

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

Plausibilitätsbewertung des Teilgebiets:

Darmstadt, 17.09.2021

044_00TG_082_00IG_S_s_z (Salzstock Seefeld)

Autorinnen und Autoren

Dr. Saleem Chaudry
Öko-Institut e.V.

Judith Krohn
Öko-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	4
Tabellenverzeichnis	5
1 Einleitung	6
2 Teilgebiete im Gebiet des Landkreises Wesermarsch	6
3 Anwendung von Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen und geowissenschaftlichen Abwägungskriterien	9
4 Ausschlusskriterien	10
4.1 Anwendung der Ausschlusskriterien für das Teilgebiet Seefeld (044), Schlussfolgerungen und Bewertung	13
5 Wirtsgesteine und Mindestanforderungen an Steinsalz in steiler Lagerung	19
5.1 Anwendung der Mindestanforderungen für das Teilgebiet Seefeld (044), Schlussfolgerungen und Bewertung	21
6 Geowissenschaftliche Abwägungskriterien	24
6.1 Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien für das Teilgebiet Seefeld (044)	33
6.2 Schlussfolgerungen und Bewertung zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien	35
7 Prüfung von Daten und Literatur	37
8 Zusammenfassende Bewertung	40
Literaturverzeichnis	43

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Geographische Lage des Teilgebiets Seefeld innerhalb des Landkreises Wesermarsch	7
Abbildung 4-1: Aktive Störungszone im Bereich des Salzstocks Seefeld (044)	14
Abbildung 4-2: Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit im Bereich des Salzstocks Seefeld (044)	16

Tabellenverzeichnis

Tabelle 4-1:	Ausgeschlossene Bohrungen gemäß Ausschusskriterium 3 und zugehörige Informationen aus den Schichtenverzeichnissen	17
Tabelle 5-1:	Charakteristika des betrachteten Salzstocks zur Anwendung der Mindestanforderungen	22
Tabelle 5-2:	Strukturinformationen zu Teilgebiet Seefeld (044)	23

1 Einleitung

Im Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz – StandAG) (StandAG 2017) 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 gestartet. Es gliedert sich in drei Phasen, deren Ergebnisse jeweils mit einem Bundesgesetz festgelegt werden sollen. Derzeit befindet sich das Standortauswahlverfahren in der ersten Phase.

Nach § 13 des StandAG wurde am 28.09.2020 durch den Vorhabensträger, die Bundesgesellschaft für Endlagerung (BGE), der Zwischenbericht Teilgebiete vorgelegt. Damit wurden in der Phase 1 des Standortauswahlverfahrens ein Zwischenschritt und wichtiger Meilenstein erreicht.

Der Zwischenbericht Teilgebiete¹ benennt die Teilgebiete, die nicht auf Basis der Ausschlusskriterien ausgeschlossen wurden, die alle Mindestanforderungen erfüllen und die nach Anwendung der geologischen Abwägungskriterien als günstig bewertet wurden. Die Festlegung von Größe und Grenzen eines Teilgebietes orientiert sich an der Verbreitung endlagerrelevanter stratigraphischer Einheiten und Wirtsgesteine. Somit können sich auch Teilgebiete überlappen bzw. übereinander liegen.

Mit Schreiben vom 08. Juni 2021 beauftragte der Landkreis Wesermarsch das Öko-Institut e. V., die Ergebnisse der BGE gemäß Zwischenbericht Teilgebiete und untersetzender Unterlagen hinsichtlich des Teilgebiets 044_00TG_082_00IG_S_s_z „Salzstock Seefeld“ fachlich zu beraten.

Im vorliegenden Gutachten wurde die Plausibilität der Vorgehensweise und der Bewertung anhand der verfügbaren Unterlagen geprüft und mit den Vorgaben des Standortauswahlgesetzes abgeglichen. In den folgenden Kapiteln wird zunächst die Anwendung der Ausschlusskriterien, weiter der Mindestanforderungen und anschließend der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien diskutiert. Es wird jeweils auf die Anwendung der Kriterien auf den genannten Salzstock und die Ergebnisse der BGE eingegangen sowie eine Bewertung der Kriterienanwendung vorgenommen.

Darüber hinaus werden Erkenntnisse zu Daten und Literatur, die zur Kriterienanwendung und Ausweisung des Teilgebiets 044, Salzstock Seefeld, genutzt wurden, hinsichtlich Relevanz zusammengestellt und eine kursorische Literaturrecherche zu weiterer, nicht verwendeter Literatur durchgeführt. Abschließend erfolgt eine Zusammenfassung relevanter Fragestellungen zu dem genannten Teilgebiet, die von Seiten des Landkreises Wesermarsch zur Formulierung von Stellungnahmen und Eingaben bspw. an die BGE genutzt werden können. Zudem werden Hinweise gegeben, wie sich der Landkreis weiter in den Standortauswahlprozess einbringen kann.

2 Teilgebiete im Gebiet des Landkreises Wesermarsch

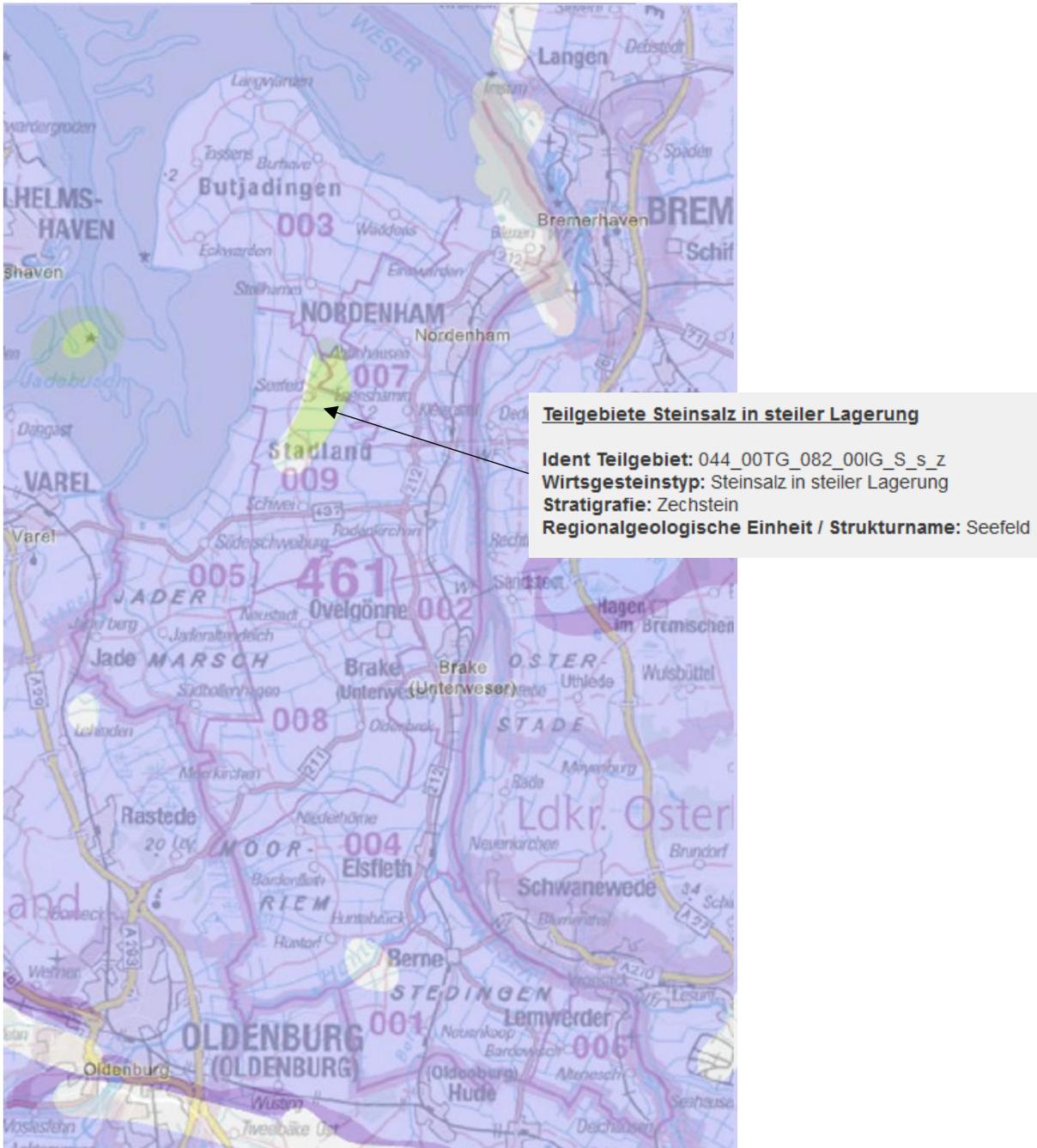
Im Gebiet des Landkreises Wesermarsch wurde der Salzstock Seefeld als Teilgebiet 044_00TG_082_00IG_S_s_z ausgewiesen. Es handelt sich um ein Teilgebiet mit Steinsalz in steiler Lagerung, ein sogenanntes Zechsteinsalinar, das vollständig innerhalb der Grenzen des Landkreises liegt (siehe Abbildung 2-1). Als Salinare werden Vorkommen von Salzgestein bezeichnet, die im Laufe der Erdgeschichte durch Evaporation, d. h. Eindunstung von Meerwasser,

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

entstanden. In Europa wurden die mächtigsten und am weitesten verbreiteten Salinare im Erdzeitalter des Zechstein (vor etwa 257 bis 252 Millionen Jahren) gebildet.

Neben dem Teilgebiet 044 wurde im Landkreis Wesermarsch ein Teilgebiet in Tonstein ausgewiesen (004_TG_053_00IG_T_f tpg). Es handelt sich um Tonsteine des Tertiär. Das Teilgebiet erstreckt sich über die Bundesländer Niedersachsen, Bremen, Hamburg, Schleswig-Holstein, Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg, Berlin und Sachsen-Anhalt.

Abbildung 2-1: Geographische Lage des Teilgebiets Seefeld innerhalb des Landkreises Wesermarsch



Legende: Tertiäres Tongestein

Steinsalz in steiler Lagerung

Quelle: Kartenausschnitt auf Basis der Karte zum Zwischenbericht Teilgebiete (BGE 2020j)

Darüber hinaus wurde ein weiteres Gebiet (Salzstock Jaderberg, 042_00IG_S_s_z) im Landkreis Wesermarsch identifiziert, jedoch nicht als Teilgebiet ausgewiesen. Identifizierte Gebiete genügen den Mindestanforderungen, wurden aber auf Basis der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien als nicht günstig bewertet.

3 Anwendung von Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen und geowissenschaftlichen Abwägungskriterien

Zur Ermittlung von Teilgebieten gem. § 13 StandAG wurden durch die Vorhabenträgerin BGE zunächst 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 zunächst Gesteinseinheiten identifiziert, die grundsätzlich als Wirtsgesteine für die Errichtung eines Endlagers in Frage kommen. 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, muss das betroffene Gebiet aus dem Verfahren ausscheiden.

