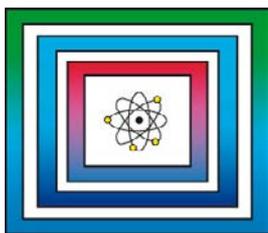


Standortauswahl

9S2018080000

Konzept zur generellen
Vorgehensweise
zur Anwendung der
geowissenschaftlichen
Abwägungskriterien –
Schritt 2



Abschlussbericht

Hannover, Berlin, Februar 2020

BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND
ROHSTOFFE HANNOVER

DIENSTBEREICH HANNOVER UND BERLIN

Standortauswahl

Konzept zur generellen Vorgehensweise zur Anwendung der
geowissenschaftlichen Abwägungskriterien – Schritt 2

Abschlussbericht

Autoren:	Beushausen, Matthias Bebiolka, Anke Kloke, Ralf Kuhlmann, Gesa, Dr. Noack, Vera, Dr. Reinhold, Klaus Röhling, Simone, Dr. Sönke, Jürgen
Auftraggeber:	Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE)
Auftragsnummer:	9S2018080000
Datum:	04.02.2020
Geschäftszeichen:	B3.2/B50161-08/2019-0006/001
Gesamtblattzahl:	183

Im Auftrag:

gez. G. Enste

Direktor und Professor G. Enste
Abteilungsleitung B 3 und Projektleitung Endlagerung

Inhaltsverzeichnis	Seite
Verkürzte Zusammenfassung	4
Abstract	5
1 Einleitung	6
1.1 Veranlassung	6
1.2 Stellung der Abwägungskriterien im Standortauswahlverfahren	7
1.3 Vorgehensweise in dieser Studie	9
2 Konkretisierung der Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien (A 7)	11
2.1 Definitionen und Erläuterungen zum Verständnis der geowissen- schaftlichen Abwägungskriterien (A 7.1)	11
2.2 Handlungsoptionen zum Umgang mit unbestimmten Begriffen und Formulierungen (A 7.2)	13
2.2.1 Anlage 1 – Kriterium zur Bewertung des Transportes radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen im ewG	13
2.2.2 Anlage 2 – Kriterium zur Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper ...	14
2.2.3 Anlage 3 – Kriterium zur Bewertung der räumlichen Charakterisierbarkeit	17
2.2.4 Anlage 4 – Kriterium zur Bewertung der langfristigen Stabilität der günstigen Definition	19
2.2.5 Anlage 5 – Kriterium zur Bewertung der günstigen gebirgsmechanischen Eigenschaften	20
2.2.6 Anlage 6 – Kriterium zur Bewertung der Neigung zur Bildung von Fluid- wegsamkeiten	21
2.2.7 Anlage 7 – Kriterium zur Bewertung der Gasbildung	24
2.2.8 Anlage 8 – Kriterium zur Bewertung der Temperaturverträglichkeit	24
2.2.9 Anlage 9 – Kriterium zur Bewertung des Rückhaltevermögens im ewG	25
2.2.10 Anlage 10 – Kriterium zur Bewertung der hydrochemischen Verhältnisse	26
2.2.11 Anlage 11 – Kriterium zur Bewertung des Schutzes des ewG durch das Deckgebirge	26
3 Konkretisierung der Arbeitsschritte für die Konzeptentwicklung (A 8)	27
3.1 Ermittlung der zur Anwendung der Abwägungskriterien erforderlichen geowissenschaftlichen Informationen/Daten (A 8.1)	29
3.2 Methoden zur Sichtung und Prüfung der vorliegenden Informationen (A 8.2)	31
3.2.1 Systematik der geowissenschaftlichen Informationen	32

Seite

3.2.2	Zuordnung der abgefragten geowissenschaftlichen Informationen zu den Indikatoren der Abwägungskriterien	33
3.3	Aufzeigen alternativer Möglichkeiten für die Bestimmung von Indikatoren/ Bewertungsgrößen (A 8.3)	48
3.4	Diskussion der erforderlichen Datenverteilung und Datendichte zur Anwendung der Abwägungskriterien (A 8.4)	49
3.4.1	Datengenauigkeit	50
3.4.2	Datenmenge	51
3.4.3	Datenverteilung und -verbreitung	52
3.4.4	Übertragbarkeit von Daten/Informationen	53
3.5	Vorgehensweise zur Qualitätsprüfung von Daten (A 8.5)	54
3.6	Anforderung an die Datenaufbereitung (A 8.6)	64
4	Methoden der Abwägung (A 9)	70
4.1	Übersicht über das Einengungsverfahren im Schweizer Sachplanverfahren Geologische Tiefenlager (A 9.1)	71
4.2	Diskussion möglicher Abwägungsmethoden (A 9.2)	87
5	Fazit	92
	Literaturverzeichnis	93
	Abkürzungsverzeichnis	107
	Tabellenverzeichnis	110
	Abbildungsverzeichnis	112
	Anhangverzeichnis	113

Verkürzte Zusammenfassung

Autoren:	Beushausen, Matthias Bebiolka, Anke Kloke, Ralf Kuhlmann, Gesa, Dr. Noack, Vera, Dr. Reinhold, Klaus Röhling, Simone, Dr. Sönneke, Jürgen
Titel:	Konzept zur generellen Vorgehensweise zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien – Schritt 2
Schlagwörter:	Abwägungskriterien, Indikatoren, Bewertungsgrößen, Definitionen, erforderliche Informationen, Standortauswahlgesetz

Mit dem Standortauswahlgesetz vom 05.05.2017 wird das Verfahren zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle geregelt. Das Gesetz schreibt eine stufenweise, durch Kriterien gesteuerte Vorgehensweise vor. Die Kriterien und Anforderungen für die Standortauswahl sind geowissenschaftliche Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen und Abwägungskriterien sowie planungswissenschaftliche Abwägungskriterien. Gegenstand des Berichts sind die geowissenschaftlichen Abwägungskriterien.

Es werden grundlegende Informationen zum Verständnis der Abwägungskriterien und zu ihrer Anwendung im Rahmen des Standortauswahlverfahrens gegeben. Die Bewertungsgrößen/Indikatoren der Abwägungskriterien und Begriffe, die im Standortauswahlgesetz verwendet aber nicht definiert sind, werden erläutert. Tabellarisch werden die zur Anwendung der Abwägungskriterien bzw. ihrer Bewertungsgrößen/Indikatoren erforderlichen geowissenschaftlichen Informationen/Daten genannt und alternative Möglichkeiten für ihre Bestimmung vorgestellt. Methoden, die zur Sichtung vorliegender Informationen und zur ihrer Qualitätsprüfung herangezogen werden können, werden aufgezeigt. Zusätzlich werden Leitgedanken zu den Themen Datenverteilung, -dichte und -aufbereitung erörtert. Da der Schweizer Sachplan Geologische Tiefenlager neben dem Standortauswahlverfahren des StandAG das einzige Verfahren ist, das die Anwendung von Abwägungskriterien vorsieht, wird darauf im Speziellen eingegangen. Die Vorgehensweisen der Auswahlverfahren weiterer Staaten werden kurz vorgestellt.

Abstract

Authors:	Beushausen, Matthias Bebiolka, Anke Kloke, Ralf Kuhlmann, Gesa, Dr. Noack, Vera, Dr. Reinhold, Klaus Röhling, Simone, Dr. Sönnke, Jürgen
Title:	Final report on the concept for the general procedure for applying the geoscientific weighing criteria – Step 2
Subject terms:	weighing criteria, evaluation parameters, definitions, vague terms, necessary information, indicators, Site Selection Act, final disposal

The Site Selection Act dated 05.05.2017 governs the procedure for the search and selection of a site for a repository for high-level radioactive waste in Germany. The act stipulates a step-wise approach controlled by defined criteria. The criteria and requirements for site selection are geoscientific exclusion criteria, minimum requirements and geoscientific weighing criteria, as well as other criteria regarding regional planning science. The report deals with the geoscientific weighing criteria.

