methodik sehr pauschal und nicht nachvollziehbar.

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

Das Kriterium wurde nach der Bewertung des am schlechtesten eingestufteten Indikators als bedingt günstig gekennzeichnet. Die Darstellung im Steckbrief des Teilgebiets (BGE 2020k) ist weitgehend wortgleich mit dem Steckbrief zum Teilgebiet 004. Auch die Bewertung der Indikatoren ist identisch. Für die 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 wird jeweils, analog zum Indikator *Barrierenmächtigkeit* des Kriteriums zur Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper ergänzt, dass für einen Teil des Gebiets die Abdeckung mit Punktdaten aus dem 3D-Modell unvollständig sei, dieser Teil nicht betrachtet werde und daher keine Einfluss auf die Bewertung habe.

Da für die beiden Teilgebiete 004 und 006 in den IG-Steckbriefen identische Teufenlagen angegeben werden, kann die zu Teilgebiet 004 getroffene Feststellung hinsichtlich der erosionshemmenden Wirkung tertiärer Deckgesteine auch für die Gesteine des Teilgebiets 006 als gültig betrachtet werden. Wo die Unterjura-Tongesteine von jüngeren Gesteinen des Juras oder der Kreide überdeckt sind, kann von einem wirksamen Erosionsschutz ausgegangen werden. Stehen, beispielsweise aufgrund tektonischer Störungen, im Hangenden²³ des Unterjura Gesteine des Tertiär oder jünger an, ist deren erosionshemmende Wirkung im weiteren Verfahren standortspezifisch nachzuweisen. Die Bewertung der beiden ersten Indikatoren ist, analog zum Teilgebiet 004, nachvollziehbar.

Der Indikator *Keine Ausprägung struktureller Komplikationen (zum Beispiel Störungen, Scheitelgräben, Karststrukturen) im Deckgebirge, aus denen sich subrosive, hydraulische oder mechanische Beeinträchtigungen für den ewG ergeben könnten* wurde, wie auch im Teilgebiet 004, als bedingt günstig bewertet. Es existieren Nachweise zu atektonischen Strukturen und Störungen, die aber aufgrund der schlechten Datenlage nicht hinsichtlich ihrer hydraulischen Wirksamkeit beurteilt werden können (BGE 2020k). Die Bewertung ist grundsätzlich nachvollziehbar. Allerdings wurde in der Bohrung Kassebruch Z1 im Hangenden der Unterjura-Gesteine eine Diskordanz²⁴ mit einer Schrägaufschichtung angetroffen. Gleiches gilt für die Bohrung Westerwana 3. Im weiteren Verfahren muss geprüft werden, dass diese Störungen nicht hydraulisch wirksam sind, sollten die betreffenden Segmente des Teilgebiets 006 als Standortregionen ausgewiesen werden.

6.2.3 Teilgebiet 067: Salzstöcke Altenbruch/Westerwana/Alfstedt/Beverstedt

Kriterium 2 zur Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper

Alle Indikatoren und das Kriterium wurden als „günstig“ eingestuft. Der Indikator *Barrierenmächtigkeit* wird mit günstig bewertet, da bei der vorliegenden maximalen Mächtigkeit von 770 m eine Fläche von 28,1 km² mit einer Mächtigkeit von mehr als 300 m ausgewiesen werden kann. Als Mindestflächenbedarf werden, wie in Kapitel 6.1 ausgeführt, 3 km² angenommen. Als günstige Barrierenmächtigkeit wird abweichend von Anlage 2 zu § 24 Abs. 3 StandAG, analog zum Vorgehen in Tongesteinen, eine Mächtigkeit von 300 m angesetzt. Zur Erläuterung siehe Kapitel 6.1.1. Da zurzeit weder ein Standort noch ein Sicherheitskonzept für das Endlager bekannt sind, ist das Vorgehen bei der Bewertung des Indikators im Rahmen des Zwischenberichts Teilgebiete nachvollziehbar.

Wie in Kapitel 5.2 erläutert, wurden in den Bohrungen Altenbruch 1 bis 3, die sich im nördlichen Segment des Teilgebiets im Landkreis Cuxhaven bzw. in dessen unmittelbarer Nähe befinden, keine Gesteine des Zechsteins erbohrt. Daran wird deutlich, dass die Bewertung des Indikators nicht auf die gesamte Fläche des Teilgebiets übertragbar ist.

²³ Als Hangendes werden die eine Gesteinseinheit überlagernden Gesteine bezeichnet, als Liegendes die unterlagernden Einheiten

²⁴ Als Diskordanz bezeichnet man in der Geologie das winkelige oder unregelmäßige Aufeinanderliegen von Gesteinsschichten. Eine Diskordanz mit einer Schrägaufschichtung beschreibt die Beobachtung, dass an dieser Stelle Gesteine schräg, nicht parallel zu einer Schichtgrenze, über andere Gesteine geschoben wurden.

Der Indikator *Grad der Umschließung des Einlagerungsbereichs durch einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich* wurde für alle Wirtsgesteine, wie in Kapitel 6 dargestellt, als günstig bewertet. Dieses Vorgehen ist im Rahmen des Zwischenberichts Teilgebiete nachvollziehbar, stellt jedoch eine sehr starke Vereinfachung dar. Siehe dazu auch Kapitel 6.1.1.

Zur Bewertung der *Teufe der oberen Begrenzung des erforderlichen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs* wird davon ausgegangen, dass innerhalb des identifizierten Gebietes, das zwischen 730 und 1500 m unter GOK liegt, potentiell ein ewG mit einer Mächtigkeit von 100 m in einer Tiefe größer 500 m unter GOK ermittelt werden kann. Daher wird der Indikator als günstig bewertet. Die Methodik und die daraus resultierende Bewertung sind nachvollziehbar.

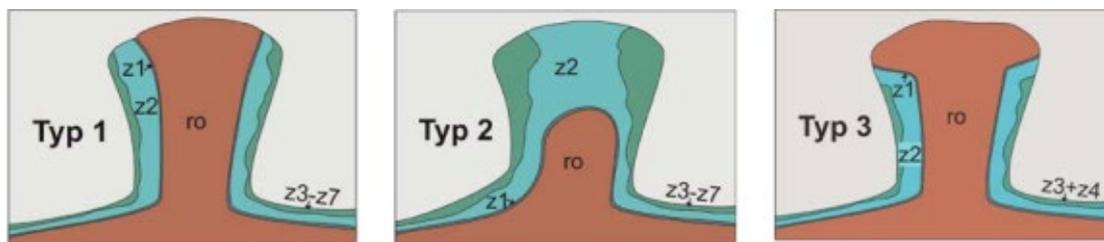
Der Indikator *Flächenhafte Ausdehnung bei gegebener Mächtigkeit* wird ebenfalls als günstig eingestuft, da die Fläche des identifizierten Gebietes mit 59 km² deutlich oberhalb des als günstig angenommenen dreifachen Flächenbedarfs (siehe Kapitel 6) von 9 km² für einen ewG liegt. Wie in Kapitel 6.1.1 erläutert, ist die Methodik nachvollziehbar, sollte jedoch bei der Ausweisung von Standortregionen im weiteren Verfahren die Bewertung für jedes Segment innerhalb einer Standortregion geprüft werden.

Wie bei den Teilgebieten in Tongestein orientiert sich die Gesamtbewertung des Kriteriums an der jeweils schlechtesten Bewertung der Indikatoren, da dem Kriterium 2 „aufgrund der Datenlage zum jetzigen Zeitpunkt eine besondere Bedeutung“ (BGE 2020I) zugeschrieben wird.