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 **Ausschlusskriterien** durch die BGE und deren Ergebnisse ist der Bericht „Anwendung Ausschlusskriterien gemäß § 22 StandAG“ (BGE 2020e). 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 Umfeld des Salzstocks Seefeld ist nur mit Hilfe der interaktiven Kartendarstellung der BGE möglich. Die dort dargestellten ausgeschlossenen Gebiete sind zwar jeweils mit einer Kennung versehen; weitere Informationen zu den einzelnen ausgeschlossenen Gebieten, hier handelt es sich ausschließlich um aktive Störungszonen und Bohrungen, enthalten aber weder der Zwischenbericht selbst noch die untersetzenden Unterlagen.

Die Anwendung der **Mindestanforderungen** ist im Bericht „Anwendung Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG“ (BGE 2020f) 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 Mindestmächtigkeit 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“ bezeichnet.

Durch die Anwendung der **geowissenschaftlichen Abwägungskriterien** soll eine Bewertung dahingehend getroffen werden, „ob in einem Gebiet eine günstige geologische Gesamtsituation“ (StandAG 2017) vorliegt. Dazu werden 11 Kriterien, die jeweils mit einem oder mehreren Indikatoren untersetzt sind, herangezogen. Wie oben dargestellt, sind die geowissenschaftlichen Abwägungskriterien in § 24 StandAG sowie den Anlagen 1 bis 11 dargestellt. Der Vorgehensweise der BGE liegt die Unterlage „Arbeitshilfe zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien im Rahmen von § 13 StandAG“ (BGE 2020g) zugrunde.

Zur Anwendung wird von der BGE bei der Mehrzahl der Kriterien auf wirtsgesteinsspezifische Referenzdaten zurückgegriffen. Die Vorhabenträgerin hat zu diesem Zweck einen Referenzdatensatz

(BGE 2020k) veröffentlicht. Für die Indikatoren der Kriterien, die für die Bewertung herangezogen werden, werden darin jeweils Referenzwerte oder Argumente aus der Literatur genutzt. Nach Aussage der BGE werden möglichst günstige Bewertungen der Gesteinseigenschaften verwendet, um im Sinne eines konservativen Ansatzes in dieser Phase des Verfahrens möglichst wenige Gebiete auszuschließen. Die Referenzdaten für Steinsalz gelten dann beispielsweise für alle Salzstöcke Deutschlands gleichermaßen. Auf dieser Grundlage werden die geowissenschaftlichen Abwägungskriterien jeweils so angewendet, dass ein Ausschluss potentiell geeigneter Gebiete vermieden wird.

Einzelne geowissenschaftliche Abwägungskriterien wurden individuell anhand standortspezifischer Daten bewertet. Für Salzstöcke sind dies die Abwägungskriterien *Konfiguration der Gesteinskörper*, *räumliche Charakterisierbarkeit* und *Schutz des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durch das Deckgebirge*.

Eine Diskussion der Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen und geologischen Abwägungskriterien und ihrer Anwendung erfolgt in den nachfolgenden Kapiteln.

4 Ausschlusskriterien

In diesem Kapitel sind die sechs Ausschlusskriterien gemäß § 22 StandAG sowie der Umgang der BGE damit dargestellt. Die Ergebnisse, die sich daraus für den Landkreis Wesermarsch ergeben, werden für jedes Ausschlusskriterium erläutert und Schlussfolgerungen diskutiert (Kapitel 4.1).

Großräumige Vertikalbewegungen

Durch das Ausschlusskriterium *großräumige Vertikalbewegungen* sollen Gebiete ausgeschlossen werden, in denen innerhalb der nächsten eine Million Jahren 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. Im Ergebnis schließt sich die BGE der Studie an und geht davon aus, dass im Nachweiszeitraum Hebungsraten von 1000 m nicht erreicht werden.

Aktive Störungszonen

Als aktive Störungszone 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“. 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 wird 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 endlagerrelevanten Tiefen projiziert“ (BGE 2020e). Im Fall von Scheitelstörungen, „die im Deckgebirge von Salzstrukturen (z. B. Salzwälle und Salzdiapire) auftreten“ (BGE 2020e), 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 2020e) unter der Geländeoberkante (GOK)² liegt. Das entspricht der Mindesttiefe der Oberfläche des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (ewG)³ 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 2020e) führten und sich Störungszonen im Deckgebirge von Salzstöcken nicht innerhalb der Salinarstruktur fortsetzen.

Atektionische 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 2020e) 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 2020e).

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.

² Die Geländeoberkante (GOK) ist in den Geowissenschaften und in der Geotechnik die Bezeichnung für die natürliche oder anthropogene Erdoberfläche auf dem trockenen Land

³ 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“.

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 2020e) erreichen, wurden mit einem Sicherheitsradius von 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 2020e) 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 die Bereiche 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 Teufe und eines Grenzwinkels bestimmt.

Seismische Aktivität

Bei der Ausweisung ausgeschlossener Gebiete nach dem Kriterium *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 2020e). 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 quartärer⁴ Vulkanismus stattgefunden hat oder innerhalb der nächsten Million Jahre Vulkanismus erwartet wird. Im Bericht zur Anwendung der Ausschlusskriterien (BGE 2020e) 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 2020e). Um die Eruptionszentren wurde ein Sicherheitsabstand von 10 km gelegt.

⁴ Das Quartär ist die jüngste Epoche der Erdgeschichte. Sie begann vor 2,6 Millionen Jahren und dauert bis in die Gegenwart an.

Grundwasseralter

Durch das Ausschlusskriterium *Grundwasseralter* soll sichergestellt werden, dass keine Grundwässer existieren, die „am aktuellen hydrologischen Kreislauf teilnehmen“ (Fraktionen CDU/CSU, SPD und BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN 2017) und damit einen Schadstofftransport aus dem Endlager in den Lebensraum von Menschen ermöglichen. Diese Formulierung ist wenig konkret. In der Begründung wird darauf hingewiesen, dass „die Konzentration der Isotope Tritium [^3H] und Kohlenstoff-14 [^{14}C] im Grundwasser des vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereiches oder Einlagerungsbereiches“ (Appel et al. 2002) als Bewertungsgrundlage herangezogen werden kann.

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 großräumigerer Ausschluss von Gebieten auf Basis des Ausschlusskriteriums „Grundwasseralter““ seitens der BGE als „nicht zielführend“ beschrieben (BGE 2020e). Stattdessen „erfolgt eine punktuelle Ermittlung ausgeschlossener Gebiete“ (BGE 2020e).

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“ (BGE 2020e) erfolgt.

4.1 Anwendung der Ausschlusskriterien für das Teilgebiet Seefeld (044), Schlussfolgerungen und Bewertung

Im Folgenden wird die Anwendung der Ausschlusskriterien durch die BGE im Bereich des Salzstocks Seefeld bzw. innerhalb des Landkreises Wesermarsch 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 Wesermarsch 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 4) und sollte präzisiert werden.

Aktive Störungszonen im Bereich des betrachteten Salzstocks

Durch die Anwendung des Ausschlusskriteriums *aktive Störungszonen* wurde im Bereich des Salzstocks Seefeld (044) eine aktive Störungszone ausgewiesen, siehe Abbildung 4-1. Dunkelblau dargestellt ist das ausgeschlossene Gebiet; in grün ist die Ausdehnung des Salzstocks zu sehen, tertiäre Tongesteine sind veilchenblau gekennzeichnet. Die Teilgebiete sowie die Störungszonen sind farblich so dargestellt, dass sich die Farben überlagern. Im Norden und Osten wird der Salzstock Seefeld (Teilgebiet 044) beispielsweise von Tongesteinen des Tertiär (Teilgebiet 004) überlagert.

Abbildung 4-1: Aktive Störungszone im Bereich des Salzstocks Seefeld (044)



Legende:
 Tertiäres Tongestein
 Steinsalz in steiler Lagerung
 Aktive Störungszone

Quelle: <https://www.bge.de/de/endlagersuche/zwischenbericht-teilgebiete/>; Bildschirmfoto des Kartenausschnitts. Legende ergänzt.

Das ausgeschlossene Gebiet trägt die Ident-Nr. 0002474AG(2.1). Die in der interaktiven Karte (BGE 2020j) verwendeten Ident.-Nummern ausgeschlossener Gebiete stimmen nicht mit den Nummerierungen in der Anlage 1 zum Datenbericht zu den Ausschlusskriterien (BGE 2020n) überein, die „alle entscheidungserheblichen Daten für die Anwendung des Ausschlusskriteriums „aktive Störungszonen““ darstellt, „die mit Stand 07.09.2020 gemäß den Regelungen und Verfahren nach dem

Geologiedatengesetz veröffentlicht werden können“ (BGE 2020n). Aufgrund der unterschiedlichen Nummerierung ist die Zuordnung der Datensätze der Anlage zu den in der interaktiven Karte dargestellten Störungszonen zum jetzigen Zeitpunkt nur der BGE möglich.

Dass das ausgeschlossene Gebiet das Teilgebiet überlagert, lässt nur den Schluss zu, dass es sich um Scheitelstörungen des Salzdiapirs⁵ handelt (siehe hierzu Kapitel 4). Damit wird das im Hangenden⁶ des Salzstocks Seefeld (044) anstehende Tongesteinsvorkommen des Tertiär ausgeschlossen.

Grundsätzlich wird im Zwischenbericht (BGE 2020m) hinsichtlich Scheitelstörungen an Salzstöcken davon ausgegangen, dass „sich Scheitelstörungen auf das Deckgebirge von Salzstrukturen beschränken“ und „die Barrierewirksamkeit einer Salzstruktur damit erhalten“ bleibe (BGE 2020m). 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.

Jaritz (1983) weist darauf hin, dass das Deckgebirge des Salzstocks Seefeld von Störungen durchzogen ist. Aus dem Schichtenverzeichnis der Bohrung Seefeld 1 wird ersichtlich, dass im Bereich von 825 bis 880 m u. GOK Gesteine des Cenoman (etwa 100 bis 94 Millionen Jahre) in Schichten des Turon (etwa 94 bis 89 Millionen Jahre) eingebettet sind. Es liegen also ältere Gesteine in der nächstjüngeren stratigraphischen Einheit eingebettet. Diese Beobachtung muss als Hinweis auf eine deutliche Störung im Bereich der Bohrung gedeutet werden; eine mögliche Erklärung könnte eine Auf- oder Überschiebung oberhalb der jetzigen Teufe von 876 m u. GOK liefern. Diese Störung kann nicht aufgrund der im Schichtenverzeichnis erkennbar versetzten Gesteine bzw. deren Alter als aktiv eingestuft werden; das Deckgebirge und dessen Eigenschaften sollten aber im weiteren Verfahren detailliert untersucht werden, sollte das Teilgebiet Seefeld (044) als Standortregion ausgewiesen werden.