The report includes basic information explaining the weighing criteria, and how they are applied as part of the site selection procedure. Explanations are also given of the assessment parameters/indicators of the weighing criteria, and the terms, which are used but undefined in the Site Selection Act. Tables show the geoscientific information/data required in the weighing criteria and/or their evaluation parameters/data, as well as alternative means for their determination. The methods, which may be involved in sifting through the available information and for quality assessment, are shown. In addition, the key considerations applying to data distribution, density and processing, are discussed. The Swiss Sectoral Plan for Deep Geological Repositories is referred to, because it is the only other procedure, in addition to the Site Selection Act, which includes the use of weighing criteria. There is also a brief review of the approaches applied in the selection procedures used by other countries.

1 Einleitung

1.1 Veranlassung

Die Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) hat die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) mit Arbeiten zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien im Standortauswahlverfahren des StandAG (2017)¹ beauftragt. Diese Arbeiten werden im Arbeitspaket 9S2018080000 „Konzept zur generellen Vorgehensweise zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien – Schritt 2“, Laufzeit vom 23.03.2019 bis 31.12.2019, durchgeführt.

Hierzu wurde von der BGR zunächst in einem vorangegangenen Arbeitsschritt (v. Goerne et al. 2018) ein Grobkonzept erstellt (Aufgaben A 1 bis A 6), das der BGE am 05.12.2018 übersandt worden ist. Aufbauend auf diesem Grobkonzept soll ein vertiefendes, präzisiertes Konzept zur generellen Vorgehensweise zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien (AWK), einschließlich geowissenschaftlicher Überlegungen für die Datenabfrage durch die BGE erarbeitet werden (Aufgaben A 7 bis A 9).

Im Zwischenbericht (Beushausen et al. 2020) vom 28.01.2020 wurden folgende Teilaufgaben ausgeführt und dokumentiert:

- A 7.1 Aktualisierung der Definitionen und Erläuterungen zum Verständnis der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien,
- A 7.2 Handlungsoptionen zum Umgang mit unbestimmten Begriffen,
- A 8.1 Ermittlung der zur Anwendung der Abwägungskriterien erforderlichen geowissenschaftlichen Informationen/Daten,
- A 8.3 Aufzeigen alternativer Möglichkeiten für die Bestimmung von Indikatoren/Bewertungsgrößen.

Diese Ausführungen zu den o. g. Teilaufgaben im Zwischenbericht werden in den vorliegenden Abschlussbericht übernommen und ggf. aktualisiert, so dass eine vollständige und zusammenhängende Dokumentation sämtlicher Ergebnisse aus der Bearbeitung des Auftrags im Abschlussbericht sichergestellt ist.

Der Abschlussbericht beinhaltet des Weiteren die folgenden Teilaufgaben:

¹ StandAG (2017): Standortauswahlgesetz vom 05.05.2017 (BGBl. I S. 1074), das zuletzt durch Artikel 3 des Gesetzes vom 12. Dezember 2019 (BGBl. I 2019, Nr. 48, S. 2510) geändert worden ist

- A 8.2 Methoden zur Sichtung und Prüfung der vorliegenden Informationen,
- A 8.4 Diskussion der erforderlichen Datenverteilung und Datendichte zur Anwendung der Abwägungskriterien,
- A 8.5 Vorgehensweise zur Qualitätsprüfung der Daten,
- A 8.6 Anforderungen an Datenaufbereitung,
- A 9.1 Identifizieren vorhandener Abwägungsmethoden,
- A 9.2 Diskussion möglicher Abwägungsmethoden.

Während der Bearbeitung der Teilaufgaben erfolgten fortlaufende Fachgespräche mit der BGE. Zwischenergebnisse zu den Arbeiten im Arbeitspaket wurden regelmäßig an die BGE übergeben, damit diese schon frühzeitig in die laufenden Arbeiten der BGE einfließen konnten.

1.2 Stellung der Abwägungskriterien im Standortauswahlverfahren

Die Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) hat als Vorhabenträger in der Phase I des Standortauswahlverfahrens u. a. Teilgebiete zu ermitteln (§ 13 StandAG), die günstige geologische Voraussetzungen für die sichere Endlagerung radioaktiver Abfälle erwarten lassen.

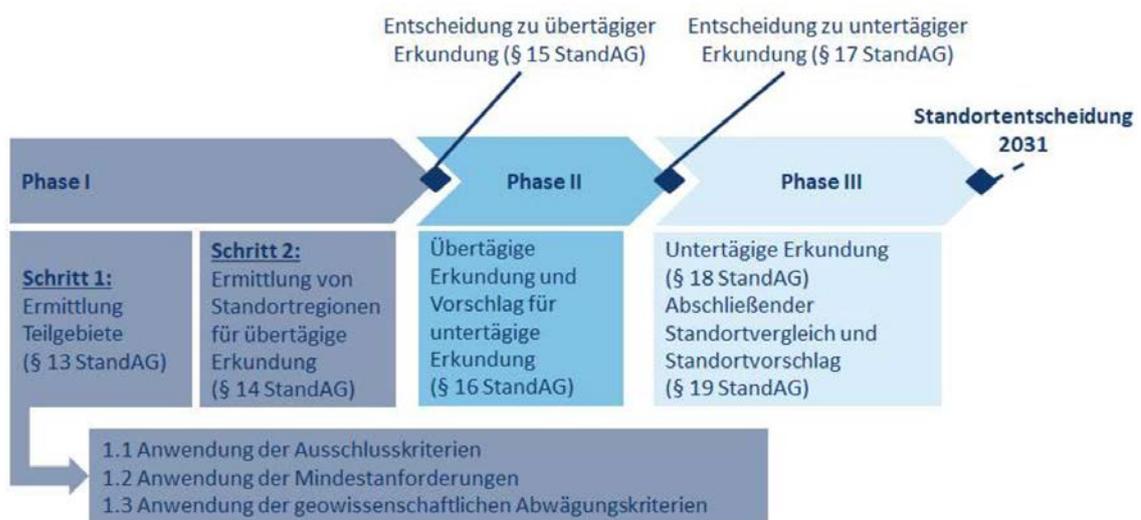


Abb. 1: Schematische Darstellung der Phasen des Auswahlverfahrens (BGE 2019)

Zunächst trägt der Vorhabenträger für das gesamte Bundesgebiet die geologischen Daten der zuständigen Stellen des Bundes und der Länder, die für das Standortauswahlverfahren

relevant sein können (§§ 22 bis 24 StandAG), zusammen und bereitet sie in geeigneter Form auf. Auf Grundlage der zur Verfügung gestellten geologischen Daten wendet der Vorhabenträger zunächst die geowissenschaftlichen Ausschlusskriterien des § 22 StandAG und auf die dabei verbleibenden Gebiete die Mindestanforderungen des StandAG sowie die geowissenschaftlichen Abwägungskriterien des § 24 StandAG an (Schritt 1.1 bis 1.3 in Abb. 1), mit dem Ziel, Teilgebiete auszuweisen, die günstige geologische Voraussetzungen für die sichere Endlagerung hochradioaktiver Abfälle erwarten lassen. Die Einschätzung der günstigen geologischen Voraussetzungen eines Teilgebietes ergibt sich aus der sicherheitsgerichteten Abwägung der Ergebnisse zu allen geowissenschaftlichen Abwägungskriterien. Auch im Schritt 1.3 des Standortauswahlverfahrens bilden die bei den zuständigen Stellen der Länder und des Bundes vorliegenden und von diesen Stellen zur Verfügung zu stellenden Daten die zu verwendende Datengrundlage (§ 13 Abs. 2 StandAG).