Kriterium 3 zur Bewertung der räumlichen Charakterisierbarkeit

Für Teilgebiete in Steinsalz erfolgt die Bewertung der *räumlichen Charakterisierbarkeit*, wie für die Teilgebiete in Tongestein, anhand von Fachliteratur zu steilstehenden Salinarstrukturen allgemein – ohne konkreten Bezug zu dem vorliegenden Steinsalzvorkommen. Eine individuelle Bewertung ist nur durch die Bewertung der Indikatoren *Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich*, *Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften* und *Gesteinsausbildung* in Doppelsalinaren in Abhängigkeit von ihrem Internbautyp (Abbildung 6-2) zu erkennen (siehe Kapitel 6).

Abbildung 6-2: Internbautypen von Doppelsalinaren



Quelle: BGE 2020h. Die Bezeichnung ro steht für Rotliegend-Gestein, z1 bis z7 für die verschiedenen Zyklen der Zechstein-Evaporite. Als Wirtsgestein für ein Endlager wird ein besonders reines Steinsalz-Vorkommen benötigt. Dies ist erfahrungsgemäß insbesondere im z2 zu finden. Daher bewertet die BGE Doppelsalinare vom Internbautyp 2 als günstig.

Nach dem Teilgebiets-Steckbrief (BGE 2020I) handelt es sich um ein Doppelsalinar. Da die genannten Indikatoren als günstig bewertet wurden, geht die Vorhabenträgerin offensichtlich davon aus, dass ein Doppelsalinar vom Internbautyp 2 vorliegt. Wie in Kapitel 5.2 dargestellt wurden innerhalb des nördlichen Segments des Teilgebiets in den Bohrungen Altenbruch 1 und 2 in endlagerrelevanten Tiefen Rotliegendgesteine erbohrt, jedoch keine Gesteine des Zechsteins angetroffen. Die

günstige Bewertung der Indikatoren ist somit nicht auf die gesamte Fläche des Teilgebiets übertragbar. Dennoch erscheint die Methodik für die Ausweisung von Teilgebieten im Zwischenbericht angemessen; im nächsten Verfahrensschritt sollten alle vorliegenden Informationen genutzt und auch die Daten bestehender Schichtenverzeichnisse von Bohrungen herangezogen werden.

Der Indikator *Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit* wurde für Steinsalz in steiler Lagerung grundsätzlich als bedingt günstig bewertet (siehe Kapitel 6). Aufgrund dieser mangelnden Differenzierung wird der Indikator als „für die Bewertung des Kriteriums nicht ausschlaggebend“ (BGE 2020I) eingestuft. Da „die Anzahl der Bewertungen mit „günstig“ höher ist als die Anzahl der Bewertungen mit „bedingt günstig“ (BGE 2020I) wird das Kriterium als günstig bewertet. Insgesamt ist die Methodik zur Anwendung des geowissenschaftlichen Abwägungskriteriums 3 zwar nachvollziehbar. Aufgrund der sehr pauschalen Betrachtung aller Indikatoren könnte dieses Kriterium auch in den Referenzdatensatz aufgenommen werden. Alle Indikatoren sollten bei der nächsten Anwendung des Kriteriums im Rahmen des Standortauswahlverfahrens auf Grundlage realer Daten behandelt werden.

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

Die Bewertung des *Schutzes des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durch das Deckgebirge* erfolgt auf der Grundlage gebietsspezifischer Daten und erfolgt für das Teilgebiet 067 als bedingt günstig. Es wurden drei Indikatoren gebietsspezifisch betrachtet. Die Gesamtbewertung des Kriteriums richtet sich aufgrund der besonderen Bedeutung (BGE 2020I) dieser gebietsspezifischen Betrachtung nach der schlechtesten Bewertung der Indikatoren.

Der Indikator *Überdeckung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs mit grundwasserhemmenden Gesteinen, Verbreitung und Mächtigkeit grundwasserhemmender Gesteine im Deckgebirge* wurde aufgrund der mächtigen vollständigen Überdeckung durch potentiell grundwasserhemmende Gesteine (Tertiär oder älter) sowie der Annahme, dass kein Kontakt zwischen Ablagerungen des Quartär und der Salzstruktur vorhanden ist, mit günstig bewertet. Auch der Indikator *Verbreitung und Mächtigkeit erosionshemmender Gesteine im Deckgebirge des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs* wird auf Grundlage dieser mächtigen Überdeckung als günstig eingestuft, da „Gesteine des Tertiär oder älter [...] als potentiell erosionshemmend betrachtet werden“ (BGE 2020I).

Die Einschätzung tertiärer, häufig nur schwach verfestigter Gesteine als erosionshemmend wurde in Kapitel 6.1.1 diskutiert. Da aus den Bohrungen im Teilgebiet 067 ersichtlich ist, dass die Rotliegend- und Zechstein-Gesteine jeweils nicht nur von tertiären, sondern auch von Kreide- und zum Teil triassischen Sedimentgesteinen überdeckt werden, kann für das Teilgebiet 067 die Anwendung dieser Indikatoren als plausibel und nachvollziehbar im Rahmen des Zwischenberichts Teilgebiete bewertet werden.

Obwohl Nachweise zu Störungen innerhalb des identifizierten Gebietes vorliegen, nimmt die BGE zum jetzigen Zeitpunkt im Verfahren keine hydraulische Wirksamkeit auf das identifizierte Gebiet an und bewertet den Indikator *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* entsprechend Anlage 11 zu § 24 Absatz 5 StandAG mit bedingt günstig.

Diese Einschätzung erscheint nicht nachvollziehbar. Auf Scheitelstörungen an Salzstöcken und deren Behandlung im Zwischenbericht Teilgebiete wird in Kapitel 4.1 eingegangen. Darüber hinaus

gibt die Bohrung Altenbruch 1 Aufschluss über eine Diskordanz mit Schrägaufschiebung direkt oberhalb des Rotliegend-Salinars. Gleiches gilt für die Bohrung Alfstedt 1 im Hangenden des Zechsteinsalinars. Zum Salzstock Alfstedt hält Jaritz (1983) darüber hinaus fest, „eine quartäre Rinne [liege] über seiner Längsachse“. Auch der Salzstock Westerwanna wird nach Jaritz (1983) von quartären Rinnen tangiert. Nach Frisch und Kockel (2004) ist der Salzstock Alfstedt „von Scheitelstörungen bzw. -gräben durchzogen“. Zum Salzstock Beverstedt führen Frisch und Kockel (2004) aus, es sei eine Scheitelstörung entwickelt, die den Caprock bis 700 m versetze. Diese Hinweise, insbesondere die Existenz quartärer, also durch Schmelzwasser gebildeter, Rinnen, legen nahe, dass „strukturelle Komplikationen mit potenzieller hydraulischer Wirksamkeit“ (StandAG 2017, Anlage 11 zu § 24 Abs. 3) vorliegen und der Indikator und damit auch das Kriterium als ungünstig zu bewerten sind.

6.2.4 Teilgebiet 068: Salzstöcke Armstorf/Odisheim/Osterbruch

Kriterium 2 zur Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper

Der Indikator *Barrierenmächtigkeit* wird für das Teilgebiet 068 als bedingt günstig bewertet, da die maximale Mächtigkeit des Gebiets zwar 700 m betrage, jedoch nur eine Fläche von 0,4 km² die als günstig bewertete Mächtigkeit von mehr als 300 m aufweist. Die Methodik zur Anwendung des Indikators wird in den Kapiteln 6.1.1 und 6.1.3 erläutert. Da zurzeit weder ein Standort noch ein Sicherheitskonzept für das Endlager bekannt sind, ist das Vorgehen bei der Bewertung des Indikators im Rahmen des Zwischenberichts Teilgebiete nachvollziehbar.