Im Rahmen der Befassung mit atektonischen Vorgängen sind die möglichen Konsequenzen eines Wasserzutritts zu Anhydritvorkommen⁷ im Untergrund als Ursache für Störungen nicht berücksichtigt worden. Ein solches Ereignis hat in der Regel Konsequenzen für das lokale Störungs-Regime; die Volumenvergrößerung durch die Umwandlung von Anhydrit zu Gips sollte als mögliche atektonische Ursache für die Bildung von aktiven Störungszonen bei der zukünftigen Anwendung des Ausschlusskriteriums berücksichtigt werden (siehe auch Chaudry und Neles (2020)).

⁵ Die Begriffe Salzdiapir und Salzstock werden im Rahmen dieses Berichts synonym verwendet

⁶ Als Hangendes werden die eine Gesteinseinheit überlagernden Gesteine bezeichnet, als Liegendes die unterlagernden Einheiten

⁷ Anhydrit ist ein gesteinsbildendes Mineral aus Calciumsulfat (CaSO_4) und entsteht u. a. als Verdunstungsprodukt von Meerwasser oder bei der Entwässerung von Gipsgestein durch den Druck aufliegender Sedimente. Der Name Anhydrit wird aus dem Griechischen mit Stein ohne Wasser übersetzt - bezugnehmend darauf, dass das Mineral kein Wasser enthält und sich damit vom chemisch verwandten und wasserhaltigen Gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$) unterscheidet. Anhydrit kann durch Kontakt mit Wasser zu Gips umgewandelt werden - einhergehend mit einer Volumenzunahme um bis zu 60 %.

Für den Zwischenbericht Teilgebiete als ersten Schritt in Phase 1 des Standortauswahlverfahrens kann das Vorgehen der BGE zum Ausschluss aktiver Störungszonen als nachvollziehbar angesehen werden und trägt dem von der BGE formulierten Verfahrensgrundsatz Rechnung, „ausgeschlossene Gebiete im Zweifel flächenhaft eher zu unter- als zu überschätzen“ (BGE 2020e).

Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit

Durch die Anwendung des Ausschlusskriteriums *Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit* wurden im Bereich des Salzstocks Seefeld (044) drei kleinräumige Bereiche aufgrund von Bohrungen ausgeschlossen. Auch diese Ausschlussgebiete lassen sich lediglich anhand der interaktiven Karte identifizieren. In Tabelle 4-1 sind die Ident-Nummern der Bohrungen aufgeführt; Abbildung 4-2 zeigt die Lage der Bohrungen.

Abbildung 4-2: Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit im Bereich des Salzstocks Seefeld (044)



Quelle: (BGE 2020j)

Weitere Informationen über die Bohrungen wie beispielsweise Durchmesser oder erreichte Endteufe sind nicht bzw. nicht der Ident-Nummer zuordbar veröffentlicht, analog zum Vorgehen bei der Anwendung des Ausschlusskriteriums *Aktive Störungszonen* (siehe dazu auch Kapitel 4.1). Gemäß der Anwendungsmethodik (BGE 2020e) wurde eine Fläche mit einem Radius von 25 m um den Bohransatzpunkt als ausgeschlossenes Gebiet markiert.

Am 10. Juni 2021 wurde seitens der BGE der Funktionsumfang der interaktiven Kartendarstellung erneut erweitert. Die „für die Anwendung der Mindestanforderungen in § 13 StandAG entscheidungserheblichen Schichtenverzeichnisse“⁸ wurden bereitgestellt. Keine der oben aufgeführten Bohrungen wurde als für die Anwendung der Mindestanforderungen entscheidungserheblich gekennzeichnet. Entsprechend wurden durch die BGE keine weiteren Informationen zur Verfügung gestellt. Alle Bohrungen konnten jedoch mit Hilfe der Bohrpunktkarte der BGR⁹ zugeordnet werden. Die Bezeichnungen der Bohrungen sind ebenfalls in Tabelle 4-1 zusammengestellt.

Es wurden in der Umgebung des Teilgebiets 044 keine Ausschlussgebiete aufgrund bestehender oder historischer Bergwerke ausgewiesen. Auf dem Gebiet des Landkreises Wesermarsch wurden drei Gebiete aufgrund von Bergwerken ausgeschlossen: ein Gebiet bei Blexen, nordöstlich von Nordenham, sowie zwei Gebiete zwischen Huntorf und Neuenhuntorf, südwestlich von Elsfleth.

Tabelle 4-1: Ausgeschlossene Bohrungen gemäß Ausschlusskriterium 3 und zugehörige Informationen aus den Schichtenverzeichnissen

Teilgebiet Nr.	ID interaktive Karte	Bezeichnung
44	0033719AG(3.2)	Seefeld 1
	0033721AG(3.2)	Seefeld 3
	0033722AG(3.2)	Seefeld 101

Quelle: Eigene Darstellung. Die Bohrungen wurden durch Vergleich der Bohrpunktkarte der BGR mit der interaktiven Kartendarstellung der BGE identifiziert.

Das Vorgehen der BGE zur Berücksichtigung von Einflüssen aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit erscheint aufgrund der in Kapitel 4.1 dargestellten Datengrundlage angemessen zur Ausweisung von Teilgebieten. In zukünftigen Verfahrensschritten wird es notwendig sein, in den ausgewählten Standortregionen die weiteren Daten zur Raumlage bestehender Bohrungen und der Schädigungsbereiche in der Umgebung der Bohrpfade zu erheben und auszuwerten. Im Sinne eines transparenten Verfahrens gemäß § 1 StandAG sollte eine eindeutige und nachvollziehbar dokumentierte Zuordnung ausgeschlossener Gebiete zu den jeweils zugrundeliegenden Daten vorgenommen werden.

Seismische Aktivität

Auf Grund des Kriteriums *Seismische Aktivität* wurde im Bereich des Landkreises Wesermarsch und entsprechend auch im Gebiet des betrachteten Teilgebiets kein Ausschluss vorgenommen. Seismisch aktive Gebiete befinden sich im Wesentlichen im Westen und Südwesten des Bundesgebiets.

⁸ siehe <https://www.bge.de/de/endlagersuche/zwischenbericht-teilgebiete/>

⁹ <https://boreholemap.bgr.de/mapapps/resources/apps/boreholemap/index.html?lang=de>

Das rein graphische Vorgehen durch die digitale Übertragung einer kleinmaßstäblichen Kartendarstellung führt zwangsläufig zu einer sehr ungenauen Begrenzung der Erdbebenzonen bei der Kriterien-Anwendung. Begründet wird das seitens der BGE mit der Qualität der erhaltenen Daten.

Da auch dieses Kriterium dem Grundsatz folgt, „ausgeschlossene Gebiete im Zweifel flächenhaft eher zu unter- als zu überschätzen“ (BGE 2020e), kann die Anwendung des Ausschlusskriteriums *seismische Aktivität* in diesem ersten Verfahrensschritt trotzdem angesichts der dargestellten Datenlage als plausibel angesehen werden. Im weiteren Verfahren wird das Vorgehen an die Datengrundlage des im Juli 2021 veröffentlichten neuen nationalen Anhangs zur DIN EN 1998-1 angepasst werden müssen. Darüber hinaus sollte im weiteren Verfahren geprüft werden, ob auch durch menschliches Handeln verursachte seismische Aktivität, bspw. durch Druckentlastung des Gebirges in der Folge von Erdgasförderung, im Rahmen des Ausschlusskriteriums berücksichtigt werden muss.

Vulkanische Aktivität

Das Ausschlusskriterium *Vulkanische Aktivität* führte im Bereich des betrachteten Teilgebiets 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 Wesermarsch nicht mit einem Ausschluss zu rechnen.

Grundwasseralter

Im Bereich des Salzstocks Seefeld (044) wurden keine Gebiete durch das Kriterium *Grundwasseralter* ausgeschlossen. Da nur in Bohrungen und Bergwerken Grundwasseralter bestimmt wurden, wurden mit diesem Kriterium im Landkreis Wesermarsch wie im gesamten Bundesgebiet keine zusätzlichen Flächen ausgeschlossen.

Für den ersten Schritt der Phase 1 des Standortauswahlverfahrens kann das gewählte Vorgehen der BGE als plausibel angesehen werden. Für die weiteren Verfahrensschritte muss aber unter Umständen eine Methode entwickelt werden, die über die Anwendung von ^3H - und ^{14}C -Isotopenaltern

hinausgeht und eine „umfassende Gesamtinterpretation der hydrochemischen und isotopenhydrologischen Grundwasserverhältnisse an einem Standort (in einer Region)“ (Appel et al. 2002) ermöglicht, ohne die das Ausschlusskriterium *Grundwasseralter* im Standortauswahlverfahren keine Wirkung entfalten kann.

5 Wirtsgesteine und Mindestanforderungen an Steinsalz in steiler Lagerung

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. 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 ausgeschieden 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 auch das hier betrachtete Teilgebiet aufbaut, werden demnach Salzstrukturen bezeichnet, „bei denen die Deckgebirgsschichten infolge eines zunehmenden Salzaufstiegs durchbrochen wurden“ (BGE 2020f).

Salinargesteine bestehen neben Steinsalz aus einer Abfolge weiterer gesteinsbildender Minerale, die im Verlauf der Verdunstung von Meerwasser ausgefällt¹⁰ werden und kristallisieren, angefangen von Karbonaten über Sulfate und das eigentliche Steinsalz — das Mineral Halit (NaCl) — und verschiedene Kalisalze bis hin zu Bischofit ($\text{MgCl}_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$). Diese Abfolge gesteinsbildender Minerale, die während der Entstehung von Salinargesteinen aus Meerwasser in Form einander überlagernder Gesteinsschichten abgebildet wird, wird durch den Aufstieg eines Salinars und die damit einhergehende bruchhafte und plastische Deformation verändert.

Da der komplexe innere Aufbau eines Salzstocks „ohne detaillierte Kenntnisse der jeweiligen Salzstruktur nicht beschrieben werden“ (BGE 2020f) kann, wird von der BGE zunächst die gesamte Salzstruktur als Wirtsgestein betrachtet. Wichtig ist dabei, „dass Halit der gesteinsbildende Hauptbestandteil“ (BGE 2020f) 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 Folgenden wird die Anwendung der einzelnen Mindestanforderungen für Steinsalz in steiler Lagerung, wie im Fachbericht zur Anwendung der Mindestanforderungen (BGE 2020f) ausgeführt, dargestellt. In Kapitel 5.1 erfolgt eine Darstellung der Ergebnisse für das Teilgebiet Seefeld (044) und eine Bewertung der Anwendung.

¹⁰ Als „ausfällen“ bezeichnet man den chemischen Vorgang, bei dem gelöste Stoffe durch Änderungen von Parametern, wie z.B. Druck oder Temperatur in Form von Kristallen, Flocken oder Tröpfchen ausgeschieden werden

Gebirgsdurchlässigkeit

Für Steinsalz wird grundsätzlich angenommen, dass aufgrund dessen bekannter Eigenschaften die Gebirgsdurchlässigkeit ausreichend gering ist (BGE 2020f), 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 mächtig¹¹ sein. Im Fachbericht der BGE zur Anwendung der Mindestanforderungen (BGE 2020f) wird dargestellt, dass „für alle steil stehenden Salzstrukturen, die eine Mächtigkeit von mindestens 100 m aufweisen, [...] diese Mindestanforderung im jetzigen Verfahrensschritt als erfüllt“ gilt.

Minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs

Die generelle Anforderung, dass die Oberfläche des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs 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 einschlusswirksamen Gebirgsbereichs 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.

Fläche des Endlagers

Für das Wirtsgestein Steinsalz in steiler Lagerung wird, wie in der Begründung zum Gesetzentwurf des StandAG (Fraktionen CDU/CSU, SPD und BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN 2017) 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.

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

¹¹ 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.

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 2020f). Eine konkrete Abfrage nach Daten und Informationen, die gegen den Erhalt der Barrierewirkung von Gesteinseinheiten über den geforderten Zeitraum sprechen, erfolgt der Arbeitshilfe (BGE 2018) zufolge nicht.

5.1 Anwendung der Mindestanforderungen für das Teilgebiet Seefeld (044), Schlussfolgerungen und Bewertung

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 Wesermarsch erfüllt der Salzstock Seefeld alle Mindestanforderungen und wird als Identifiziertes Gebiet ausgewiesen. Gleiches gilt für den Salzstock Jaderberg, der aber im weiteren Verfahren durch die Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien ausgeschlossen wurde.

Die Ermittlung des Salzstocks Seefeld (044) als Identifiziertes Gebiet im Rahmen der Anwendung der Mindestanforderungen fußt im Wesentlichen auf generischen Annahmen. Dies gilt insbesondere für die Mindestanforderungen *Gebirgsdurchlässigkeit* und *Erhalt der Barrierewirkung*.

Im Detail wird das Identifizierte Gebiet in Form eines Steckbriefs in der Anlage IG-Steckbriefe (BGE 2020a) dargestellt. Dieser besteht aus einem Lageplan des Teilgebiets und einer tabellarischen Zusammenstellung von Charakteristika. Ergänzt wird die Darstellung durch einen schematischen Profilschnitt zum Aufbau von Salzstöcken 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 5-1 zusammengestellt.

Der Textabschnitt enthält keine standort- oder gebietsspezifischen Informationen, sondern lediglich allgemeine Informationen zur Geologie von Norddeutschland und der Entstehung von Salinargesteinen. „Die Grundlage der Bearbeitung in Arbeitsschritt 1 bilden die in den geologischen 3D-Modellen der Länder ausgewiesenen Salzdiapire“ (BGE 2020f), welche nur im Falle des Fehlens von Daten durch Informationen aus dem InSpEE-Bericht (BGR 2016) ergänzt wurden. Vorhandene 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 keine Rolle.

Tabelle 5-1: Charakteristika des betrachteten Salzstocks zur Anwendung der Mindestanforderungen

Seefeld (044)	
Wirtsgesteinstyp	Steinsalz in steiler Lagerung
Stratigraphie	Zechstein
Bundesländer	Niedersachsen
Gebirgsdurchlässigkeit	10 ⁻¹² m/s
Mächtigkeit	450 m
Teufenlage der Struktur	1060-1500 m u. GOK
Gesamtfläche	13 km ²
Barriereintegrität	erfüllt

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an BGE (2020a)

Gemäß BGE (2020f) wurde für die Anwendung der Mindestanforderungen die minimale Teufenlage des potentiellen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs angegeben, bei der „die geforderte 300 m mächtige Salzscheibe oberhalb eines potentiellen ewG“ berücksichtigt wurde. Ausgehend von den geologischen 3D-Modellen der Länder entnommenen Lage des Strukturtops wurde also die minimale Teufenlage jeweils 300 m tiefer angenommen.

Aus der Zusammenstellung geht die rein generische Anwendung der Mindestanforderungen *Gebirgsdurchlässigkeit* und *Erhalt der Barrierewirkung* hervor. Es ist jeweils nur der Referenzwert genannt; spezifische Informationen aus dem Gebiet des Landkreises Wesermarsch sind nicht in die Bewertung eingeflossen.

Das pauschale Vorgehen bei der Anwendung der Mindestanforderung *Gebirgsdurchlässigkeit* erscheint für Gebiete mit dem potentiellen Wirtsgestein Steinsalz plausibel im ersten Schritt der Phase 1 des Standortauswahlverfahrens. Im weiteren Verfahren werden gezielt Daten zur Ermittlung der Gebirgsdurchlässigkeit in Standortregionen bzw. an Standorten 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 lithologische 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 dargelegt werden, welche Informationsquellen zur Bewertung dieser Mindestanforderung herangezogen wurden.

Wie oben dargestellt, erfolgte die Anwendung der Mindestanforderungen *Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs*, *Minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs* und *Fläche des Endlagers* auf Grundlage von 3D-Modellen der geologischen Landesämter. Die in Tabelle 5-2 dargestellten Daten des Teilgebiets Seefeld (044) sind dem Informationssystem über

Salzstrukturen (BGR 2016) entnommen, welches im Projekt InSpEE als Planungsgrundlage, für Auswahlkriterien und zur Potenzialabschätzung für die Errichtung von Salzkavernen zur Speicherung von erneuerbaren Energien (Wasserstoff und Druckluft) erstellt wurde.

Tabelle 5-2: Strukturinformationen zu Teilgebiet Seefeld (044)

	Seefeld (044)
Strukturtop [m u. NN]	800
Strukturtop [m u. GOK]	800
Strukturaufbauendes Salinar	Zechstein
Sekundärmächtigkeit [m]	4400
Maximalausdehnung [km]	10 x 5,5
Internbau Typ Einordnung	Salzdiapir

Quelle: Klicken oder tippen Sie hier, um Text einzugeben.

Die Mindestanforderung *Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs* kann für den Salzstock Seefeld in Schritt 1 von Phase 1 als erfüllt betrachtet werden, da die Mächtigkeit der Salinargesteine in den Bohrungen Seefeld 1 und Seefeld 101 jeweils deutlich über 250 m liegt und damit keine Unsicherheiten in Bezug auf die Kriterienanwendung bestehen.

Zu berücksichtigen ist jedoch, dass die Mächtigkeit einer Salzstruktur im Regelfall nicht der des möglichen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs entspricht. An einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich sind weitere Anforderungen zu stellen, deren Erfüllung im Detail überprüft werden muss. Auf Grundlage der bisherigen Kriterienanwendung und der dokumentierten und verwendeten Datengrundlage kann zum jetzigen Zeitpunkt noch keine Aussage darüber getroffen werden, ob im Salzstock Seefeld ein einschlusswirksamer Gebirgsbereich ausgewiesen werden kann. Dies ist im weiteren Verfahren durch gezielte Erkundung zu verifizieren, sollte das Teilgebiet 044 im nächsten Verfahrensschritt als Standortregion oder Teil einer Standortregion ausgewiesen werden.

Die Angaben zum Strukturtop von Salzstrukturen, die seitens der BGE für die Identifizierten Gebiete zur Anwendung der Mindestanforderungen und geowissenschaftlichen Abwägungskriterien genutzt wurden, berücksichtigen bereits eine Salzscheibe am Top der Struktur von 300 m. Dennoch weichen sie zum Teil von Angaben im Informationssystem für Salzstrukturen (BGR 2016) ab.

Diese Information wird zur Bewertung der *minimalen Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs* herangezogen. Die Teufenlage der Struktur Seefeld ist im Steckbrief des Identifizierten Gebiets (BGE 2020p) mit 1060-1500 m u. GOK angegeben (siehe Tabelle 5-1). Der Strukturtop wäre inklusive Salzscheibe bei 760 m u. GOK zu erwarten. Es besteht demnach ein Unterschied zur Tiefenangabe im Informationssystem für Salzstrukturen (siehe Tabelle 5-2). Nach (Jaritz 1983) liegt der höchste Punkt der Salzstockoberfläche bei ca. 850 m u. NN, nach Frisch und Kockel (2004) bei 851 m u. NN. Der maximale Unterschied zwischen Literaturangaben und Teufenlage laut Zwischenbericht beträgt demnach 91 m. Für die Bewertung der Mindestanforderung ergibt sich daraus jedoch keine Änderung. Insofern kann die Methodik zur Anwendung der Mindestanforderung *Minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs* für den Salzstock Seefeld im ersten Verfahrensschritt als plausibel angesehen werden.

Dennoch sollten die exakten Informationen, auf denen die Angaben zur Tiefenlage und Mächtigkeit der Salzstöcke im Zwischenbericht beruhen, baldmöglichst offengelegt werden, um Nachvollziehbarkeit und Transparenz zu ermöglichen. Dabei sollte neben den mittlerweile veröffentlichten 3D-Modellen auch dargestellt werden, welche Eingangsdaten zur Darstellung von Salzstöcken im Modell verwendet wurden und inwieweit diese Daten aktuell sind und durch die BGE vor der Anwendung der Modelle überprüft wurden. Bei Abweichungen der Angaben zur *minimalen Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs* des von der BGE verwendeten Modells im Vergleich zu aus anderen Quellen vorliegenden Angaben sollte geprüft werden, inwieweit das Modell auf die realen Daten angepasst werden muss und sich so neue Angaben für die Tiefenlage des Strukturtops ergeben.

Das Vorgehen bei der Anwendung der Mindestanforderung *Fläche des Endlagers* vernachlässigt, wie generell die derzeitige Anwendung der Mindestanforderungen, den komplexen Internbau von Salinaren. Für die Ausweisung des Teilgebiets Seefeld kann es aber für Schritt 1 in Phase 1 des Standortauswahlverfahrens als ausreichend angesehen werden.

6 Geowissenschaftliche Abwägungskriterien

Die Identifizierten Gebiete, d.h. alle Teile des Bundesgebiets, 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 sowohl der Indikatoren als auch des jeweiligen Kriteriums erfolgt in günstig, bedingt günstig und weniger günstig/ungünstig (Bezeichnung im StandAG) bzw. nicht günstig (Bezeichnung gemäß Umsetzung der BGE).

Für die Bewertung der Abwägungskriterien werden demnach detaillierte, standortspezifische Informationen benötigt, die zum jetzigen Zeitpunkt in der Regel für die untersuchten Identifizierten Gebiete nicht oder nur unvollständig vorliegen. Zum jetzigen Stand des Verfahrens führt die Anwendung der Abwägungskriterien auf einzelne Identifizierte Gebiete deshalb noch nicht zu gebietsspezifischen Bewertungen. Um die Bewertung dennoch vornehmen zu können, greift die BGE auf Referenzdatensätze zurück. Dabei werden die bewertungsrelevanten Eigenschaften der betrachteten Gesteinstypen anhand verfügbarer Informationen beschrieben und die Bandbreite an Werten, die die jeweiligen Indikatoren annehmen können, mit Hilfe von Literaturdaten festgelegt.