Im § 24 Abs. 3 bis 5 StandAG sind die elf geowissenschaftlichen Abwägungskriterien der Anlagen 1 bis 11 in folgende drei Kriteriengruppen untergliedert:

- Erreichbare Qualität des Einschlusses und die zu erwartende Robustheit des Nachweises (Anlagen 1 bis 4 zu § 24 Abs. 3 StandAG):
 - Transport radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG),
 - Konfiguration der Gesteinskörper,
 - räumliche Charakterisierbarkeit,
 - langfristige Stabilität der günstigen Verhältnisse.
- Absicherung des Isolationsvermögens (Anlagen 5 und 6 zu § 24 Abs. 4 StandAG):
 - Günstige gebirgsmechanische Eigenschaften,
 - geringe Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten.
- Weitere sicherheitsrelevante Eigenschaften (Anlagen 7 bis 11 zu § 24 Abs. 5 StandAG):

- Gasbildung,
- Temperaturverträglichkeit,
- Rückhaltevermögen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich,
- hydrochemische Verhältnisse,
- Schutz des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durch das Deckgebirge.

Im Schritt 2 der Phase 1 (§ 14 StandAG) im Standortauswahlverfahren (Abb. 1) werden repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen durchgeführt. Im Anschluss daran werden die geowissenschaftlichen Abwägungskriterien erneut angewendet, um Standortregionen für die übertätige Erkundung zu ermitteln.

1.3 Vorgehensweise in dieser Studie

Der Fokus des vorliegenden Berichts liegt auf der für Schritt 1.3 vorgesehenen Anwendung der Abwägungskriterien zur Ermittlung der Teilgebiete (§ 13 StandAG). Der Bericht behandelt ausschließlich die nach § 24 Abs. 3 bis 5 StandAG zu beurteilenden Eigenschaften für eine günstige geologische Gesamtsituation anhand der in den Anlagen 1 bis 11 festgelegten Abwägungskriterien.

Jedes Abwägungskriterium ist mit wenigstens einer bewertungsrelevanten Eigenschaft und diese wiederum mit wenigstens einer Bewertungsgröße bzw. einem Indikator unterlegt, die zumeist Wertungsgruppen aufweisen. Für eine konsistente Verwendung der jeweiligen Abwägungskriterien und zur Nachvollziehbarkeit von Entscheidungswegen sind weitergehende Erläuterungen der elf Abwägungskriterien einschließlich sämtlicher bewertungsrelevanter Eigenschaften, Bewertungsgrößen/Indikatoren und Wertungsgruppen erforderlich.

Die im Vorhaben RESUS² (GRS 2019) erarbeiteten Definitionen und Erläuterungen der Abwägungskriterien der Anlagen 1 bis 11 zu § 24 StandAG sind in diesem Arbeitspaket berücksichtigt und auf die Empfehlung einer eventuellen Ergänzung oder Anpassung überprüft worden. Die Bewertungen der Bewertungsgrößen/Indikatoren durch ihre Wertungsgruppen werden diskutiert und die Problematik ihrer Abgrenzungen zueinander aufgezeigt.

² Grundlagenentwicklung für repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen und zur sicherheitsgerichteten Abwägung von Teilgebieten mit besonders günstigen geologischen Voraussetzungen für die sichere Endlagerung Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle (GRS 2019)

Zudem sind nicht sämtliche Begriffe im Gesetzestext eindeutig definiert (vergleiche § 2 StandAG), d. h. sie können unterschiedlich ausgelegt werden. In diesem Bericht werden die für die Anwendung der Abwägungskriterien relevanten unbestimmten Begriffe und Formulierungen identifiziert, die damit verbundenen Fragestellungen diskutiert und mögliche Handlungsoptionen zum Umgang mit diesen dargestellt.

Die Bewertungsgrößen/Indikatoren beschreiben zum Teil sehr spezielle Gesteinseigenschaften, die für die interessierenden Gesteinstypen in dem relevanten Teufenbereich mit aller Wahrscheinlichkeit bei den zuständigen Stellen der Länder und des Bundes nicht oder nur vereinzelt vorliegen. In Kenntnis dieser Tatsache räumt der Gesetzgeber in Anlage 1 des StandAG ausdrücklich ein, dass, solange die entsprechenden Indikatoren nicht standortspezifisch erhoben sind, für die Abwägung das jeweilige Wirtsgestein als Indikator verwendet werden kann. Bei den weiteren Kriterien lässt es der Gesetzgeber offen, wie konkret die Bewertungsgrößen/Indikatoren für die jeweiligen Bewertungen erfasst werden müssen. Für die Anwendung der Abwägungskriterien im Vorfeld der Standorterkundung, also ohne spezifische regionale Erhebung der Daten zu den Bewertungsgrößen/Indikatoren, werden im vorliegenden Bericht Vorschläge unterbreitet.

Für die einzelnen Bewertungsgrößen/Indikatoren werden im vorliegenden Bericht die zu ihrer Bewertung erforderlichen Informationen und Daten aufgezeigt und ggf. Vorschläge zur Generierung dieser Informationen erarbeitet. Es erfolgt ein Abgleich mit den bereits durchgeführten Anfragen des Vorhabenträgers bei den zuständigen Stellen des Bundes und der Länder zu den Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen, um Doppelungen bei möglichen zukünftigen Datenabfragen zu vermeiden. Dabei erfolgt der Abgleich ausschließlich auf Grundlage der Abfragen. Eine Einsichtnahme in die von den zuständigen Stellen gelieferten Daten erfolgte nicht.

Die Ergebnisse der Teilaufgaben A 8.1, A 8.2 und A 8.3 sind im Anhang 2 in einer Übersicht zusammenfassend dargestellt. Sie sollen den raschen Einblick in die gewonnenen Ergebnisse bieten und die Arbeitsgrundlage für den Umgang mit den Abwägungskriterien darstellen. Der Textteil des Berichts zu diesen Teilaufgaben umfasst die für das vertiefte Verständnis von Anhang 2 und der Nachvollziehbarkeit der Erkenntnisse und Ausführungen erforderlichen Informationen.

Im Weiteren wird der Umgang mit den Daten hinsichtlich eventuell erforderlicher Bearbeitungen oder Interpretation von Grunddaten zur Bewertung der Kriterien skizziert. Diese weiterführenden Überlegungen im Umgang mit den Daten ergeben sich aus den praktischen Fragen, wie die vorliegenden Informationen gesichtet und überprüft werden können, wie sich die Datenverteilung zur Anwendung der Abwägungskriterien auswirkt, wie eine Qualitätsprüfung der Daten vorgenommen werden kann und welche Anforderungen an die Datenaufbereitung gestellt werden sollten.

Neben dem Standortauswahlverfahren in Deutschland gibt es Erfahrungen und Anwendungen zur Suche von Endlagerstandorten im internationalen Raum, die für das Verfahren in Deutschland hilfreich sein können. Daher wurden zu Auswahlverfahren für Endlagerstandorte in anderen Staaten, insbesondere mit Blick auf die Vorgabe von Abwägungskriterien und deren Anwendung in einem Abwägungsprozess, umfangreiche Literaturrecherchen durchgeführt. Die Standortauswahlverfahren in ausgewählten Ländern mit vorangeschrittenen Entsorgungsprogrammen werden skizziert und die Besonderheiten der Auswahlverfahren hervorgehoben. Allein in der Schweiz wird ein mit dem deutschen Standortauswahlverfahren vergleichbares Verfahren unter der Anwendung eines Abwägungsprozesses durchgeführt.