Der Indikator *Grad der Umschließung des Einlagerungsbereichs durch einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich* wurde für alle Wirtsgesteine, wie in Kapitel 6 dargestellt, als günstig bewertet. Dieses Vorgehen ist im Rahmen des Zwischenberichts Teilgebiete nachvollziehbar, stellt jedoch eine sehr starke Vereinfachung dar. Siehe dazu auch Kapitel 6.1.1.

Zur Bewertung der *Teufe der oberen Begrenzung des erforderlichen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs* wird davon ausgegangen, dass innerhalb des identifizierten Gebietes, das zwischen 800 und 1500 m unter GOK liegt, potentiell ein ewG mit einer Mächtigkeit von 100 m in einer Tiefe größer 500 m unter GOK ermittelt werden kann. Daher wird der Indikator als günstig bewertet. Die Methodik und die daraus resultierende Bewertung sind nachvollziehbar.

Der Indikator *Flächenhafte Ausdehnung bei gegebener Mächtigkeit* wird ebenfalls als günstig eingestuft, da die Fläche des identifizierten Gebietes mit 274 km² deutlich oberhalb des als günstig angenommenen dreifachen Flächenbedarfs (siehe Kapitel 6) von 9 km² für einen ewG liegt. Wie in Kapitel 6.1.1 erläutert, ist die Methodik nachvollziehbar, sollte jedoch bei der Ausweisung von Standortregionen im weiteren Verfahren die Bewertung für jedes Segment innerhalb einer Standortregion geprüft werden.

Wie bei den Teilgebieten in Tongestein orientiert sich die Gesamtbewertung des Kriteriums an der jeweils schlechtesten Bewertung der Indikatoren, da dem Kriterium 2 „aufgrund der Datenlage zum jetzigen Zeitpunkt eine besondere Bedeutung“ (BGE 2020I) zugeschrieben wird. Das Kriterium wurde daher als bedingt günstig eingestuft. Diese Bewertung ist nachvollziehbar. In die Gesamtbewertung des Kriteriums ist sie jedoch fälschlicherweise als günstig eingegangen (s. u.).

Kriterium 3 zur Bewertung der räumlichen Charakterisierbarkeit

Wie für das Teilgebiet 067 dargestellt erfolgt die Bewertung der *räumlichen Charakterisierbarkeit* für Teilgebiete in Steinsalz, wie für die Teilgebiete in Tongestein, anhand von Fachliteratur zu steilstehenden Salinarstrukturen allgemein – ohne konkreten Bezug zu dem vorliegenden Steinsalzvorkommen. Eine individuelle Bewertung ist nur durch die Bewertung der Indikatoren *Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich*, *Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften* und *Gesteinsausbildung* in Doppelsalinen in Abhängigkeit von ihrem Internbautyp zu erkennen (siehe Kapitel 6).

Nach dem Teilgebiets-Steckbrief (BGE 2020m) handelt es sich bei der Salzstruktur Basdahl/ Armstorf/ Odisheim/ Osterbruch/Belmhusen/ Süderhastedt/ Tellingstedt/ Pahlhude/ Grevenhorst um ein Doppelsalinar. Da die oben genannten Indikatoren als günstig bewertet wurden, geht die Vorhabenträgerin, wie auch für das Teilgebiet 067, offensichtlich davon aus, dass ein Doppelsalinar vom Internbautyp 2 vorliegt. Innerhalb des Landkreises Cuxhaven wurden auf der Fläche des Teilgebiets 068 die Bohrungen Neuhaus 1, Osterbruch 1 und Monopol 1 abgeteuft. In Osterbruch 1 wurden zwischen 980 m und der Endtiefe von 1123 m unter GOK Rotliegendgesteine, jedoch kein Zechstein angetroffen. In der Bohrung Neuhaus 1 wurden Rotliegendgesteine von 1020 m bis zur Endtiefe von 1203 m erbohrt. Nur in der Bohrung Monopol 1 wurden zwischen 862 und 955,50 m unter GOK Zechstein angetroffen; bis zu einer Tiefe von 890 m ist das Gestein jedoch als Caprock und Anhydritstein gekennzeichnet. Das verweist auf den sogenannten Gipshut, eine Zone der Lösungsverwitterung durch Grundwasser, die am Top der meisten Salzstöcke anzutreffen ist. Die günstige Bewertung der Indikatoren ist somit nicht auf die gesamte Fläche des Teilgebiets übertragbar. Dennoch erscheint die Methodik für die Ausweisung von Teilgebieten im Zwischenbericht angemessen; im nächsten Verfahrensschritt sollten jedoch alle vorliegenden Informationen genutzt und auch die Daten bestehender Schichtenverzeichnisse von Bohrungen herangezogen werden.

Der Indikator *Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit* wurde für Steinsalz in steiler Lagerung grundsätzlich als bedingt günstig bewertet (siehe Kapitel 6). Aufgrund dieser mangelnden Differenzierung wird der Indikator als „für die Bewertung des Kriteriums nicht ausschlaggebend“ (BGE 2020m) eingestuft. Da „die Anzahl der Bewertungen mit „günstig“ höher ist als die Anzahl der Bewertungen mit „bedingt günstig“ (BGE 2020m) wird das Kriterium als günstig bewertet. Insgesamt ist die Methodik zur Anwendung des geowissenschaftlichen Abwägungskriteriums 3 zwar nachvollziehbar. Aufgrund der sehr pauschalen Betrachtung aller Indikatoren könnte dieses Kriterium auch in den Referenzdatensatz aufgenommen werden. Alle Indikatoren sollten bei der nächsten Anwendung des Kriteriums im Rahmen des Standortauswahlverfahrens auf Grundlage realer Daten behandelt werden.

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

Die Bewertung des *Schutzes des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durch das Deckgebirge* erfolgt auf der Grundlage gebietsspezifischer Daten und erfolgt für das Teilgebiet 068 als bedingt günstig. Es wurden drei Indikatoren gebietsspezifisch betrachtet. Die Gesamtbewertung des Kriteriums richtet sich aufgrund der besonderen Bedeutung (BGE 2020I) dieser gebietsspezifischen Betrachtung nach der schlechtesten Bewertung der Indikatoren.

Der Indikator *Überdeckung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs mit grundwasserhemmenden Gesteinen, Verbreitung und Mächtigkeit grundwasserhemmender Gesteine im Deckgebirge*

wurde aufgrund der mächtigen vollständigen Überdeckung durch potentiell grundwasserhemmende Gesteine (Tertiär oder älter) sowie der Annahme, dass kein Kontakt zwischen Ablagerungen des Quartär und der Salzstruktur vorhanden ist, mit günstig bewertet. Auch der Indikator *Verbreitung und Mächtigkeit erosionshemmender Gesteine im Deckgebirge des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs* wird auf Grundlage dieser mächtigen Überdeckung als günstig eingestuft, da „Gesteine des Tertiär oder älter [...] als potentiell erosionshemmend betrachtet werden“ (BGE 2020m).