Die Bewertung von Kriterien mittels Referenzdaten erfolgte also für alle Teilgebiete eines Wirtsgesteinstyps jeweils identisch. Für Steinsalz finden sich die Referenzdaten in Kapitel 6 der Unterlage *Referenzdatensätze zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien im Rahmen von § 13 StandAG* (BGE 2020k).

Die BGE hält fest, dass „bei wenig, keinen oder nicht eindeutigen Daten [...] stets von einer tendenziell günstigen Annahme ausgegangen“ wird (BGE 2020k). Auf diese Weise soll vermieden werden, im ersten Verfahrensschritt auf Grund 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.

Für acht von elf Kriterien sind bei Gebieten im Steinsalz mit steiler Lagerung Referenzdatensätze verwendet worden. Lediglich die Kriterien 2, 3 und 11 wurden gebietsspezifisch bewertet (BGE

2020l). Die Anwendung dieser gebietsspezifisch bewerteten Kriterien durch die BGE auf das Teilgebiet 044 bzw. den Salzstock Seefeld wird in Kapitel 6.1 erläutert. Die fachliche Bewertung dieser Anwendung wird in Kapitel 6.2 dargestellt.

Im Folgenden werden die elf geowissenschaftlichen Abwägungskriterien und deren Anwendung durch die BGE näher erläutert.

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

Aus dem Endlager bzw. dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich 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.

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

Der Indikator *Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit des Gesteinstyps* wurde anhand von Literaturdaten, bspw. aus Untersuchungen im Bergwerk Morsleben, der SchachanlageASSE und der Waste Isolation Pilot Plant in New Mexico (USA) für Steinsalz bewertet. Er wurde ebenfalls als günstig eingestuft.

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 2020k) ausgegangen und der Indikator für Steinsalz mit günstig bewertet. In der Gesamtbewertung ist dieses Kriterium entsprechend günstig.

Kriterium 2 zur Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper

Das Kriterium zur *Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper* wird anhand gebietsspezifischer Daten für den Salzstock 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 (siehe Kapitel 5.1). Der Indikator 5 – *Vorhandensein von Gesteinschichten 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.

Durch die Erfüllung des Indikators *Barrierenmächtigkeit* soll gezeigt werden, dass die Gesteine des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs 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 einschlusswirksamen Gebirgsbereichs noch nicht bekannt ist, bewertet die BGE eine Mächtigkeit des Wirtsgesteins von 300 m generell als günstig (BGE 2020l).

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. Bei Salinaren wird zum jetzigen Zeitpunkt vorausgesetzt, dass „das Wirtsgestein sicherheitsrelevanter Bestandteil des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches ist“ und deswegen wird „davon ausgegangen, dass der Einlagerungsbereich in jedem Fall von einem einschlusswirksamen Gebirgsbereich umschlossen wird“ und der Indikator als günstig bewertet (BGE 2020p).

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 2020l) 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.

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 einschlusswirksamen Gebirgsbereich 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.

Für Zechsteinsalinare wurden die Indikatoren *Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich*, *Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich* und *ihrer Eigenschaften* und *Gesteinsausbildung* als günstig bewertet.

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 Überprägung¹² der beteiligten Gesteine führt (BGE 2020l).

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 anhand von Referenzdaten 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. Im Referenzdatensatz wird ausgeführt, dass aus vorhandener Literatur „nur indirekt Aussagen zu Änderungen der Indikatoren Mächtigkeit, Ausdehnung und Gebirgsdurchlässigkeit über die Zeit ableitbar“ (BGE 2020k) seien. 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 2020k) 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 als günstig bewertet (BGE 2020k).

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 Permeabilität¹³ in der Umgebung des Grubengebäudes führt. Es soll nach Anlage 5 zu § 24 Abs. 4 StandAG mit Hilfe zweier Indikatoren bewertet werden:

¹² 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.

¹³ Als Permeabilität bezeichnet man die Durchlässigkeit der Struktur für andere Stoffe wie z.B. Gase oder Flüssigkeiten.

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 Endlager Hohlräume 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 2020b) 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 benötigt, 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 bietet. Zum Beleg werden weitere Literaturquellen sowie praktische Erfahrungen angeführt.

Kriterium 6 zur Bewertung der Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten

Mit der Bewertung der *Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten* soll sichergestellt werden, dass durch die Errichtung eines Endlagerbergwerks induzierte Schädigungen des Gebirges nicht zu einem erhöhten Stofftransport aus dem Endlager kommt. 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 2020k). Für Steinsalz in steiler Lagerung wird der Indikator mit 1 angegeben und damit mit günstig bewertet, da „die Gebirgs- und Gesteinsdurchlässigkeit gleich ist“ (BGE 2020k).

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 technogener¹⁴ Beanspruchung der Fall ist“ (BGE 2020k). Nach Anlage 6 zu § 24 Abs. 4 StandAG wird der Indikator mit Hilfe von sieben Erfahrungsbereichen bewertet, von denen die BGE drei als erfüllt ansieht. Da Salzformationen laut (BGE

¹⁴ 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.

2020k) damit „mehrere dieser Erfahrungsbereiche“ erfüllen, werden sie folglich für diesen Indikator standortunabhängig in die Wertungsgruppe günstig eingeordnet.

Der Indikator *Rückbildung der Sekundärpermeabilität durch Risschließung* wird anhand von Materialeigenschaften des Wirtsgesteins bewertet. Ausgehend von der Feststellung, dass „für eine genaue Bewertung der Fragestellung Angaben erforderlich sind, die erst im späteren Rahmen der Endlagerplanung vorliegen können“ (BGE 2020k), 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 die viskosen Eigenschaften von Salzgesteinen 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.

Auch zur Beurteilung des Indikators *Rückbildung der mechanischen Eigenschaften durch Rissverheilung* liegen in der ersten Phase des Standortauswahlverfahrens keine Werte vor, „so dass vorerst eine auf dem Wirtsgestein basierende Bewertung stattfinden muss“ (BGE 2020k). Unter erneutem Verweis auf (Lux und Eberth 2002a) wird der Indikator als günstig bewertet.

Alle Indikatoren und das Kriterium wurden als günstig bewertet.

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 2020g) erläutert die BGE, dass bei der Bewertung der Gasbildung neben dem Wasserdargebot 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 2020k) 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.

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.

Die Indikatoren *Neigung zur Bildung wärmeinduzierter Sekundärpermeabilitäten* und *Temperaturstabilität hinsichtlich Mineralumwandlungen* 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 2020k). Auch der Indikator *Temperaturstabilität hinsichtlich Mineralumwandlungen* wird als günstig bewertet. Temperaturbedingte Mineralumwandlungen in Salinargesteinen finden nach dem Referenzdatensatz (BGE 2020k) 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.

Kriterium 9 zur Bewertung des Rückhaltevermögens im einschlusswirksamen Gebirgsbereich

Schadstoffe, die im Endlager nach der Einlagerung freigesetzt werden, sollen möglichst im einschlusswirksamen Gebirgsbereich 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 2020k). 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 2020k), 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 2020k). 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.

Als nicht günstig wird 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 einschlusswirksamen Gebirgsbereich

in „möglichst reinem, homogenem Steinsalz“ sind auf Grund 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 2020k).

Der Indikator *Ionenstärke des Grundwassers* wird als günstig bewertet. Im Referenzdatensatz (BGE 2020k) wird dargestellt, dass Grundwässer in der Umgebung von Salzstöcken durch Ablaugungsprozesse in der Regel hohe Ionenstärken aufweisen.

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 2020k) als günstig bewertet.

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 2020k), erfolgt die Gesamtbewertung für dieses Kriterium mit nicht günstig.

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 einschlusswirksamen Gebirgsbereich durch die Errichtung des Endlagers und das dabei in das Gebirge eingebrachte Material nicht zu Ungunsten der Langzeitsicherheit verändern. Das Kriterium wird 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 Literaturangaben bewertet.

Der Indikator *Chemisches Gleichgewicht zwischen dem Wirtsgestein im Bereich des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und dem darin enthaltenen tiefen Grundwasser* wird als günstig bewertet: Nach dem Referenzdatensatz (BGE 2020k) 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.

Neutrale bis leicht alkalische Bedingungen (pH-Wert 7 bis 8) im Bereich des Tiefenwassers, der zweite Indikator, wird als nicht günstig bewertet. Unter Verweis auf Literaturquellen und darin enthaltene Messwerte wird für Steinsalz von neutralen bis leicht sauren Bedingungen ausgegangen (BGE 2020k).

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 2020k).

Auch der Indikator *Möglichst geringer Gehalt an Kolloiden und Komplexbildnern im Tiefenwasser* wird als günstig gekennzeichnet. Nach dem Referenzdatensatz (BGE 2020k) 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.

Der letzte Indikator, *Geringe Karbonatkonzentration im Tiefenwasser*, wird als günstig bewertet, weil die CO₂-Konzentration „im Promillebereich“ (BGE 2020k) liege. „Zuverlässige Aussagen zu eventuell erhöhten CO₂-Vorkommen“ seien jedoch nur aufgrund standortspezifischer Daten möglich.

Die Gesamtbewertung des Kriteriums erfolgt mit nicht 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 2020l).

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 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. Dabei wird der Abstand zur Quartärbasis als Maß zur Bewertung herangezogen.

6.1 Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien für das Teilgebiet Seefeld (044)

Wie oben erläutert wurden die geowissenschaftlichen Abwägungskriterien 1, 4, 5, 6, 7, 8, 9 und 10 für alle identifizierten Gebiete in Zechsteinsalinen auf Grundlage eines Referenzdatensatzes bewertet. Der Referenzdatensatz für Gebiete in Steinsalz in steiler Lagerung ist im Wesentlichen auf allgemeinen Informationen zu Salinargesteinen aufgebaut. Entsprechend ist die Bewertung nicht spezifisch auf Daten zu den verschiedenen Steinsalzvorkommen in Niedersachsen, dem Landkreis Wesermarsch oder dem Salzstock Seefeld im Speziellen abgestützt.

Die Beurteilung von acht der elf geowissenschaftlichen Abwägungskriterien mittels Referenzdaten wird im Folgenden jeweils kurz angesprochen, der Schwerpunkt liegt jedoch auf den geowissenschaftlichen Abwägungskriterien, die jeweils eine individuelle Bewertung anhand gebietsspezifischer Daten oder Fachliteratur durch die BGE erfahren haben. Abschließend erfolgt eine Einordnung aller geowissenschaftlichen Abwägungskriterien in einem Fazit.

Bewertung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien anhand von Referenzdaten

Die Bewertung auf Grundlage des Referenzdatensatzes ist nicht spezifisch auf Daten zu Steinsalz in steiler Lagerung in Niedersachsen abgestützt und hat dementsprechend auch keinen konkreten Bezug zu Gesteinsvorkommen auf dem Gebiet des Landkreises Wesermarsch. Die Abwägungskriterien 1, 4, 5, 6, 7 und 8 wurden als günstig, die Abwägungskriterien 9 und 10 als nicht günstig bewertet (siehe hierzu Kapitel 6).