2 Konkretisierung der Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien (A 7)

2.1 Definitionen und Erläuterungen zum Verständnis der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien (A 7.1)

Die Anwendung der geowissenschaftlichen Anwendungskriterien ist zur Beurteilung der geologischen Gesamtsituation notwendig. Die Nachvollziehbarkeit der Bewertung der Abwägungskriterien ist daher eng mit den geologischen Beschreibungen der Gebiete verknüpft. Diese Beschreibungen sollten alle notwendigen geowissenschaftlichen Informationen zur Bewertung der Abwägungskriterien enthalten, insbesondere folgende Angaben:

1. Räumliche Lage und Ausdehnung der Gebiete,
2. Begrenzung des Gebirgsbereiches, in dem der ewG liegen soll,
3. Gesteinstypen der Wirts- und Barrieregesteine.

zu 1. Nach Anwendung der Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen verbleiben Gebiete mit Vorkommen potenziell geeigneter Wirts-/Barrieregesteine. Auf diese Gebiete sind die Abwägungskriterien anzuwenden, z. B. für die Bewertung der Kriterien „Konfiguration der Gesteinskörper“ und „Räumliche Charakterisierbarkeit“.

zu 2. Die meisten bewertungsrelevanten Eigenschaften der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien beziehen sich auf den einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG). Nach StandAG ist der ewG 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. Zu Beginn des Auswahlverfahrens fehlen ausreichende Kenntnisse zur Festlegung der Ausdehnung eines ewG im Untergrund. Erst mit standortbezogenen Daten und Kenntnissen zum Endlagersystem kann an einem Standort der ewG festgelegt werden. Bis zur Festlegung des ewG wird im Verfahren der Gebirgsbereich bewertet, der den ewG aufnehmen soll. Dieser Gebirgsbereich muss aus charakteristischen barrierewirksamen Gesteinstypen aufgebaut und nach § 23 Abs. 5 Nr. 2 des StandAG mindestens 100 m mächtig³ sein.

zu 3. Gesteinstypen sind zusammengefasste Gesteinsfolgen im Gebirge, deren prägende bewertungsrelevante Eigenschaften räumlich abgrenzbare geologische Einheiten bilden („homogene Einheiten“). Die Genese der Gesteinsfolgen einer geologischen Einheit sollte sehr ähnlich sein.

Wirtsgestein ist der gesamte Gesteinskörper des Gesteinstyps, in dem die radioaktiven Abfälle eingelagert werden. Gemäß § 1 Abs. 3 StandAG sind dies Steinsalz, Tongestein und Kristallingestein. Es wird davon ausgegangen, dass der Gesetzgeber mit der Festlegung der möglichen Wirtsgesteine nicht nur die möglichen Gesteinstypen für die Einlagerung der Abfälle festlegen wollte, sondern auch die möglichen Gesteinstypen der geologischen Barrieren. Gemäß Begriffsbestimmungen in § 2 Nr. 7 StandAG sind geologische Barrieren geologische Einheiten, die eine Ausbreitung von Radionukliden be- oder verhindern.

Grundlage der Bearbeitung bilden u. a. die im Vorhaben RESUS (GRS 2019) aufgestellten Definitionen der Abwägungskriterien. Diese wurden mit Bearbeitungsstand Januar 2019 übernommen (Anhang 1) und im Zuge der Bearbeitung des Arbeitspakets auf Ergänzungs- oder Änderungsbedarf geprüft. Die aus dem StandAG abgeleiteten unbestimmten Begriffe und Formulierungen wurden erläutert. Dabei wurden auch die Definitionen aus RESUS herangezogen, um eine Konsistenz des vorliegenden Berichts mit den Arbeiten im Vorhaben RESUS zu gewährleisten. Im Rahmen der Bearbeitungen wurden die vorliegenden Definitionen der Indikatoren weitestgehend übernommen. Lediglich zu den Indikatoren 2.3a, 6.2a und 6.2b werden Empfehlungen zu sprachlichen Anpassungen der Definitionen gegeben. Anhang 1 des Berichts enthält die Definitionen und Erläuterungen der Indikatoren nach § 24 Anlagen 1 bis 11 StandAG, wie sie im Vorhaben RESUS mit Stand 31.01.2019 entwickelt werden.

³ Abweichende Anforderungen zum Wirtsgestein Kristallin siehe § 23

2.2 Handlungsoptionen zum Umgang mit unbestimmten Begriffen und Formulierungen (A 7.2)

Im Vorhaben RESUS (GRS 2019) werden die Kriterien der Anlagen 1 bis 11 des StandAG spezifisch für das Standortauswahlverfahren erläutert und die Indikatoren bzw. Bewertungsgrößen definiert. Beinhalten die gesetzlichen Bestimmungen unbestimmte Begriffe oder vage Formulierungen, so kann die Nachvollziehbarkeit von Bewertungen eingeschränkt sein.

Unbestimmte Begriffe/Formulierungen beziehen sich dabei auf die in den Anlagen 1 bis 11 des StandAG genannten bewertungsrelevanten Eigenschaften, die Bewertungsgrößen bzw. die Indikatoren sowie auf die Wertungsgruppen der jeweiligen Kriterien. Das StandAG nimmt die Zuordnung der Indikatoren zu Wertungsgruppen teilweise lediglich qualitativ mit Begriffen wie, „gering, deutlich, erheblich“ vor, nicht aber quantitativ. Im vorliegenden Bericht werden Lösungsvorschläge zum Umgang mit diesen Begriffen erarbeitet.

Die Nummerierung der Indikatoren erfolgt entsprechend der Anlagennummerierung im Gesetz. Die erste Ziffer entspricht der Anlagennummer des StandAG, die zweite Ziffer der bewertungsrelevanten Eigenschaft und die darauffolgenden Buchstaben beziehen sich auf die Bewertungsgröße bzw. den Indikator. Diese Nummerierung wird auch in Anhang 2 dieses Berichts verwendet.

2.2.1 Anlage 1 – Kriterium zur Bewertung des Transportes radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen im ewG

Unbestimmter Begriff: Verfestigungsgrad (betrifft Indikator 1.4b und Wertungsgruppe)

Definition entsprechend RESUS (GRS 2019): *„Der Verfestigungsgrad ist eine qualitative Bewertung für die Festigkeit von Tongestein und ist abhängig vom Grad der Kompaktion sowie diversen chemisch-mineralogischen Wechselwirkungen (z. B. Zementation).“*

Eine Abgrenzung innerhalb der Wertungsgruppe mit den Angaben Tonstein, fester Ton und halbfester Ton ist unbestimmt.

Der Indikator „Verfestigungsgrad“ wird neben der absoluten Porosität zur Einschätzung der Diffusionsgeschwindigkeit im Tongestein vorgegeben. Für Tongestein weisen Marzurek et al. (2008) auf einen empirischen Zusammenhang zwischen Porosität und dem effektiven Diffusionskoeffizienten hin. Mit zunehmendem Verfestigungsgrad nimmt die Porosität generell ab und damit auch der effektive Diffusionskoeffizient des Gesteins.