Die Einschätzung tertiärer, häufig nur schwach verfestigter Gesteine als erosionshemmend wurde in Kapitel 6.1.1 diskutiert. Da, wie schon im Teilgebiet 067, aus den Bohrungen im Teilgebiet 068 ersichtlich ist, dass die Rotliegend- und Zechstein-Gesteine jeweils nicht nur von tertiären, sondern auch von Kreide- und zum Teil triassischen Sedimentgesteinen überdeckt werden, kann für das Teilgebiet 068 die Anwendung dieser Indikatoren als plausibel und nachvollziehbar im Rahmen des Zwischenberichts Teilgebiete bewertet werden.

Obwohl Nachweise zu Störungen innerhalb des identifizierten Gebietes vorliegen, nimmt die BGE zum jetzigen Zeitpunkt im Verfahren keine hydraulische Wirksamkeit auf das identifizierte Gebiet an und bewertet den Indikator *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* entsprechend Anlage 11 zu § 24 Absatz 5 StandAG mit bedingt günstig.

Diese Einschätzung erscheint nicht nachvollziehbar. Auf Scheitelstörungen an Salzstöcken und deren Behandlung im Zwischenbericht Teilgebiete wird in Kapitel 4.1 eingegangen. Darüber hinaus gibt die Bohrung Osterbruch 1 Aufschluss über eine Diskordanz mit Schrägaufschiebung direkt oberhalb des Rotliegend-Salinars. Nach Jaritz (1983) verläuft über der Längsachse des Salzstocks Armstorf zudem eine quartäre Rinne. Die Existenz einer quartären, also durch Schmelzwasser gebildeten, Rinne, legt nahe, dass „strukturelle Komplikationen mit potenzieller hydraulischer Wirksamkeit“ (StandAG 2017, Anlage 11 zu § 24 Abs. 3) vorliegen und der Indikator und damit auch das Kriterium als ungünstig zu bewerten sind.

Wie oben erwähnt ist das als bedingt günstig bewertete Kriterium 2 fälschlicherweise als günstig in die Gesamtbewertung eingegangen. Im Teilgebietssteckbrief (BGE 2020m) wird in der zusammenfassenden Bewertung angegeben: „Das „Kriterium zur Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper“ sowie das „Kriterium zur Bewertung der räumlichen Charakterisierbarkeit“ wurden mit „günstig“ bewertet. Das „Kriterium zur Bewertung des Schutzes des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durch das Deckgebirge“ wurde mit „bedingt günstig“ bewertet“.

Es kann davon ausgegangen werden, dass es sich bei der Angabe zur Bewertung des geowissenschaftlichen Abwägungskriteriums 2 um einen Übertragungsfehler handelt. Dafür spricht, dass auch in der „Begründung der zusammenfassenden Bewertung“ im Zwischenbericht Teilgebiete (BGE 2020i) (Abbildung 6-3) identisch erläutert wird: „Das „Kriterium zur Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper“ sowie das „Kriterium zur Bewertung der räumlichen Charakterisierbarkeit“ wurden mit „günstig“ bewertet“. In der graphischen Darstellung auf der gleichen Seite wird das Kriterium als ungünstig gekennzeichnet. Zu prüfen wäre, ob bei einer bedingt günstigen Bewertung von zwei der drei individuell bewerteten Abwägungskriterien die Gesamtbewertung des Gebiets als günstig möglicherweise korrigiert werden muss.

Abbildung 6-3: Ausschnitte aus der Gesamtbewertung des Teilgebiets im Zwischenbericht 068

Tabelle 146: Ergebnis der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien des Teilgebiets 068_00TG_163_00IG_S_s_z-ro

Geowissenschaftliche Abwägungskriterien (Anlagen 1 bis 11 (zu § 24) StandAG)	
<p><u>Ergebnis der zusammenfassenden Bewertung:</u></p> <p style="text-align: center;"><i>Indikator Bewertungen:</i></p>	
<p><i>günstig</i></p> <p>Kriterium 1</p> 	<p><u>Kriterium 1:</u> Bewertung des Transportes radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich (Anlage 1 (zu § 24) StandAG)</p>
<p><i>bedingt günstig</i></p> <p>Kriterium 2</p> 	<p><u>Kriterium 2:</u> Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper (Anlage 2 (zu § 24) StandAG)</p> <p><u>Kriterium 3:</u> Bewertung der räumlichen Charakterisierbarkeit (Anlage 3 (zu § 24) StandAG)</p> <p><u>Kriterium 4:</u> Bewertung der langfristigen Sta...</p>
<p><i>günstig</i>  <i>bedingt günstig</i>  <i>weniger günstig</i>  <i>nicht günstig</i>  <i>nicht anwendbar</i>  <i>nicht anwendbar</i> </p>	
<p><u>Begründung der zusammenfassenden Bewertung:</u></p> <p>Acht der elf Kriterien wurden nach dem Referenzdatensatz Steinsalz bewertet (BGE 2020b), dabei sind sechs Kriterien mit „günstig“ und zwei Kriterien mit „nicht günstig“ bewertet.</p> <p>Den gebietsspezifisch bewerteten Kriterien kommt, im Vergleich zu den Referenzdatensätzen, in der jetzigen Phase des Standortauswahlverfahrens eine besondere Bedeutung zu. Eine individuelle Bewertung für jedes identifizierte Gebiet erfolgte für Steinsalz in steiler Lagerung für die Kriterien 2 (Konfiguration), 3 (Charakterisierbarkeit) und 11 (Deckgebirge).</p> <p>Das „Kriterium zur Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper“ sowie das „Kriterium zur Bewertung der räumlichen Charakterisierbarkeit“ wurden mit „günstig“ bewertet. Das „Kriteri-</p>	

Quelle: BGE 2020i, bearbeitet

6.2.5 Teilgebiet 075: Stratiformes Steinsalz des mittleren Keupers

Kriterium 2 zur Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper

Alle Indikatoren und das Kriterium wurden als „günstig“ eingestuft. Die Begründung der Bewertung im Steckbrief des Teilgebiets 075 ist weitgehend wortgleich mit dem entsprechenden Text im Steckbrief des Teilgebiets 067.

Der Indikator *Barrierenmächtigkeit* wird mit günstig bewertet, da bei der vorliegenden maximalen Mächtigkeit von 880 m eine Fläche von 240,6 km² mit einer Mächtigkeit von mehr als 300 m ausgewiesen werden kann. Als Mindestflächenbedarf werden, wie in Kapitel 6.1 ausgeführt, 3 km² angenommen. Als günstige Barrierenmächtigkeit wird abweichend von Anlage 2 zu § 24 Abs. 3 StandAG, analog zum Vorgehen in Tongesteinen, eine Mächtigkeit von 300 m angesetzt. Zur Erläuterung siehe Kapitel 6.1.1. Da zurzeit weder ein Standort noch ein Sicherheitskonzept für das Endlager bekannt sind, ist das Vorgehen bei der Bewertung des Indikators im Rahmen des Zwischenberichts Teilgebiete nachvollziehbar.

Wie in Kapitel 5.2 erläutert, wurden in den Bohrungen Kassebruch 1 und Kassebruch T2 bis in Tiefen von mehr als 1400 m unter GOK keine geeigneten Wirtsgesteine angetroffen. Es liegt nahe, dass die günstige Bewertung des Indikators wahrscheinlich nicht auf das südliche Segment des Teilgebiets im Landkreis Cuxhaven übertragbar ist.

Der Indikator *Grad der Umschließung des Einlagerungsbereichs durch einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich* wurde für alle Wirtsgesteine, wie in Kapitel 6 dargestellt, als günstig bewertet. Dieses Vorgehen ist im Rahmen des Zwischenberichts Teilgebiete nachvollziehbar, stellt jedoch eine sehr starke Vereinfachung dar. Siehe dazu auch Kapitel 6.1.1.