Individuelle Bewertung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien anhand gebietsspezifischer Daten oder Fachliteratur

Die geowissenschaftlichen Abwägungskriterien 2, 3 und 11 wurden individuell bewertet (BGE 2020p). Dazu wurden jeweils gebietsspezifische Daten oder Fachliteratur herangezogen.

Kriterium 2 zur Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper

Die *Konfiguration der Gesteinskörper* wurde für das Teilgebiet Seefeld (044) als „günstig“ eingestuft (BGE 2020o). Die *Barrierenmächtigkeit* wird mit günstig bewertet, da bei der vorliegenden maximalen Mächtigkeit von 450 m eine Fläche von 4,3 km² mit einer Mächtigkeit von mindestens 300 m ausgewiesen werden kann. Als Mindestflächenbedarf werden, wie in Kapitel 5 ausgeführt, 3 km² bei einer günstigen Barrieregesteinsmächtigkeit von 300 m angenommen.

Der Indikator *Grad der Umschließung des Einlagerungsbereichs durch einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich* wurde für das Wirtsgestein Steinsalz in steiler Lagerung übergreifend mit günstig bewertet (vgl. hierzu Kapitel 6). Zur Bewertung der *Teufe der oberen Begrenzung des erforderlichen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs* wird davon ausgegangen, dass innerhalb des identifizierten Gebietes, welches zwischen 1060 und 1500 m u. GOK liegt, potentiell ein einschlusswirksamer Gebirgsbereich mit einer Mächtigkeit von 100 m und einer Teufe größer 500 m u. GOK ermittelt werden kann (Bewertung des Indikators mit günstig). Der Indikator *Flächenhafte Ausdehnung bei gegebener Mächtigkeit* wird ebenfalls als günstig eingestuft, da die Fläche des identifizierten Gebietes mit 12,6 km² (im IG-Steckbrief und auf Seite 1 des Teilgebiets-Steckbriefs wird die Fläche jeweils mit 13 km² angegeben) oberhalb des doppelten Flächenbedarfs für einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich liegt.

Da dem Kriterium 2 „aufgrund der Datenlage zum jetzigen Zeitpunkt eine besondere Bedeutung“ zugeschrieben wurde, orientiert sich die Gesamtbewertung des Kriteriums an der jeweils schlechtesten Bewertung der Indikatoren.

Kriterium 3 zur Bewertung der räumlichen Charakterisierbarkeit

Für die Bewertung der *räumlichen Charakterisierbarkeit* wurde laut Kompaktsteckbrief zum Teilgebiet 044 (BGE 2020o) eine individuelle Bewertung für jedes identifizierte Gebiet von der BGE vorgenommen. Entgegen dieser Aussage erfolgte die Bewertung übergreifend anhand von Fachliteratur zu Zechsteinsalzstrukturen in steiler Lagerung allgemein – ohne konkreten Bezug zu dem vorliegenden Salzsteinvorkommen. Eine individuelle Bewertung ist nicht zu erkennen.

Auf Basis der Fachliteratur werden drei der Indikatoren – *Gesteinsausbildung, Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich* und *Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften* – ausgehend von der Annahme, dass insbesondere die Staßfurt Formation des Zechsteins einen homogenen, regional einheitlichen Aufbau mit nahezu monomineralischem Charakter vorweist, pauschal als günstig bewertet.

Ebenso führten Erkenntnisse aus der Fachliteratur zur Bewertung des Indikators *Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit* für steilstehende Salzstrukturen zu einer pauschalen Einordnung als bedingt günstig. Die Entstehung einer steilstehenden Salzstruktur, wie sie u.a. bei Seefeld (044) vorliegt, ist ein tektonischer Prozess, der in aller Regel mit einer Überprägung des ursprünglichen Gesteinsverbandes, mit Verfaltung, bruchhaftem Versatz, Klüftung etc. der beteiligten Gesteine einhergeht. Aufgrund der duktilen mechanischen Eigenschaften von Salzgestein nimmt die BGE bei der Bewertung des Indikators *Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit* ausgehend von der ausgewerteten Fachliteratur an, dass sich die äußere Tektonik nicht in das Innere der Salzstruktur fortsetzt und keine Zerblockung des Gesteins zu erwarten ist. Die Bewertung dieses Indikators ging nicht in die Gesamtbewertung des Kriteriums ein, „da die Anzahl der Bewertungen mit „günstig“ höher ist als die Anzahl der Bewertungen mit „bedingt günstig““ (BGE 2020p). Begründung hierfür ist die fehlende „Differenzierung in der Bewertung der verschiedenen identifizierten Gebiete“ (BGE 2020p).

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 für den Salzstock Seefeld (044) als bedingt günstig. Es wurden drei Indikatoren gebietsspezifisch betrachtet. Die Gesamtbewertung des Kriteriums richtet sich aufgrund der besonderen Bedeutung (BGE 2020p) dieser gebietsspezifischen Betrachtung nach der schlechtesten Bewertung der Indikatoren. Das Teilgebiet befindet sich in einer Tiefe von mindestens 1060 m unter GOK.

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 sind, 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“ (BGE 2020p) „als potentiell erosionshemmend betrachtet werden“ (BGE 2020p).

Obwohl Nachweise zu Störungen innerhalb des Identifizierten Gebietes vorliegen (siehe dazu auch Kapitel 4.1), 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.

6.2 Schlussfolgerungen und Bewertung zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien

Die Anwendung des **Kriteriums 1** *Bewertung des Transportes radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich* auf Grundlage von Referenzdaten ist nachvollziehbar, da in Phase 1 des Standortauswahlverfahrens noch keine Informationen über die mögliche Lage des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs oder die genauen hydrogeologischen Verhältnisse in einem Identifizierten Gebiet vorliegen. Die pauschalen Annahmen, auf denen die

Bewertung der Indikatoren *Abstandsgeschwindigkeit* und *Diffusionskoeffizient* aufbauen, scheinen insofern gerechtfertigt, als sie auf Erfahrungswerten zu den Eigenschaften beruhen. Die physikalische Unmöglichkeit der Bestimmung des Diffusionskoeffizienten von Steinsalz für tritiiertes Wasser führt dazu, dass dieser Indikator auch in späteren Verfahrensschritten nicht auf Teilgebiete in Steinsalz angewendet werden kann. Im Sinne eines wissenschaftsbasierten und transparenten Verfahrens sollte das Standortauswahlgesetz unter Umständen für alle Wirtsgesteine dahingehend angepasst werden, dass ein vergleichbarer Indikator verwendet wird.

Die Bewertung der *Konfiguration der Gesteinskörper*, **Kriterium 2**, wurde auf Basis gebietspezifischer Daten des jeweiligen Teilgebiets. Trotz der in Kapitel 5.1 dargestellten Diskrepanz zwischen den Angaben zur Tiefenlage im Zwischenbericht Teilgebiete und Literaturangaben kann die Bewertung des Kriteriums als hinreichend plausibel für Schritt 1 in Phase 1 des Standortauswahlverfahrens angenommen werden.

Die Bewertung der *räumlichen Charakterisierbarkeit*, **Kriterium 3**, erfolgte pauschal. Die herangezogenen Informationen hätten ohne weiteres auch in den Referenzdatensatz Eingang finden können. Eine individuelle Bewertung, wie im Teilgebietssteckbrief angegeben (BGE 2020p), ist nicht zu erkennen.

Das Vorgehen zur Bewertung der *langfristigen Stabilität der günstigen Verhältnisse*, **Kriterium 4**, kann vor dem Hintergrund der Feststellung, „weitere detailliertere Betrachtungen und ggf. Untersuchungen einzelner steil stehender Salzstrukturen bezüglich der langfristigen Stabilität der Mächtigkeit, Ausdehnung sowie Gebirgsdurchlässigkeit“ seien „im weiteren Verlauf des Verfahrens vorgesehen“ (BGE 2020k) für Phase 1 des Standortauswahlverfahrens als plausibel angesehen werden.

Das Vorgehen zur Bewertung der *günstigen gebirgsmechanischen Eigenschaften*, **Kriterium 5**, ist für Steinsalz plausibel, da aufgrund des jahrhundertelangen Bergbaus auf Stein- und Kalisalz in Deutschland und durch langjährige Laborforschung umfangreiche Kenntnisse zu den gebirgsmechanischen Eigenschaften von Steinsalz vorliegen.

Da in Phase 1 des Standortauswahlverfahrens keine standortbezogenen Daten für die Bewertung der *Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten*, **Kriterium 6**, vorliegen und die Eigenschaften von Steinsalz, wie oben ausgeführt, aus Forschungstätigkeit und Gewinnungsbergbau gut untersucht sind, kann das Vorgehen für Steinsalz in steiler Lagerung als adäquat angesehen werden.

Auch das Vorgehen zur Bewertung der **Kriterien 7 und 8**, *Gasbildung* und *Temperaturverträglichkeit*, erscheint für die Ausweisung von Teilgebieten mittels vorhandener Daten in der Phase 1 des Standortauswahlverfahrens angemessen.

Da zu diesem frühen Zeitpunkt im Standortauswahlverfahren noch kein einschlusswirksamer Gebirgsbereich benannt ist und keine Proben aus in Frage kommenden Standorten vorliegen, ist die Bewertung mittels Referenzdaten auf Grundlage von Literaturwerten auch für die Bewertung des *Rückhaltevermögens im einschlusswirksamen Gebirgsbereich*, **Kriterium 9**, plausibel.

Das Vorgehen zur Bewertung der *hydrochemischen Verhältnisse*, **Kriterium 10**, erscheint vor dem Hintergrund, dass noch keine standortspezifischen Informationen über die hydrochemischen Verhältnisse in potentiellen einschlusswirksamen Gebirgsbereichen vorliegen, ebenfalls angemessen.

Die Bewertung des *Schutzes des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durch das Deckgebirge*, **Kriterium 11**, anhand von Literaturdaten und den Ergebnissen der Anwendung von Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen erscheint zum jetzigen Verfahrenszeitpunkt angemessen. Nicht

nachvollziehbar ist jedoch aus Sicht der Autoren der Schluss, ein durch Störungen zerblocktes Deckgebirge sei in der Lage, hydraulischen und mechanischen Schutz gegen Erosion und das Eindringen von Grundwasser zu bieten. So wies beispielsweise Hübscher (2021) in seinem Vortrag zur „Auswirkung zukünftiger Vereisungen auf Salzstöcke und Deckgebirge“ im Rahmen der Fachkonferenz Teilgebiete auf eine Reihe möglicher Schädigungen eines Endlagers durch zukünftige Vereisungen hin, die in Norddeutschland erwartet werden müssen. Insbesondere die dort genannten Risiken von mechanischer Überprägung durch Eisauflast-induzierten Salzfluss und vertiefter Erosion von Rinnen im Deckgebirge von Salzstöcken werden durch ein Deckgebirge verstärkt, das von Störungen durchzogen ist und damit geprägt von Schwächezonen, die zukünftige Erosion begünstigen.