Handlungsoption:

Problematisch kann die Zuordnung von Tongesteinen zu den Wertungsgruppen sein, wenn zum Verfestigungsgrad keine eindeutigen Angaben vorliegen und die Gesteinscharakterisierung eine Zuordnung zu zwei Wertungsgruppen (z. B. Tonstein / fester Ton) zulässt. Im Umgang mit dem Begriff „Verfestigungsgrad“ sollte in diesen Fällen eine vergleichende Anwendung des Indikators zwischen den betrachteten Tongesteinen erfolgen. Grundlage hierfür sollten bekannte Tongesteine sein, für die zuverlässige einschlägige Bewertungen vorliegen. Diese dienen als Referenz und sollen die auf die zu bewertenden Tongesteine übertragen werden, sofern eine Übertragbarkeit begründet werden kann.

2.2.2 Anlage 2 – Kriterium zur Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper

Unbestimmter Begriff: Barrierenmächtigkeit (betrifft Indikator 2.1a)

Definition entsprechend RESUS (GRS 2019): „*Unter Barrierenmächtigkeit wird in den Fällen, in denen der Einlagerungsbereich innerhalb des Barrieregesteins liegt, der kleinste Abstand zwischen dem Einlagerungsbereich und dem Rand des Barrieregesteins verstanden, wobei diejenige Positionierung des Einlagerungsbereichs im Barrieregestein unterstellt wird, die diese Barrierenmächtigkeit maximiert. Der Einlagerungsbereich wird in seiner vertikalen Ausdehnung nicht berücksichtigt. Für den Fall, dass der ewG den Einlagerungsbereich überlagert, wird die gesamte Mächtigkeit des Barrieregesteins im Hangenden des Einlagerungsbereichs betrachtet.*“

Der Begriff „Barrierenmächtigkeit“ bezieht sich auf die barrierewirksamen Gesteine des Gebirgsbereichs, der den ewG aufnehmen soll und knüpft somit an die Mindestanforderung „Mächtigkeit des ewG“ (§ 23 Abs. 5 Nr. 2) an. Unter „Barrierenmächtigkeit“ wird in Anlehnung an die Begriffsbestimmungen in § 2 StandAG die Mächtigkeit der geologischen Einheiten verstanden, die eine Ausbreitung von Radionukliden be- oder verhindern.

Handlungsoption:

Es wird empfohlen, die Definition von RESUS zu übernehmen.

Es wird die folgende Auslegung der Bewertungsgröße vorgeschlagen: Für die Bewertungsgröße „Barrierenmächtigkeit“ ist die bereits für die Anwendung der Mindestanforderung definierte Mächtigkeit des Gebirgsbereiches, der den einschlusswirksamen Gebirgsbereich aufnehmen soll, anzunehmen.

Unbestimmte Formulierung: Grad der Umschließung (betrifft Indikator 2.1b und Wertungsgruppe)

Definition entsprechend RESUS (GRS 2019): „*Der Grad der Umschließung des Einlagerungsbereichs durch den ewG ist eine Bewertung der geologischen Konfiguration dahingehend, ob entweder der Einlagerungsbereich Bestandteil des ewG ist, oder ob der Einlagerungsbereich außerhalb des ewG liegt.*“

Der „Grad der Umschließung“ ist vollständig, wenn der einschlusswirksame Gebirgsbereich Teil eines Wirtsgesteinskörpers ist und den Einlagerungsbereich vollständig umschließt. Für den Fall eines überlagernden ewG und einer demzufolge unvollständigen Umschließung können beide Wertungsgruppen bedingt günstig und weniger günstig zutreffen.

Die Wertungsgruppen unterscheiden vollständige Umschließung, unvollständige Umschließung (kleinere Fehlstellen in unkritischer Position) und unvollständige Umschließung (größere Fehlstellen in kritischer Position). Im Rahmen der Anwendung von § 24 Abs. 3 wird der Begriff „Fehlstelle“ in Bezug auf die hydraulischen Eigenschaften der Gesteinstypen verstanden.

Handlungsoption:

Es wird empfohlen, die Definition von RESUS zu übernehmen.

Für die Wertungsgruppen „bedingt günstig“ und „weniger günstig“ sollte der Begriff „Fehlstellen“ auf die hydrogeologischen Eigenschaften des ewG insbesondere hinsichtlich des Radionuklidtransports bezogen werden. Die Bewertung, ob Fehlstellen in kritischer oder unkritischer Position vorliegen, sollte auf Grundlage von Sicherheitsbetrachtungen erfolgen.

Unbestimmte Formulierung: Teufe der oberen Begrenzung des erforderlichen ewG (betrifft Indikator 2.2a)

Definition entsprechend RESUS (GRS 2019): „*Die Teufe der oberen Begrenzung des ewG ist der minimale Abstand des äußeren oberen Randes des ewG zur Geländeoberfläche.*“

Für die begründete Festlegung der „Teufe der oberen Begrenzung des erforderlichen ewG“ sind für Gesteine, die einen Transport zulassen, Modellberechnungen zur Barrierewirkung der unversehrten Barriere notwendig.

In Bezug auf die Ausweisung von Teilgebieten kann nicht zwischen ewG und erforderlichem ewG unterschieden werden. Erst Modellberechnungen für einen Standort mit einem konkreten Sicherheitskonzept, welches die Teufe des Einlagerungsbereiches beinhaltet, ermöglichen die Festlegung eines erforderlichen ewG, im Sinne von der minimalen Größe des ewG.

Handlungsoption:

Es wird empfohlen, die Definition von RESUS zu übernehmen.

Liegen die für die rechnerische Ableitung notwendigen Daten vor, kann entsprechend der Definition von RESUS der Indikator bewertet werden, sofern die Teufe des Einlagerungsbereiches festgelegt wurde.

Für die Anwendung des Indikators ohne Modellberechnungen ist die Festlegung der Teufe des Einlagerungsbereiches ebenfalls unerlässlich. Zusätzlich ist eine Begrenzung für den ewG im entsprechenden Gebirgsbereich festzulegen. In Analogie zum Indikator „Barrierenmächtigkeit“ sollte der Rand der barrierewirksamen Gesteine (Gesteinsformation) als Bewertungsgrundlage verwendet werden.

Unbestimmte Formulierung: flächenhafte Ausdehnung (betrifft Indikator 2.3a)

Definition entsprechend RESUS (GRS 2019): *„Die flächenhafte Ausdehnung ist das Verhältnis aus horizontaler Querschnittsfläche des Barrieregesteins und der Fläche des Endlagers.“*

Als Fläche des Endlagers ist analog zu dem in den Begründungen zum § 23 Abs. 5 Nr. 4 StandAG (Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“) angegebene Flächenbedarf zu unterstellen: Für das Wirtsgestein Steinsalz ein Flächenbedarf von 3 km², für das Wirtsgestein Tongestein 10 km² und für das Wirtsgestein Kristallingestein 6 km².“

Der Flächenbedarf des Endlagers ist Bezugsgröße für diesen Indikator beziehungsweise diese Bewertungsgröße. Die flächenhafte Ausdehnung wird als ein Vielfaches des Mindestflächenbedarfs angesehen. Grundlage für die Anwendung des Indikators „Flächenhafte Ausdehnung“ der barrierewirksamen Gesteine sind die in der Gesetzesbegründung zu § 23 Abs. 5 Nr. 4 StandAG vorgeschlagenen Mindestflächenbedarfe für die Wirtsgesteine (s. o.).

Handlungsoption:

Es wird empfohlen, eine von RESUS abweichende Definition zu benutzen (s. u.). Es handelt sich um eine sprachliche Anpassung, weil gemäß der Definition in RESUS (GRS 2019) eine flächenhafte Ausdehnung die Dimension eine Fläche erwarten lässt. Die Division zweier Flächen ist hingegen dimensionslos. Aus diesem Grund erfolgt die Anpassung der RESUS-Definition wie folgt: Die Bewertung der „flächenhaften Ausdehnung“ ergibt sich aus dem Verhältnis von horizontaler Querschnittsfläche des Barrieregesteins zu der Fläche des Endlagers.