Zur Bewertung der *Teufe der oberen Begrenzung des erforderlichen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs* wird davon ausgegangen, dass innerhalb des identifizierten Gebietes, dessen Basisfläche zwischen 640 und 1500 m unter GOK liegt, potentiell ein ewG mit einer Mächtigkeit von 100 m in einer Tiefe größer 500 m unter GOK ermittelt werden kann. Daher wird der Indikator als günstig bewertet. Die Methodik und die daraus resultierende Bewertung sind nachvollziehbar. Auch hier gilt, dass für das südliche Segment des Teilgebiets die Ausweisung eines ewG oberhalb von 1500 m unter GOK voraussichtlich nicht möglich ist.

Der Indikator *Flächenhafte Ausdehnung bei gegebener Mächtigkeit* wird ebenfalls als günstig eingestuft, da die Fläche des identifizierten Gebietes mit 475 km² deutlich oberhalb des als günstig angenommenen dreifachen Flächenbedarfs (siehe Kapitel 6) von 9 km² für einen ewG liegt. Wie in Kapitel 6.1.1 erläutert, ist die Methodik nachvollziehbar, sollte jedoch bei der Ausweisung von Standortregionen im weiteren Verfahren die Bewertung für jedes Segment innerhalb einer Standortregion geprüft werden.

Kriterium 3 zur Bewertung der räumlichen Charakterisierbarkeit

Für Gebiete mit Steinsalz in stratiformer Lagerung richtet sich die Bewertung des Kriteriums 3, wie für Gebiete in Tongestein, nach der schlechtesten Bewertung eines Indikators. Alle Indikatoren und das Kriterium wurden für das Teilgebiet 075 als günstig bewertet. Wie für Teilgebiete in steil stehenden Salzformationen und in Tongestein erfolgte die Bewertung anhand von Fachliteratur.

Der Indikator *Gesteinsausbildung* wurde als günstig bewertet, da die „horizontale Lagerung von Steinsalz [...] eine gute Vorhersagbarkeit der räumlichen Verteilung von Gesteinstypen“ (BGE 2020n) zulasse. Diese Bewertung kann als nachvollziehbar und plausibel angesehen werden.

Zum Indikator *Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit* wird ausgeführt, „da es sich um stratiforme Ablagerungen“ handele, sei „ohne gegenteilige Informationen oder Untersuchungen davon auszugehen, dass das identifizierte Gebiet ungestört“ (BGE 2020n) sei. Gleichzeitig wird darauf hingewiesen, dass „die Auswirkungen der salztektonischen Überprägung des ursprünglichen Gesteinsverbandes in Salzstrukturen [...] differenziert und standortspezifisch zu beurteilen“ (BGE 2020n) seien. Die günstige Bewertung ist nachvollziehbar und muss im Fall einer Ausweisung des Teilgebiets 075 als Standortregion oder Standort im weiteren Verfahren standortspezifisch überprüft werden.

Auch für die „genaue Verifizierung“ der *Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich* sind „standortspezifische Untersuchungen sowie die Festlegung der räumlichen Lage des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs notwendig“ (BGE 2020n). Aufgrund der Datenlage, die für den Zwischenbericht Teilgebiete zur Verfügung steht, wurde angenommen, dass „flächenhaftausreichend große Bereiche innerhalb des identifizierten Gebiets vorhanden“ (BGE

2020n) seien, die dem Indikator genügen. Daher wurde er als günstig bewertet. Auch diese Bewertung erscheint plausibel und nachvollziehbar.

Das gilt auch für den Indikator *Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften*, der ebenfalls mangels standortspezifischer Informationen und Daten anhand bekannter Informationen zu vergleichbaren Gesteinsabfolgen bewertet wird. Da alle Indikatoren zwar nachvollziehbar, aber mangels standort- oder gebietsspezifischer Informationen nur pauschal, bewertet wurden, hätte auch die Bewertung des geowissenschaftlichen Abwägungskriteriums 3 für stratiformes Steinsalz in den Referenzdatensatz aufgenommen werden können.

Kriterium 4 zur Bewertung der langfristigen Stabilität der günstigen Verhältnisse

Analog zur Anwendung in Tongesteinen erfolgte die Bewertung des Kriteriums 4 für stratiformes Steinsalz anhand von Fachliteratur. Alle Indikatoren und das Kriterium wurden als günstig bewertet. Zur detaillierten Begründung der Bewertung wird auf Anhang 5 zum Fachbericht zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien (BGE 2020h) verwiesen. Darin wird im Wesentlichen die Entwicklungsgeschichte des Norddeutschen Beckens grob zusammengefasst.

Nach Anlage 4 zu § 24 Abs. 3 StandAG ist das geowissenschaftliche Abwägungskriterium 4 als günstig zu bewerten, wenn über einen Zeitraum von 10 Millionen Jahren keine Änderung in den Merkmalen der einzelnen Indikatoren aufgetreten ist. Sowohl der Steckbrief des Teilgebiets (BGE 2020n) als auch der Fachbericht zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien setzen sich nicht detailliert mit dieser Anforderung auseinander.

Unter der Annahme, durch die Darstellung der Entwicklungsgeschichte des Norddeutschen Beckens solle belegt werden, dass innerhalb der letzten 10 Millionen Jahre im Teilgebiet 075 stabile günstige Verhältnisse vorgeherrscht haben, kann die Bewertung als nachvollziehbar angesehen werden. In weiteren Verfahrensschritten muss diese Annahme jedoch durch reale Daten, bspw. durch Datierungen von Mineralneubildungen und -umbildungen in Störungszonen, belegt werden.

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

Das Kriterium wird als bedingt günstig bewertet, da der Indikator *Keine Ausprägung struktureller Komplikationen (zum Beispiel Störungen, Scheitelgräben, Karststrukturen) im Deckgebirge, aus denen sich subrosive, hydraulische oder mechanische Beeinträchtigungen für den ewG ergeben könnten* als bedingt günstig eingestuft wird. Zur Begründung wird angeführt, dass Nachweise zu Störungen innerhalb des Gebiets vorhanden seien, jedoch eine Bewertung der hydraulischen Wirksamkeit aufgrund der vorliegenden Informationen nicht möglich sei (BGE 2020n). Diese Bewertung ist für die Anwendung im Rahmen des Zwischenberichts Teilgebiete nachvollziehbar.

Zur 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* wird jeweils ausgeführt, dass „große Teile des identifizierten Gebiets [...] einen Abstand von größer 150 Metern zwischen der Oberfläche der endlagerrelevanten Gesteinsabfolge und der Basis des Quartär“ aufweisen. Dadurch sei „eine mächtige vollständige Überdeckung durch Gesteine des Tertiär oder älter, welche als potentiell erosionshemmend betrachtet werden, für weite Teile des identifizierten Gebiets gegeben“ (BGE 2020n). Diese Einschätzung

kann angesichts der im Zwischenbericht Teilgebiete dargestellten Datenlage gefolgt werden. Die Einschätzung der Indikatoren und des Kriteriums erscheint nachvollziehbar.

7 Schlussfolgerungen und Bewertung

Im Folgenden werden die wichtigsten Beobachtungen und Schlussfolgerungen zusammengestellt.