Nach Jaritz (1983) wird das Deckgebirge über dem Salzstock Seefeld von Störungen durchzogen, eine Störung wurde möglicherweise in der Bohrung Seefeld 101 angetroffen (siehe dazu Kapitel 4.1). Diese Informationen haben keinen erkennbaren Eingang in die Bewertung des geowissenschaftlichen Abwägungskriteriums zum *Schutz des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durch das Deckgebirge* gefunden. Im weiteren Verfahren sollten diese Daten in die Bewertung der Schutzfunktion des Deckgebirges gegen Erosion und Wasserzutritt einbezogen werden.

7 Prüfung von Daten und Literatur

Im Zwischenbericht Teilgebiete verwendete Quellen

Die Anwendung der Mindestanforderungen, die zur Ausweisung der Identifizierten Gebiete im Landkreis Wesermarsch führte, basieren auf Daten, Studien etc., die von Seiten der BGE offengelegt wurden. Auch bei der Anwendung der geologischen Abwägungskriterien wurde auf Literatur zurückgegriffen, die im Einzelnen in der Anlage 2 A (BGE 2020c) zum Fachbericht von der BGE dokumentiert wurde. Diese Daten und Literatur wurden gesichtet und dahingehend geprüft, ob standortspezifische Informationen zum ausgewiesenen Teilgebiet 044, Salzstock Seefeld, in dessen Bewertung eingegangen sind bzw. welche Daten dabei keine Berücksichtigung fanden. Zum Vergleich wurden auch die Literaturangaben zum Identifizierten Gebiet 042, Salzstock Jaderberg, aus der Anlage 2B zum Fachbericht Teilgebiete (BGE 2020d) herangezogen.

Die Anwendung der Mindestanforderungen 2 (Mächtigkeit), 3 (minimale Teufe) und 4 (Fläche) erfolgte unter Einbeziehung gebietsspezifischer Informationen zur Tiefenlage des Strukturtops von Salzstöcken, deren flächenhafter Erstreckung sowie der Mächtigkeit des Gesteinskörpers. Nach der Darstellung im Fachbericht zur Anwendung der Mindestanforderungen (BGE 2020f) wurden diese Informationen durch Auswertung von 3D-Modellen des Untergrunds gewonnen. Aus Teil 3 des Datenberichts zu Mindestanforderungen und geowissenschaftlichen Abwägungskriterien (BGE 2020i, Tabelle 2) geht hervor, dass entscheidungserhebliche 3D-Modelle für Niedersachsen, der Geotektonische Atlas 3D (Bombien et al. 2012) sowie die Ergebnisse des Forschungsvorhabens der BGR InSpEE¹⁵ (BGR 2016), als Quellen dienten. Im Abschlussberichten des Vorhabens InSpEE wird der Salzstock Seefeld nur tabellarisch aufgeführt; der Geotektonische Atlas bietet eine 3D-Darstellung des Salzstocks und der zugehörigen Scheitelstörungen. Inwieweit die Datenblätter zu Strukturinformationen der norddeutschen Salzstöcke, die im Rahmen von InSpEE erstellt wurden, jeweils zur Bewertung herangezogen wurden, ist nicht nachvollziehbar. Die in Kapitel 5.1 dargelegte

¹⁵ Vorhaben: „Informationssystem Salzstrukturen: Planungsgrundlagen, Auswahlkriterien und Potentialabschätzung für die Errichtung von Salzkavernen zur Speicherung von Erneuerbaren Energien (Wasserstoff und Druckluft) (InSpEE)“, abrufbar unter https://www.bgr.bund.de/EN/Themen/Nutzung_tieferer_Untergrund_CO2Speicherung/Projekte/Nutzungspotenziale/Abgeschlossen/InSpEE_en.html

Diskrepanz zwischen den Tiefenangaben im InSpee-Datenblatt und dem Zwischenbericht Teilgebiete legt nahe, dass das Datenblatt nicht berücksichtigt wurde. Eine Begutachtung der 3D-Modelle selbst erfolgte im Rahmen dieses Gutachtens nicht.

Neben den Angaben zu 3D-Modellen sind in Teil 3 des Datenberichts Schichtenverzeichnisse aus Bohrungen enthalten. Die „Schichtenverzeichnisse der entscheidungserheblichen Bohrungen des Zechstein in Niedersachsen im endlagerrelevanten Tiefenbereich“ (BGE 2020i, Tabelle 15) enthalten keine Lokationen, die direkt mit der Umgebung des Salzstocks Seefeld oder des Landkreises Wesermarsch korreliert werden können. Die in Tabelle 4-1 aufgeführten Bohrungen Seefeld 1, Seefeld 3 und Seefeld 101 sind, wie oben erwähnt, sämtlich nicht als entscheidungserheblich charakterisiert worden und die Schichtenverzeichnisse daher nicht im Datenbericht aufgeführt.

Im Teil 1 des Datenberichts zu Mindestanforderungen und geowissenschaftlichen Abwägungskriterien werden in Tabelle 41 potentielle Wirtsgesteine in Niedersachsen aufgeführt. Die Quellenangabe zur Einheit „Zechstein, Werra, Staßfurt-, Leine- und Aller-Formation“ (BGE 2020h) besteht aus einem Weblink zu einer Seite des LBEG, der jedoch zu einer Fehlermeldung führt¹⁶. Daher konnte die Quellenangabe nicht nachvollzogen werden.

Die Literaturreferenzen zu den geowissenschaftlichen Abwägungskriterien sind in Anlage 2A zum Fachbericht Abwägungskriterien (BGE 2020c), sortiert nach Teilgebieten und weiter nach Kriterien und Indikatoren, aufgeführt. Für das Teilgebiet 044 Seefeld sind diese Angaben identisch mit den Angaben zu weiteren als Teilgebiete ausgewiesenen Salzstöcken, bspw. in den Landkreisen Emsland und Rotenburg (Wümme). Die Literaturangaben (BGE 2020d) zum Salzstock Jaderberg, der als Identifiziertes Gebiet 042 benannt, aber nicht als Teilgebiete ausgewiesen wurde, sind ebenfalls sämtlich auch in den Literaturangaben zum Salzstock Seefeld und weiteren enthalten. Ein Großteil der verwendeten Quellen ist online zugänglich, die meisten davon kostenfrei. Einige der angegebenen Quellen sind Bücher oder Zeitschriftenveröffentlichungen, die nur über Bibliotheken oder antiquarisch verfügbar sind. Direkten Bezug zum betrachteten Salzstock Seefeld haben nur zwei der Veröffentlichungen (Frisch und Kockel (2004), Jaritz (1983)).

Bei der Anwendung von Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen und geowissenschaftlichen Abwägungskriterien werden die Gesteinseigenschaften von Steinsalz ausschließlich in generischer Weise berücksichtigt. Spezifische Informationen zu den Gesteinen des Salzstocks Seefeld oder dessen Deckgebirge wurden nicht berücksichtigt. Eine Prüfung der verwendeten Daten auf Konsistenz ist auf Grund der Datenlage nicht möglich.

Die Quellen, denen die Daten zur Raumlage entstammen, sind nicht spezifisch für den Salzstock Seefeld nachzuvollziehen. Aus der Darstellung des Vorgehens in der Arbeitshilfe zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien (BGE 2020g) geht jedoch hervor, dass „auf prozessierte Daten bezüglich der Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen [...] sowie auf die erstellten/bearbeiteten 3D-Modelle zu den Wirtsgesteinsformationen“ zurückgegriffen wird.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass aus der Sichtung der von der BGE im Rahmen des Zwischenberichts veröffentlichten Unterlagen nicht ersichtlich ist, inwieweit konkret im Bereich des Teilgebiets 044 Seefeld oder des Landkreises Wesermarsch erhobene Daten, bspw. aus der Erdölexploration und vorliegenden Studien, in die Kriterienanwendung eingegangen sind.

¹⁶ zuletzt geprüft am 19.08.2021

Weitere Quellen

Im Rahmen einer kurzen Literaturdurchsicht konnte nur eine seitens der BGE bisher nicht zitierte Quelle zur Geologie im Bereich des Landkreises Wesermarsch ermittelt werden:

Preuss, Horst (1979): Die holozäne Entwicklung der Nordseeküste im Gebiet der östlichen Wesermarsch: mit 5 Tabellen. Stuttgart: Schweizerbart (Reihe A, Allgemeine und regionale Geologie Bundesrepublik Deutschland und Nachbargebiete, Tektonik, Stratigraphie, Paläontologie 53, 53).

Für das weitere Verfahren sollten diese Publikationen auf möglicherweise relevante Informationen hin geprüft werden, sollten die Teilgebiete im Landkreis Wesermarsch als Standortregionen ausgewiesen werden.

8 Zusammenfassende Bewertung

Die Methodik zur Ausweisung des Teilgebietes 044 im Rahmen des Standortauswahlverfahrens für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle konnte anhand der von der BGE im Zwischenbericht Teilgebiete veröffentlichten Unterlagen nachvollzogen werden.

Durch Anwendung der Ausschlusskriterien erfolgte auf dem Gebiet des Landkreises Wesermarsch der Ausschluss aktiver Störungszonen sowie von Bohrungen und Bergwerken. Die ausgeschlossenen Bergwerke befinden sich allerdings nicht in der unmittelbaren Umgebung des Salzstocks Seefeld. Die Bearbeitung der Ausschlusskriterien *Seismische Aktivität* und *Grundwasseralter* sollte, wie in Kapitel 4.1 dargelegt, im weiteren Verfahren angepasst werden.

Alle Mindestanforderungen werden seitens der BGE für das Teilgebiet 044 als erfüllt angesehen. Die Anwendung der Mindestanforderungen vernachlässigt aber bisher aufgrund der Datenlage generell den komplexen Internbau von Salinaren.

Bei der Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien wurden im Wesentlichen pauschale Bewertungen anhand von Referenzdatensätzen vorgenommen, die für alle Gebiete mit dem Wirtsgestein Steinsalz identisch genutzt wurden.

Drei der elf geowissenschaftlichen Abwägungskriterien wurden individuell bewertet. Hinsichtlich der Methodik bei diesen drei Kriterien fällt auf, dass bei der Zusammenführung der Bewertung einzelner Indikatoren zu einer Gesamtbewertung unterschiedliche Methoden gewählt wurden. So werden die Kriterien *Konfiguration der Gesteinskörper* und *Schutz des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durch das Deckgebirge* nach der schlechtesten Beurteilung eines Indikators bewertet, während für *räumliche Charakterisierbarkeit* (Kriterium 3) ein anderes Vorgehen gewählt wurde.

Bei der Bewertung dieses Kriteriums werden drei der vier Indikatoren pauschal nach dem Internbautyp des jeweiligen Salinars gleich bewertet; ein Indikator wird für sämtliche Salzstöcke in Norddeutschland, die nicht durch Ausschlusskriterien oder Mindestanforderungen ausgeschieden sind, identisch bewertet. Obwohl letzterer, der Indikator *Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit*, als bedingt günstig bewertet wird, erfolgt die Gesamtbewertung als günstig.