Unbestimmter Begriff: unmittelbare Nachbarschaft/Nähe (betrifft bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums 2.4 und Wertungsgruppe)

RESUS (GRS 2019) gibt für diesen unbestimmten Begriff keine Definition. Der entsprechende Indikator „Gesteinsschichten mit Möglichkeit zur Induzierung beziehungsweise Verstärkung der Grundwasserbewegung im ewG“ wird wie folgt definiert: „Dieser Indikator ist eine qualitative Bewertung für Tongestein, ob wasserleitende Schichten in unmittelbarer Nähe des ewG bzw. des Wirtsgesteinskörpers existieren, die zum ewG eine hohe Potenzialdifferenz aufweisen oder aufbauen können.“

Die Formulierung „wasserleitende Schichten in unmittelbarer Nähe“ schränkt eine nachvollziehbare Bewertung dieser bewertungsrelevanten Eigenschaft von Tongestein ein. Der Indikator „Potentialbringer“ wird zur Einschätzung der Grundwasserbewegung im Tongestein abgefragt, mit der Fragestellung, ob eine Schicht mit den zu betrachtenden Eigenschaften in „unmittelbarer“ Nachbarschaft zum ewG/Wirtsgesteinskörper vorhanden ist.

Handlungsoption:

Der Gesetzgeber verwendet den Begriff „unmittelbare Nähe“ in der Beschreibung der bewertungsrelevanten Eigenschaft des Kriteriums. In der Beschreibung der Wertungsgruppen hingegen wird der Begriff „unmittelbare Nachbarschaft“ verwendet, welcher engeräumiger zu verstehen ist, im Sinne von „unmittelbar angrenzend“ und somit ohne vermittelnde Übergänge.

Der Begriff „unmittelbar“ erfordert dementsprechend die Kenntnis und Bewertung der direkt an den ewG anschließenden Gesteinskörper (Gesteinstyp). Bis zur Festlegung des ewG sollte im Verfahren als Bezug für „unmittelbar“ der Gebirgsbereich zugrunde gelegt werden, der den ewG aufnehmen soll. Bei der Anwendung des Indikators wird empfohlen, zunächst zu prüfen, ob Grundwasserleiter als mögliche Potentialbringer in unmittelbarer Nachbarschaft zum ewG/Wirtsgestein vorhanden sind. Als Grundwasserleiter werden nach Ad-Hoc-Arbeitsgruppe Hydrogeologie (1997) Gesteinskörper verstanden, die eine Durchlässigkeit größer als $k_f = 10^{-5}$ m/s aufweisen.

2.2.3 Anlage 3 – Kriterium zur Bewertung der räumlichen Charakterisierbarkeit

Unbestimmter Begriff: geringe/deutliche/erhebliche Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen (betrifft Indikator 3.1a und Wertungsgruppe)

Definition entsprechend RESUS (GRS 2019): *Die Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen ist eine Bewertung der Spannbreite bzw. Ermittelbarkeit der für die Abwägung relevanten Eigenschaften im vorgesehenen ewG oder im Einlagerungsbereich.*

Der Begriff „Variationsbreite“ wurde im Abschlussbericht der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfälle (EL-KOM 2016) eingeführt, aber nicht definiert. Im Allgemeinen wird der Begriff „Variationsbreite“ als Spannweite einer Verteilung (Differenz von größtem und kleinstem Wert) definiert. Da diese bei unterschiedlichen Eigenschaften der Gesteinstypen jedoch deutlich unterschiedliche Größenordnungen erreichen kann (z. B. sehr kleine Werte bei Diffusionskoeffizienten, große Werte bei Mächtigkeit), ist die Variationsbreite nur in Verbindung mit der jeweiligen Eigenschaft der Gesteinstypen zu bewerten und erfordert somit eine Normierung auf die physikalisch mögliche Spannweite der betrachteten Eigenschaft (im Sinne eines Variationskoeffizienten).

Handlungsoption:

Es wird empfohlen, die Definition von RESUS zu übernehmen.

Die Variationsbreite ist bezogen auf die Eigenschaften der Gesteinstypen entsprechend der Anlagen 1-2, 5-11 StandAG sowie der in § 23 StandAG genannten Mindestanforderungen zu ermitteln.

Quantitative Aussagen zur Variationsbreite der jeweiligen Eigenschaft von Gesteinstypen sind im Vergleich von Teilgebieten möglich. Die Zuordnung zu „geringer/deutlicher/erheblicher“ Variationsbreite sind über Erfahrungswerte abzuleiten. Hierbei muss auf die entsprechenden Größenordnungen der Werte (Skalierung) geachtet werden.

Unbestimmter Begriff: Fazies (regional einheitlich – nach bekanntem Muster wechselnd – nach nicht bekanntem Muster wechselnd) (betrifft Indikator 3.2a und Wertungsgruppe)

Definition entsprechend RESUS (GRS 2019): *Dieser Indikator bewertet den Grad der Homogenität und die räumliche Charakterisierbarkeit der Gesteinsausbildung im vorgesehenen ewG. Als Gesteinsausbildung bzw. Gesteinsfazies werden alle Eigenschaften eines Gesteins verstanden.*

Die Gesteinszusammensetzung, also die Gesteinskomponenten (qualitative und quantitative Zusammensetzung) und das Gesteinsgefüge (Größe, Gestalt und räumliche Anordnung der Gemengeteile) sowie die Matrix- und/oder Zementausbildung werden als Lithofazies zusammengefasst. Hinzu kommen Aussagen zur Alteration und Diagenese des Gesteins sowie zu strukturellen Merkmalen.

Handlungsoption:

Es wird empfohlen, die Definition des Indikators Gesteinsfazies von RESUS zu übernehmen.

Aussagen zur Faziesverteilung (regional einheitlich – nach bekanntem Muster wechselnd – nach nicht bekanntem Muster wechselnd) sind nur durch eine relative Betrachtungsweise möglich. Hierbei muss auf die Einteilung der Abgrenzung und die Skalierung geachtet werden. Eine abschließende Spezifizierung ist erst nach Kenntnis des Gesteinstyps des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und gegebenenfalls des Wirtsgesteins möglich.

2.2.4 Anlage 4 – Kriterium zur Bewertung der langfristigen Stabilität der günstigen Definition

Unbestimmte Formulierung: keine wesentliche Änderung (betrifft Indikator 4.1)

Die unbestimmte Formulierung „keine wesentliche Änderung“ ist in RESUS (GRS 2019) nicht definiert. Diese bezieht sich auf die Betrachtungsmerkmale „Mächtigkeit“, „Ausdehnung“ und „Gebirgsdurchlässigkeit“.

Die langfristige Stabilität der günstigen Verhältnisse des ewG in der Vergangenheit begünstigen die Prognostizierbarkeit der Veränderungen von günstigen Verhältnissen. Günstige Verhältnisse werden durch die Merkmale Mächtigkeit, Ausdehnung und Gebirgsdurchlässigkeit charakterisiert, bei denen „keine wesentliche Änderung“ aufgetreten sein soll.

Hypothese: Ein Teilgebiet kann nur günstig sein, wenn die Merkmale Mächtigkeit, Ausdehnung und Gebirgsdurchlässigkeit (vgl. Anlage 1, 2) als günstig bewertet werden. Es wird vorgeschlagen, dass eine wesentliche Änderung entsprechend Anlage 4 dann gegeben ist, wenn Prozesse in der Vergangenheit die zu betrachtenden Merkmale so verändert haben, dass diese nicht mehr als günstig zu prognostizieren sind. Die Prozesse dürfen nicht so stark sein, dass sich die jeweilige Einstufung in die Wertungsgruppe ändert.