Die Methodik und Ergebnisse der Ausweisung von Teilgebieten im Landkreis Cuxhaven sind im Wesentlichen nachvollziehbar und plausibel. Die Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen und geowissenschaftlichen Abwägungskriterien nach den §§ 22 – 24 StandAG wurden nacheinander und aufeinander aufbauend auf die Fläche des Bundesgebiets angewandt und auf diese Weise Teilgebiete ausgewiesen, „die günstige geologische Voraussetzungen für die sichere Endlagerung radioaktiver Abfälle erwarten lassen“ (StandAG 2017). Für einzelne Indikatoren geowissenschaftlicher Abwägungskriterien konnten die Bewertung oder deren Begründung jedoch nicht nachvollzogen werden.

Viele Kriterien und Anforderungen wurden in diesem ersten Schritt der ersten Phase des Standortauswahlverfahrens nur pauschal oder vereinfachend angewendet. Das Ausschlusskriterium *Großräumige Vertikalbewegungen* führte im gesamten Bundesgebiet zu keinem Ausschluss und käme lediglich bei einer Spezifizierung des Kriteriums zum Tragen; das Ausschlusskriterium *Grundwasseralter* konnte auf Grund der zur Verfügung stehenden Datenlage nur an Orten angewendet werden, die schon durch das Ausschlusskriterium *Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit* erfasst waren. Die beiden anderen Ausschlusskriterien haben in Norddeutschland keine Relevanz.

Vor der Anwendung der Mindestanforderungen wurde für die Gebiete, die nicht durch die Anwendung der Ausschlusskriterien aus dem Verfahren ausgeschieden sind, geprüft, ob auf den verbliebenen Flächen geeignete Wirtsgesteine anzutreffen sind. Salzstöcke werden immer dann als geeignet angesehen, wenn Steinsalz der gesteinsbildende Hauptbestandteil ist. Das wird seitens der BGE immer dann als gegeben angesehen, wenn die im Schichtenverzeichnis von Bohrungen verwendeten Gesteinsnamen auf Steinsalz als Hauptkomponente hinweisen. Im vorliegenden Bericht wurde anhand einer Reihe von Bohrungen, die in Segmenten der Teilgebiete 067 und 068 im Landkreis Cuxhaven abgeteuft wurden, gezeigt, dass nach den zugehörigen Schichtenverzeichnissen kein Steinsalz angetroffen wurde. Dennoch wurden diese Salzstöcke, als Teile größerer Salzstrukturen, als Teilgebiete ausgewiesen.

Die Mindestanforderung *Gebirgsdurchlässigkeit* wird nur pauschal anhand der Wirtsgesteinstypen angewendet. Zur Bestimmung der Gebirgsdurchlässigkeit sind in-situ-Versuche notwendig, die in der ersten Phase des Standortauswahlverfahrens noch nicht durchgeführt werden können. Zur Mindestanforderung *Erhalt der Barrierewirkung* findet keine gezielte Datenabfrage ab. Die Anforderung gilt als erfüllt, wenn keine Informationen vorliegen, die gegen den Erhalt der Barrierewirkung für eine Million Jahre sprechen. Es fehlen Indikatoren, nach denen diese Mindestanforderung angewendet und die Erfüllung der Anforderung überprüft werden könnte.

Anhängig vom Wirtsgesteinstyp wurden sieben bis neun der elf geowissenschaftlichen Abwägungskriterien mittels Referenzdaten für die Wirtsgesteinstypen angewendet. Ursächlich ist die Datenlage in der ersten Phase des Standortauswahlverfahrens. Viele der benötigten Informationen liegen nicht flächendeckend vor und müssen zunächst im Rahmen der Erkundung von Standortregionen und Standorten erhoben werden. Das Abwägungskriterium *zur Bewertung der räumlichen Charakterisierbarkeit* wurde für die Wirtsgesteine Steinsalz und Tongestein individuell bewertet. Tatsächlich erfolgte die Bewertung jedoch nur anhand allgemeiner Informationen aus der Fachliteratur und je Wirtsgestein weitgehend identisch. Die Darstellung als individuelle Bewertung ist irreführend. Möglicherweise sollte das Kriterium in den Referenzdatensatz aufgenommen werden.

Gleiches gilt für die individuelle Bewertung des Abwägungskriteriums *zur Bewertung der langfristigen Stabilität der günstigen Verhältnisse* für Tongestein und Steinsalz in stratiformer Lagerung. Die Indikatoren werden gleichlautend mit der Aussage begründet, es sei über einen Zeitraum von 10 Millionen Jahren keine wesentliche Veränderung der jeweiligen Eigenschaften erfolgt. Die Begründung dieser pauschalen Bewertung im Fachbericht erscheint nicht nachvollziehbar. Unter Umständen wäre auch hier eine Aufnahme dieses Kriteriums in den Referenzdatensatz angemessen.

Auch im Landkreis Cuxhaven konnte die Anwendung der Kriterien und Anforderungen, die zur Ausweisung der fünf Teilgebiete geführt haben, grundsätzlich nachvollzogen werden. Offene Fragen und Anmerkungen zur Bewertung im Rahmen des Zwischenberichts Teilgebiete werden im Folgenden für jedes Teilgebiet dargestellt.

Das Teilgebiet 004 besteht aus Tongesteinen des Tertiärs in Norddeutschland. Diese Tongesteine sind zum Teil nur schwach verfestigt. Im Referenzdatensatz wird zitiert, dass davon auszugehen sei, dass die Ablagerungen des Tertiärs, aufgrund des Alters und der bisher erfahrenen geringen Temperatur- und Kompaktionsbelastung, in Teufen zwischen 300 m und 500 m aus Tonen oder bestenfalls im Übergangsbereich zu Tonsteinen liegenden Sedimenten aufgebaut werden (BGE 2020g). Die grundsätzlich günstige Bewertung des Indikators *Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers* im geowissenschaftlichen Abwägungskriterium 1 für Tongesteine muss daher für das Teilgebiet 004 in Frage gestellt werden.

Im Rahmen der Anwendung des geowissenschaftlichen Abwägungskriteriums zur Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper im Teilgebiet 004 wird der Indikator Teufe der oberen Begrenzung des erforderlichen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs als günstig bewertet, da sich die Basisfläche des Teilgebiets in Tiefen von bis zu 1500 m befindet und daher die Ausweisung eines ewG in einer Tiefe von mehr als 500 m möglich sei. Für den Landkreis Cuxhaven konnte an drei Bohrungen gezeigt werden, dass die Basislinie der tertiären Tongesteinsvorkommen deutlich höher und im Fall der Bohrung B 10 – Oxstedt auch oberhalb von 500 m unter GOK liegt. Die Übertragbarkeit der Indikatorenbewertung auf den Landkreis Cuxhaven ist daher fraglich.

Der Indikator Verbreitung und Mächtigkeit erosionshemmender Gesteine im Deckgebirge des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs des geowissenschaftlichen Abwägungskriteriums zur Bewertung des Schutzes des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durch das Deckgebirge wird für das Teilgebiet 004 unter anderem deshalb als günstig bewertet, weil die tertiären Deckgesteine als potentiell erosionshemmend angesehen werden. Da die Gesteine des Tertiärs in Norddeutschland, wie oben ausgeführt, häufig nur schwach verfestigt sind und vielfach von glazialen Rinnen durchzogen werden, die Tiefen von mehreren hundert Metern erreichen, sollte die Bewertung tertiärer Sedimente in Norddeutschland als erosionshemmend überdacht und die Bewertung zu ungünstig, mindestens aber zu bedingt günstig angepasst werden.