Da die Indikatoren des Kriteriums seitens der BGE demnach nicht individuell, sondern anhand pauschaler Annahmen bewertet wurden, sollte die Bewertung dieses Kriteriums entweder in den Referenzdatensatz aufgenommen werden oder, analog zu den anderen individuell bewerteten Kriterien, nach der schlechtesten Einstufung eines der Indikatoren beurteilt werden. In diesem Fall wäre das Kriterium für alle identifizierten Gebiete mit dem potentiellen Wirtsgestein Steinsalz in steiler Lagerung als bedingt günstig zu kennzeichnen.

Zur standortspezifischen Bewertung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien 2 und 11 wurden als individuelle, salzstockspezifische Informationen ausschließlich die Tiefenlage der Salzstockoberfläche, die Mächtigkeit, d. h. die vertikale Erstreckung des Salzstocks, und dessen Flächenausdehnung herangezogen. Existierende standortspezifische Daten aus den Schichtenverzeichnissen von Bohrungen wurden nicht genutzt.

Darüber hinaus wurden die Schichtenverzeichnisse der Bohrungen als nicht entscheidungserheblich eingestuft und daher seitens der BGE nicht veröffentlicht. Das steht im Widerspruch zur Aussage im Fachbericht zur Anwendung der Mindestanforderungen (BGE 2020f), wonach „für Salzformationen in stratiformer und steiler Lagerung [...] gleichermaßen entscheidend“ sei, „dass Halit der gesteinsbildende Hauptbestandteil ist, damit sie als potentiell endlagerrelevantes Wirtsgestein „Steinsalz“

angesehen werden können. Diese Anforderung gilt als erfüllt, wenn in der petrographischen Beschreibung vorhandener Bohrungen mit Schichtenverzeichnis Halit/Halitit/Steinsalz ([^]na), Bändersalz ([^]bds), Fasersalz ([^]fas), Hartsalz ([^]hs) oder Chloridgestein ([^]cl) als Hauptkomponente (vgl. Okrusch & Matthes 2014) angegeben wird“ (BGE 2020f). Vor diesem Hintergrund ist nicht nachvollziehbar, wie Schichtenverzeichnisse von Bohrungen, die Salzstöcke erbohrt oder sogar durchteuft haben, als nicht entscheidungserheblich eingestuft werden können.

Die Sonderstellung von Scheitelstörungen, die zwar im Deckgebirge von Salzstöcken zum Ausschluss nach § 22 Abs. 2 Nr. 2 führen, nicht aber zum Ausschluss der Salzstöcke selbst, wird mit dem duktilen Verhalten von Steinsalz begründet, das eine Fortsetzung der Störungen in den Salzstock hinein verhindere. Wie in Kapitel 4.1 ausgeführt, bedarf dieses Vorgehen einer vertieften Betrachtung und möglicherweise Revision.

Wie in Kapitel 5.1 dargestellt, weicht die Tiefenangabe zur Lage des Salzstocks Seefeld im Zwischenbericht Teilgebiete zum Teil deutlich von Literaturdaten ab, auch unter Berücksichtigung der von der BGE jeweils addierten Salzscheibe. Diese Diskrepanz sollte aufgelöst werden.

Hinsichtlich der Bewertung des geowissenschaftlichen Abwägungskriteriums 11, *Schutz des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durch das Deckgebirge*, ist zu hinterfragen, inwieweit ein durch Scheitelstörungen zerblocktes Deckgebirge in der Lage ist, hydraulischen und mechanischen Schutz gegen Erosion und das Eindringen von Grundwasser zu bieten. Wie in Kapitel 4.1 dargestellt, beschreibt Jaritz (1983) das Deckgebirge des Salzstocks als „von Störungen durchzogen“. Auch der in Kapitel 4.1 dargestellte Hinweis auf eine in der Bohrung Seefeld 1 angetroffene Störung im Deckgebirge des Salzstocks sollte berücksichtigt werden. Insbesondere die möglichen Auswirkungen zukünftiger wiederholter Vereisungen sollten, wie in Kapitel 6.2 dargelegt, Eingang in die erneute Bewertung des Kriteriums im nächsten Verfahrensschritt nach § 14 StandAG finden.

Unter Berücksichtigung der Anwendungsmethodik der Vorhabenträgerin BGE und der Tatsache, dass keine standortspezifischen Informationen außer dem geologischen 3D-Modell von Niedersachsen herangezogen wurden, erscheint die Ausweisung des Salzstocks Seefeld als Teilgebiet im ersten Schritt der Phase 1 des Standortauswahlverfahrens plausibel. Im weiteren Verfahren sollten jedoch alle vorliegenden Informationen zur lokalen Geologie herangezogen werden, um Standortregionen für die übertägige Erkundung zu ermitteln. Das betrifft sowohl die Durchführung repräsentativer vorläufiger Sicherheitsuntersuchungen als auch die erneute Anwendung geowissenschaftlicher Abwägungskriterien im Schritt 2 der Phase 1 des Standortauswahlverfahrens.

Bis zur Ausweisung von Standortregionen gemäß § 14 StandAG soll die mit der Fachkonferenz Teilgebiete begonnene Öffentlichkeitsbeteiligung nach einem Beschluss der Fachkonferenz weitergeführt werden, um keine Beteiligungslücke entstehen zu lassen. Die Vorbereitungsgruppe des dritten Beratungstermins hat seitens der Fachkonferenz das Mandat erhalten, mit dem Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE) ein Konzept dazu zu erarbeiten.

Neben der Teilnahme an Veranstaltungen im Rahmen der Öffentlichkeitsbeteiligung besteht für den Landkreis Wesermarsch die Möglichkeit zu einem direkten Austausch mit der Vorhabenträgerin. Fragen und Anmerkungen, die sich aus dem vorliegenden Gutachten ergeben, können direkt an die BGE herangetragen werden. Des Weiteren hat das Land Niedersachsen ein Begleitforum Endlager-suche¹⁷ eingerichtet, das sich aus niedersächsischer Perspektive mit dem Standortauswahlverfahren auseinandersetzt.

¹⁷ <https://www.begleitforum-endlagersuche.de/>

Relevante Fragestellungen

Aus der Prüfung der Ausweisung des Salzstocks Seefeld als Teilgebiet 044 im Rahmen des Standortauswahlverfahrens für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle können einige konkrete Fragestellungen an die BGE als Vorhabenträgerin des Standortauswahlverfahrens abgeleitet werden:

- Wie sind die deutlichen Unterschiede hinsichtlich der Tiefenangaben zum Salzstock Seefeld in Zwischenbericht und Literatur zu erklären? Welche Angabe zur Tiefe des Salzstocks Seefeld kann tatsächlich anhand realer Daten, z.B. Bohrungen oder seismischer Daten, belegt werden?
- Warum werden Schichtenverzeichnisse von Bohrungen in Schritt 1 der Phase 1 als nicht entscheidungserheblich eingestuft und daher nicht veröffentlicht, während gleichzeitig nach Angabe des Fachberichts zur Anwendung der Mindestanforderungen diese Informationen zur Entscheidung über die Eignung von Salzstöcken als Wirtsgestein für ein Endlager genutzt werden?
- Warum werden Informationen zu Störungen im Deckgebirge des Salzstocks Seefeld sowohl aus der Literatur als auch den Schichtenverzeichnissen von Bohrungen nicht bei der Anwendung des geowissenschaftlichen Abwägungskriteriums 11 zum Schutz des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durch das Deckgebirge berücksichtigt?

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 (zu „Anwendung Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG“) IG-Steckbriefe. Peine, 23.09.2020.
- BGE - Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (2020b): 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 (2020c): Anlage 2A (zum Fachbericht Teilgebiete und Anwendung Geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG), Literaturreferenzen: Teil A (Teilgebiete). Peine, 22.09.2020.
- BGE - Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (2020d): Anlage 2B (zum Fachbericht Teilgebiete und Anwendung Geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG), Literaturreferenzen: Teil B (Keine Teilgebiete). Peine, 22.09.2020.
- BGE - Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (2020e): Anwendung Ausschlusskriterien gemäß § 22 StandAG. Peine, 28.09.2020.
- BGE - Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (2020f): Anwendung Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG. Peine, 28.09.2020.
- BGE - Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (2020g): Arbeitshilfe zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien im Rahmen von § 13 StandAG. Peine, 03.09.2020.
- BGE - Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (2020h): Datenbericht Teil 1 von 4, Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG. Peine, 28.09.2020.
- BGE - Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (2020i): Datenbericht Teil 3 von 4, Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG. Peine, 28.09.2020.
- BGE - Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (2020j): Interaktive Karte zum Zwischenbericht Teilgebiete. Online verfügbar unter <https://www.bge.de/de/endlagersuche/zwischenbericht-teilgebiete/>.
- BGE - Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (2020k): Referenzdatensätze zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien im Rahmen von § 13 StandAG, Grundlagen. Peine, 01.09.2020.
- BGE - Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (2020l): Teilgebiete und Anwendung Geowissenschaftliche Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG. Peine, 28.09.2020.
- BGE - Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (2020m): Zwischenbericht Teilgebiete gemäß § 13 StandAG. Peine, 28.09.2020.
- BGE - Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (Hg.) (2020n): Anlage 1 (zum Datenbericht zu den Ausschlusskriterien gemäß § 22 Stand AG), Entscheidungserhebliche Daten zum Ausschlusskriterium „aktive Störungszone“, 21.09.2020.

- BGE - Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (Hg.) (2020o): Kompaktsteckbrief zum Teilgebiet 044_00TG_082_00IG_S_s_z, in Zwischenbericht Teilgebiete gemäß §13 StandAG (Geschäftszeichen: SG01101/16-1/2-2019#3 - Objekt-ID: 755925 - Revision: 000). Peine, 28.09.2020, zuletzt geprüft am 07.07.2021.
- BGE - Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (Hg.) (2020p): Steckbrief 044_00TG_082_00IG_S_s_z, Steinsalz in steiler Lagerung. Geschäftszeichen: SG02102/5-5/2-2020#12 - Objekt-ID: 829573 - Revision: 000, 28.09.2020, zuletzt geprüft am 07.07.2021.
- BGR - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2016): 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.
- Bombien, H.; Hoffers, B.; Breuckmann, S.; Helms, M.; Lademann, K.; Lange, M.; Oelrich, A.; Reimann, R.; Rienäcker, J.; Schmidt, C.; Slaby, M.-F.; Ziesch, J. (2012): Der Geotektonische Atlas von Niedersachsen und dem deutschen Nordseesektor als geologisches 3D-Modell Einleitung. In: *Gmit Geowissenschaftliche Mitteilungen*.
- 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.
- Fractionen 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*.
- Hübscher, C. (2021): Auswirkungen zukünftiger Vereisungen, Ausschlusskriterien und „Lernendes Verfahren“. Fachkonferenz Teilgebiete, 1. Beratungstermin. Veranstalter: Bundesamt für die Sicherheit der nuklearen Entsorgung (BASE), 06.02.2021.
- 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.
- 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.

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.