Handlungsoption:

Zur Bestimmung der relevanten Veränderungen der Merkmale Mächtigkeit, Ausdehnung und Gebirgsdurchlässigkeit über 10 Mio. Jahre, von 1-10 Mio. Jahre, <1 Mio. Jahre sind Genesemodelle für die Gesteinstypen des ewG zu erstellen. Daraus ist abzuleiten, ob wesentliche Änderungen der bewertungsrelevanten Merkmale entstehen können.

2.2.5 Anlage 5 – Kriterium zur Bewertung der günstigen gebirgsmechanischen Eigenschaften

Unbestimmte Formulierung: verträgliche Deformationen (betrifft Indikator 5.1a)

Definition entsprechend RESUS (GRS 2019): *Mit dem Indikator wird die Festigkeit des Wirtsgesteins in Relation zu den durch die Auffahrung verursachten Spannungen und damit zur Teufe bewertet.*

Der Grad der Deformation ist abhängig vom Wirtsgesteinstyp. Demzufolge sind keine allgemeingültigen Angaben zur Quantifizierung einer „verträglichen Deformation“ im ewG möglich.

Das Gebirge wird als Haupttragelement angesehen, wenn von ihm die Beanspruchung aus Auffahrung und Betrieb ohne planmäßigen tragenden Ausbau bei verträglichen Deformationen aufgenommen werden kann (abgesehen von einer Kontursicherung, z. B. Anker - Maschendraht).

Handlungsoption:

Es wird empfohlen, die Definition von RESUS zu übernehmen.

Die Quantifizierung einer „verträglichen Deformation“ ist erst nach Kenntnis des Wirtsgesteinstyps möglich. Insbesondere in einer frühen Phase des Auswahlverfahrens wird empfohlen, die Diagramme nach AkEnd zur materialeigenschaftenbezogenen Differenzierung für Gesteine mit gering bis nicht kriechfähigem Materialverhalten und für Gesteine mit ausgeprägt kriechfähigem Materialverhalten heranzuziehen (AkEnd 2002, Abb. 4.9 und 4.10). Es können aus diesen Diagrammen geeignete maximale Endlagerteufen in Abhängigkeit von der Gebirgsdruckfestigkeit für Festgesteine mit nicht bis gering kriechfähigem (duktilen) Materialverhalten abgeleitet werden.

Für eine differenziertere Bewertung wird die Erstellung eines Endlagerkonzeptes für das Teilgebiet empfohlen, in dem Möglichkeiten der planmäßigen Beschränkung der Gebirgsentfestigung und Gebirgsauflockerung auf den konturnahen Bereich beschrieben werden.

In einem Teilgebiet könnten bei Berücksichtigung der Materialeigenschaften relative Bewertungen für unterschiedliche Teufen erfolgen.

Erfahrungen aus der Auffahrung von Hohlräumen, wie sie z. B. bei Tunnelbauten, sollten zur Bestimmung von Gebirgsdruckfestigkeiten herangezogen werden.

Unbestimmte Formulierung: mechanisch bedingte Sekundärpermeabilität (betrifft Indikator 5.1b)

Definition entsprechend RESUS (GRS 2019): *Mit dem Indikator werden die Dilatanzfestigkeiten (Zug- und Scherfestigkeit) des Wirtsgesteins als Maß für die Neigung zur Bildung von Wegsamkeiten im ewG bewertet.*

Während konturnahe Gebirgsauflockerungen generell zu erwarten sind, können konturfernere Gebirgsauflockerungen/Rissbildungen nicht grundsätzlich ausgeschlossen werden. Eine konturnahe und vertretbare Entfestigungs-/Auflockerungszone ist gegeben, wenn diese grundsätzlich auf einige wenige Meter Stoßtiefe begrenzt bleibt. Sekundärpermeabilitäten außerhalb dieser konturnahen Saumzone sind bei entsprechenden ungünstigen Bedingungen (z. B. Geometrie Grubengebäude, Materialeigenschaften, Lasten) zu erwarten.

„Sekundärpermeabilität“ ist insbesondere die Erhöhung der ursprünglichen Permeabilität der barrierewirksamen Gesteine im konturnahen Bereich der Endlager Hohlräume infolge der Beanspruchung durch Auffahrung und Betrieb des Endlagers.

Die Neigung zur Bildung von „mechanisch bedingter Sekundärpermeabilität“ ist abhängig von den Materialeigenschaften der barrierewirksamen Gesteine.

Handlungsoption:

Es wird empfohlen, die Definition von RESUS (GRS 2019) zu übernehmen.

Erfahrungen aus der Auffahrung von Hohlräumen, aus Bohrtätigkeiten inkl. hydraulischer Stimulation sowie aus Laboruntersuchungen sollten zur Abschätzung der Bildung von Sekundärpermeabilitäten herangezogen werden.

2.2.6 Anlage 6 – Kriterium zur Bewertung der Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten

Unbestimmter Begriff: Gebirgsformation (betrifft Indikator 6.1b)

Der unbestimmte Begriff „Gebirgsformation“ ist in RESUS (GRS 2019) nicht definiert.

In Analogie zum Begriff „Gebirgsformation“ im § 23 Abs. 5 Nr. 2 StandAG wird hier der Ausdruck Gebirge im bergmännischen Sinn gedeutet, als eine allgemeine Bezeichnung für eine Gesteinsabfolge des Untergrundes. Im geologischen Sinne versteht man unter einer Formation eine leicht identifizierbare und in einer geologischen Karte gut darstellbare Gesteinseinheit, die zur genaueren Beschreibung und Untergliederung der Gesteinsabfolge

in einer Region dient. Die Verwendung des Begriffes „Gebirgsformation“ im Gesetz könnte suggerieren, dass die genannten Erfahrungen für genau die Formation, in welcher der ewG liegen soll, abgefragt werden. Im Gegensatz dazu sind in den Wertungsgruppen auch Erfahrungen zu dem Gesteinstyp zulässig. In der Erläuterung der Wertungsgruppe zum Indikator 6.1b werden die Begriffe „Gebirgsformation/Gesteinstyp“ durch einen Schrägstrich getrennt. Es bleibt somit offen, ob es sich um eine Verbindung im Sinne einer Gleichartigkeit beider Begriffe oder um eine Aufzählung von Alternativen handelt. Der Begriff „Gebirgsformation“ wird im StandAG nicht weiterverwendet.

Handlungsoption:

Es wird empfohlen, anhand von Erfahrungen sowohl die relevanten Formationen als auch die Gesteinstypen im Hinblick auf ihre Barrierewirksamkeit einzuschätzen. Somit werden Erfahrungen zur Barrierewirksamkeit des jeweiligen Gesteinstyps oder der Gebirgsformationen berücksichtigt, die auch außerhalb des zu bewertenden Gebietes gemacht wurden. Dies entspricht auch der Formulierung unmittelbar/mittelbar in der Wertungsgruppe. Synonym für „Gebirgsformation“ kann der Begriff „Formation“ verwendet werden.

Unbestimmte Formulierung: dynamische Beanspruchung (geogen und technogen) (betrifft Indikator 6.1b und Wertungsgruppe)

Die unbestimmte Formulierung ist in RESUS (GRS 2019) nicht definiert.

„Dynamische Beanspruchungen“ der Gebirgsformation resultieren aus sich verändernden äußeren Kräften. Diese können durch natürliche Vorgänge (z. B. Be- und Entlastung) oder anthropogen induzierte geogene und technogene Einwirkungen (z. B. Änderung der Temperatur) hervorgerufen werden. Für die Abwägung im Rahmen des StandAG werden die anthropogen induzierten Einwirkungen bewertet.