Für das Teilgebiet 006 wurde bei der Bewertung des geowissenschaftlichen Abwägungskriteriums *zur Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper* der Indikator *Barrierenmächtigkeit* als günstig bewertet. An den Schichtenverzeichnissen dreier Bohrungen konnte gezeigt werden, dass diese Bewertung nicht uneingeschränkt auf den Landkreis Cuxhaven übertragbar ist.

Darüber hinaus wurden in zwei Bohrungen im Teilgebiet 006 Diskordanzen mit Schrägaufschiebungen angetroffen. Im weiteren Verfahren sollte geprüft werden, dass diese Störungen nicht hydraulisch wirksam sind. Andernfalls müsste die Bewertung des Indikators *Keine Ausprägung struktureller Komplikationen (zum Beispiel Störungen, Scheitelgräben, Karststrukturen) im Deckgebirge, aus denen sich subrosive, hydraulische oder mechanische Beeinträchtigungen für den ewG ergeben*

könnten des geowissenschaftlichen Abwägungskriteriums zur Bewertung des Schutzes des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durch das Deckgebirge zu ungünstig angepasst werden.

Für das Teilgebiet 067 weichen die Angaben zur Tiefenlage der Oberfläche des Salzstocks, die für die Anwendung der Mindestanforderung *minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs* herangezogen werden, von aktuellen Literaturangaben ab. Diese Abweichung sollte aufgelöst werden.

Der Indikator *Keine Ausprägung struktureller Komplikationen (zum Beispiel Störungen, Scheitelgräben, Karststrukturen) im Deckgebirge, aus denen sich subrosive, hydraulische oder mechanische Beeinträchtigungen für den ewG ergeben könnten* des geowissenschaftlichen Abwägungskriteriums zur Bewertung des Schutzes des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durch das Deckgebirge wurde für das Teilgebiet 067 als günstig bewertet. Für die Salzstöcke des Teilgebiets ist die Existenz quartärer Rinnen in der Fachliteratur belegt. Des Weiteren werden in zwei Bohrungen Diskordanzen mit Schrägaufschubung direkt oberhalb des Salinars verzeichnet. Es sind Scheitelstörungen bzw. -gräben überliefert sowie eine Störung, die den Caprock und damit einen Teil des Salinars bis 700 m versetzt. Auf Grund dieser Informationen sollte die Bewertung überprüft und unter Umständen zur Bewertung ungünstig angepasst werden.

Im nördlichen Segment des Teilgebiets 067 konnte an zwei Bohrungen gezeigt werden, dass die günstige Bewertung des Indikators *Barrierenmächtigkeit* des geowissenschaftlichen Abwägungskriteriums zur Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper unter Umständen nicht auf das gesamte Teilgebiet übertragbar ist, da keine Gesteine des Zechsteins erbohrt wurden.

Im Teilgebiet 068 wurden in zwei Bohrungen ab ca. 1000 m unter GOK Rotliegend-Gesteine angetroffen. Dies ist ein Hinweis darauf, dass die Einordnung als Doppelsalinar vom Internbautyp 2 möglicherweise nicht für die gesamte Struktur zutreffend ist. Es ist daher fraglich, ob im nördlichen Segment des Teilgebiets ein geeignetes Vorkommen von Steinsalz zur Errichtung eines Endlagers zu erwarten ist.

Für das Teilgebiet 068 ist in der Literatur die Existenz einer quartären Rinne über der Längsachse des Salzstocks Armstorf überliefert. Deshalb ist auch für dieses Teilgebiet die günstige Bewertung des Indikators *Keine Ausprägung struktureller Komplikationen (zum Beispiel Störungen, Scheitelgräben, Karststrukturen) im Deckgebirge, aus denen sich subrosive, hydraulische oder mechanische Beeinträchtigungen für den ewG ergeben könnten* des geowissenschaftlichen Abwägungskriteriums zur Bewertung des Schutzes des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durch das Deckgebirge in Frage zu stellen.

Darüber hinaus sollte die Gesamtbewertung des Teilgebiets 068 überprüft werden. Wie in Kapitel 6.1.4 gezeigt, wurde bei der Erstellung der Gesamtbewertung der geowissenschaftlichen Abwägung eine günstige Bewertung des individuell bewerteten geowissenschaftlichen Abwägungskriteriums zur Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper zugrunde gelegt. Das Kriterium wurde jedoch als bedingt günstig bewertet. Dieser Fehler sollte der BGE zur Kenntnis gebracht werden, damit eine Neubewertung der Ausweisung des Teilgebiets erfolgen kann.

Im Teilgebiet 075 konnte anhand der Schichtenverzeichnisse zweier Bohrungen gezeigt werden, dass die gesuchten Vorkommen von Keuper-Steinsalz nicht in den endlagerrelevanten Tiefen bis 1500 unter GOK angetroffen werden. Das deutet darauf hin, dass im südlichen Segment des Teilgebiets 075 im Landkreis Cuxhaven möglicherweise kein geeignetes Vorkommen stratiformen Keuper-Steinsalzes ansteht. Für das deutlich größere östliche Segment des Teilgebiets 075 geht aus

dem Schichtenverzeichnis der Bohrung Hemmoor 2 hervor, dass Steinsalz dort erst in einer Tiefe ab 1758 m unter GOK ansteht. Dieser Befund lässt sich nicht auf das gesamte Gebiet übertragen, sollte aber Anlass zur genauen Prüfung der Tiefenlage des Wirtsgesteinsvorkommens im weiteren Verfahren geben.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Ergebnisse des Zwischenberichts Teilgebiete für den Landkreis Cuxhaven nachvollziehbar sind. In einigen Punkten erscheint die Anwendung der Kriterien und Anforderungen des Zwischenberichts jedoch inkonsistent oder ist nicht plausibel. Darüber hinaus wurden verschiedene vorliegende Informationen, beispielsweise aus Fachliteratur und den Schichtenverzeichnissen von Bohrungen, nicht genutzt. Insbesondere sollte die Bewertung des Teilgebiets 068 Basdahl/ Armstorf/ Odisheim/ Osterbruch/ Belmhusen/ Süderhastedt/ Tellingstedt/ Pahlhude/ Grevenhorst überprüft werden. In diesem Fall wurden die Einzelbewertungen der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien fehlerhaft in die Gesamtbewertung übertragen. Für alle Teilgebietssegmente im Landkreis Cuxhaven, insbesondere die Gebiete 067, 068 und 075 in Steinsalz, sollte anhand vorliegender Schichtenverzeichnisse überprüft werden, ob dort geeignete Wirtsgesteine in endlagerrelevanten Tiefen auftreten. Darüber hinaus sollten die aufgeführten Informationen zum Auftreten quartärer Rinnen im Deckgebirge der Teilgebiete 067 und 068 berücksichtigt und in die Bewertung des geowissenschaftlichen Abwägungskriteriums 11 einbezogen werden.

Literaturverzeichnis

Appel, D.; Baltés, B.; Bräuer, V.; Brewitz, W.; Duphorn, K.; Gömmel, R.; Haury, H.-J.; Ipsen, D.; Jentzsch, G.; Kreusch, J.; Kühn, K.; Lux, K.-H.; Sailer, M. et al. (2002): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte, Empfehlungen des AkEnd – Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte, Dezember 2002.

BGE - Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (2018): Arbeitshilfen zur Datenabfrage Mindestanforderungen. Peine, 19.03.2018.

BGE - Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (2020a): Anlage 1A (zum Fachbericht Teilgebiete und Anwendung Geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG), Ergebnisse der Bewertung: Teil A (Teilgebiete). Peine, 28.09.2020.

BGE - Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (2020b): Anwendung Ausschlusskriterien gemäß § 22 StandAG. Peine, 28.09.2020.

BGE - Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (2020c): Anwendung Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG. Peine, 28.09.2020.

BGE - Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (2020d): Arbeitshilfe zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien im Rahmen von § 13 StandAG. Peine, 03.09.2020.

BGE - Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (2020e): IG-Steckbriefe, Anlage zu „Anwendung Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG“. Peine, 23.09.2020.

BGE - Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (2020f): Interaktive Karte zum Zwischenbericht Teilgebiete. Online verfügbar unter <https://www.bge.de/de/endlagersuche/zwischenbericht-teilgebiete/>.

BGE - Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (2020g): Referenzdatensätze zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien im Rahmen von § 13 StandAG, Grundlagen. Peine, 01.09.2020.

BGE - Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (2020h): Teilgebiete und Anwendung Geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG. Peine, 28.09.2020.

BGE - Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (2020i): Zwischenbericht Teilgebiete gemäß § 13 StandAG. Peine, 28.09.2020.

BGE - Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (Hg.) (2020j): Steckbrief 004_00TG_053_00IG_T_f_tpg, Wirtsgestein: Tongestein. Geschäftszeichen: SG02102/5-5/2-2020#12 - Objekt-ID: 829573 - Revision: 000. Peine, 28.09.2020.

BGE - Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (Hg.) (2020k): Steckbrief 006_00TG_188_00IG_T_f_ju, Wirtsgestein: Tongestein. Geschäftszeichen: SG02102/5-5/2-2020#12 - Objekt-ID: 829573 - Revision: 000. Peine, 28.09.2020.

BGE - Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (Hg.) (2020l): Steckbrief 067_00TG_159_00IG_S_s_z-ro, Steinsalz in steiler Lagerung. Geschäftszeichen: SG02102/5-5/2-2020#12 - Objekt-ID: 829573 - Revision: 000. Peine, 28.09.2020.

BGE - Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (Hg.) (2020m): Steckbrief 068_00TG_163_00IG_S_s_z-ro, Steinsalz in steiler Lagerung. Geschäftszeichen: SG02102/5-5/2-2020#12 - Objekt-ID: 829573 - Revision: 000. Peine, 28.09.2020, zuletzt geprüft am 18.06.2021.

BGE - Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (Hg.) (2020n): Steckbrief 075_01TG_189_01IG_S_f_km, Stratiformes Steinsalz. Geschäftszeichen: SG02102/5-5/2-2020#12 - Objekt-ID: 829573 - Revision: 000, 28.09.2020.

BGR - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2016a): Informationssystem Salzstrukturen: Planungsgrundlagen, Auswahlkriterien und Potentialabschätzung für die Errichtung von Salzkavernen zur Speicherung von Erneuerbaren Energien (Wasserstoff und Druckluft), Sachbericht 03ESP323B. InSpEE, 21.03.2016.

BGR - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2016b): Strukturinformation, Alfstedt. Hannover, 2016.

BGR - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2016c): Strukturinformation, Altenbruch. Hannover, 2016.

BGR - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2016d): Strukturinformation, Armstorf. Hannover, 2016.

BGR - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2016e): Strukturinformation, Beverstedt. Hannover, 2016.

BGR - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2016f): Strukturinformation, Odisheim. Hannover, 2016.

BGR - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2016g): Strukturinformation, Osterbruch. Hannover, 2016.

BGR - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2016h): Strukturinformation, Pahlhude. Hannover, 2016.

BGR - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2016i): Strukturinformation, Westerwanna. Hannover, 2016.

Chaudry, S.; Neles, J. (2020): Kurzgutachten zur Umsetzung der Kriterien nach den §§ 22-24 StandAG in Methoden zur Kriterienanwendung durch die Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH. Öko-Institut e. V. Darmstadt, 24.09.2020.

Deutscher Bundestag: Verordnung über Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle (Endlagersicherheitsanforderungsverordnung - EndlSiAnfV), EndlSiAnfV. In: BGBl. I S. 2094, 2103.

Fraktionen CDU/CSU, SPD und BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN (2017): Entwurf eines Gesetzes zur Fortentwicklung des Gesetzes zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle und anderer Gesetze, 07.03.2017.

Frisch, U.; Kockel, F. (2004): Der Bremen-Knoten im Strukturnetz Nordwest-Deutschlands. Stratigraphie, Paläogeographie, Strukturgeologie. In: *Berichte, Fachbereich Geowissenschaften, Universität Bremen*.

Füchtbauer, H. (1988): Sedimente und Sedimentgesteine 4., gänzl. Neubearb. Aufl. (Sediment-Petrologie, T. II). Stuttgart: Schweizerbart.

Jähne-Klingberg, F.; Stück, H.; Bebiolka, A.; Bense, F.; Stark, L. (2019): Prognosemöglichkeiten von großräumigen Vertikalbewegungen in Deutschland (9S2018100000). Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Hannover, Oktober 2019. Online verfügbar unter https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Endlagerung/Downloads/Standortauswahl/Geowissenschaftlich_%20Kriterien/2019_10_28_prognosemoeglichkeiten_vertikalbewegungen_abschlussbericht.pdf?__blob=publicationFile&v=5, zuletzt geprüft am 15.09.2020.

Jaritz, W. (1983): Eignung von Salzstöcken in Niedersachsen zur Endlagerung radioaktiver Abfälle. Hannover, 19.05.1983.

Klaus, R.; Hammer, J.; Pusch, M. (2014): Verbreitung, Zusammensetzung und geologische Lagerungsverhältnisse flach lagernder Steinsalzfolgen in Deutschland. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Hannover, 10.12.2014.

Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (2016): Verantwortung für die Zukunft, Ein faires und transparentes Verfahren für die Auswahl eines nationalen Endlagerstandortes (K-Drs., 268), 2016.

Lux, K.-H.; Eberth, S. (2002a): Entwicklung und Fundierung der Anforderung „Geringe Neigung zur Bildung von Wegsamkeiten“. Clausthal-Zellerfeld, 2002.

Lux, K.-H.; Eberth, S. (2002b): Entwicklung und Fundierung der Anforderung „Günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen“, Teil B: Weiterführende laborative und rechnerische Untersuchungen. Clausthal-Zellerfeld, 2002.

May, F. (2019): Möglichkeiten der Prognose zukünftiger vulkanischer Aktivität in Deutschland (9S2018090000). Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Hannover, Juni 2019.

May, F. (2021): Prognosen und Ausschlussgebiete für zukünftig zu erwartende vulkanische Aktivität. Fachkonferenz Teilgebiete, 1. Beratungstermin. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Veranstalter: Fachkonferenz Teilgebiete, 05.02.2021.

Meschede, M. (2015): Geologie Deutschlands, Ein prozessorientierter Ansatz. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. Online verfügbar unter <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-epflicht-1521567>.

StandAG (2017): Deutscher Bundestag. Standortauswahlgesetz vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), das zuletzt durch Artikel 2 Absatz 16 des Gesetzes vom 20. Juli 2017 (BGBl. I S. 2808) geändert worden ist, StandAG.

Stück, H.; Bense, F.; Frenzel, B.; Henneberg, M.; Kneuker, T.; Lang, J.; Mertineit, M.; Noack, V.; Pollok, L. (2020): Ausschlusskriterium „Aktive Störungszonen“. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Hannover/Berlin, April 2020.