Lux (2002) beschreibt die geogenen und technogenen Einwirkungen als Lasten (Beanspruchungen), denen das Gebirge (Tragwerk) nach einer Hohlraumauffahrung (der Standzeit) widerstehen muss.

Nach Lux (2002) wird eine geogene Einwirkung nach einer Hohlraumauffahrung im Wirtsgestein durch die auffahrungsbedingt aktivierten Spannungsumlagerungen an der Hohlraumkontur beschrieben. Weitere geogene Einwirkungen sind nicht relevant, weil die zu bewertende Gebirgsformation/der Gesteinstyp keines der Ausschlusskriterien nach § 22 Abs. 2 Nr. 1 bis 5 erfüllen darf.

Technogene Einwirkungen sind die mechanischen Lasten, die zusätzlich zu den geogenen Einwirkungen (Spannungsumlagerungen infolge Hohlraumauflagerung) im Wirtsgestein aus den thermischen Lasten, insbesondere aus den Temperaturänderungen infolge der Einbringung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle oder durch Austrocknung, resultieren.

Handlungsoption:

Für eine Einschätzung der „dynamischen Beanspruchungen“ sollten geogene und technogene Einwirkungen entsprechend der Ausführung von Lux (2002) verwendet werden.

Unbestimmter Begriff: Riss (betrifft Indikator 6.2a und b und Wertungsgruppe)

Definition entsprechend RESUS (GRS 2019): *„Dabei werden unter Rissen infolge technogener Einwirkungen entstandene Trennflächen verstanden, im Gegensatz zu durch geogene Einwirkungen entstandenen Klüften.“*

Nach dieser Definition wird hier die Ausprägung der Auflockerungszone (ALZ) im Endlagerbergwerk bewertet. Die ALZ ist Teil des Einlagerungsbereiches, nicht des ewG.

Handlungsoption:

Es wird empfohlen, die RESUS-Definition anzupassen. Es handelt sich um eine sprachliche Anpassung, weil gemäß dem Indikator 6.1b unter geogenen und technogenen Einwirkungen anthropogen induzierte Einwirkungen verstanden werden. Da geogene Einwirkungen auch natürliche Einwirkungen beinhalten können, wird hier folgende Formulierung empfohlen: Dabei werden unter „Rissen“ Trennflächen verstanden, die infolge bergbaulicher Einwirkungen entstanden sind, im Gegensatz zu den durch natürliche geogene Einwirkungen entstandenen Klüften.

Unbestimmte Formulierung: Bewertung überwiegend (betrifft Wertungsgruppe zu 6.3)

Die unbestimmte Formulierung wird in RESUS (GRS 2019) nicht aufgegriffen.

Es werden keine Angaben zur methodischen Aggregation wie z. B. einer Wichtung der Indikatoren der Anlage 6 gegeben, um zu der Einschätzung der Bewertung in überwiegend „günstig“, überwiegend „bedingt günstig“ und überwiegend „weniger günstig“ zu kommen.

Handlungsoption:

Es wird empfohlen, bei der zusammenfassenden Beurteilung wie folgt vorzugehen: Bei einer größeren Anzahl (drei von fünf günstigen Indikatoren) der „günstigen“ Einstufungen ist die zusammenfassende Beurteilung als „überwiegend“ günstig zu bewerten. Bei gleicher Anzahl

der gleichwertigen Einstufungen ist die ungünstigere Einstufung zu wählen. Hinsichtlich der Wichtung der einzelnen Indikatoren wird von gleichen Wichtungen ausgegangen. Im Zuge des Abwägungsprozesses kann davon abgewichen werden (lernendes Verfahren).

2.2.7 Anlage 7 – Kriterium zur Bewertung der Gasbildung

Unbestimmte Begriffe: Wasserangebot, trocken, feucht (betrifft Indikator 7.1a und Wertungsgruppe)

Definition entsprechend RESUS (GRS 2019): *„Der Begriff „Wasserangebot im Einlagerungsbereich“ fasst die Menge des in einem Einlagerungsbereich vorhandenen und aus dem Wirtsgestein stammenden Wassers und die Rate, mit der Wasser aus dem Wirtsgestein in einen Einlagerungsbereich zutreten könnte, zusammen.“*

Zur Bewertung des Indikators ist zwischen den Zuständen „feucht“ und „trocken“ im Einlagerungsbereich zu unterscheiden. Eine messbare allgemeingültige Abgrenzung, ab welcher zwischen „feucht“ und „trocken“ unterschieden werden kann, gibt es nicht.

Eine Definition hierzu gibt der AkEnd (2002). Demnach ist ein Gestein „feucht“, wenn so viel Wasser zu Verfügung steht, dass Korrosion stattfinden kann. Diese Begriffsdefinition ist damit abhängig von der Menge der eingebrachten korrodierbaren Materialien und kann somit verlässlich nach Vorlage weiterer konzeptueller Planungen gefasst werden (Behälterkonzept, Verfüllkonzept).

Im StandAG werden keine Erläuterungen zu den Begriffen „trocken“ und „feucht“ gegeben.

Handlungsoption:

Es wird empfohlen, die Definition nach RESUS für den Begriff „Wasserangebot“ anzuwenden. Zusätzlich sind die in AkEnd (2002) zu findenden Definitionen zu trocken und feucht zu verwenden.

2.2.8 Anlage 8 – Kriterium zur Bewertung der Temperaturverträglichkeit

Unbestimmte Formulierung: wärmeinduzierte Sekundärpermeabilität (betrifft Indikator 8.1a)

Definition entsprechend RESUS (GRS 2019): *Der Indikator bewertet die mechanische Festigkeit der Gesteine im Endlagerbereich gegenüber auftretenden thermomechanischen Spannungen.*

Die Neigung zur Bildung von „wärmeinduzierter Sekundärpermeabilität“ ist abhängig von den Materialeigenschaften der barrierewirksamen Gesteine.

Die Wärmeausbreitung im Endlagerbereich ist insbesondere durch die Wärmeleitfähigkeit von Gesteinsformationen (konduktiv) und den Transport in einem strömenden Medium (konvektiv) bestimmt. Zur Erfassung der betroffenen Gesteinsformationen ist eine numerische Modellierung der Entwicklung des Temperaturfeldes erforderlich. Hinweise auf Grundlagen für die Modellierung oder auf die zu berücksichtigenden Erfahrungswerte gibt das StandAG nicht. Die für die quantitative Beschreibung und Beurteilung wärmeinduzierter Sekundärpermeabilitäten erforderlichen Daten sind nur mit erheblichem Aufwand zu bestimmen. Messungen standortspezifischer Daten sind nach § 16 Abs. 2 StandAG jedoch erst zu einem späteren Zeitpunkt vorgesehen.

Handlungsoption:

Es wird empfohlen, unter „wärmeinduzierter Sekundärpermeabilität“ die Erhöhung der ursprünglichen Permeabilität der Wirtsgesteine infolge der Beanspruchung durch die Einbringung thermischer Lasten zu verstehen.

In Anlehnung an Jentzsch (2002) wird empfohlen, sich bei vorläufigen Beurteilungen der Temperaturverträglichkeit nicht auf standortspezifische Messergebnisse, sondern auf die erfahrungsbasierte Einschätzung anhand des Gesteinstyps, zu stützen. Diese Erfahrung beruht auf Laborexperimenten, Großversuchen und auf Modelluntersuchungen.

2.2.9 Anlage 9 – Kriterium zur Bewertung des Rückhaltevermögens im ewG

Unbestimmte Formulierung: möglichst hoher Gehalt an Mineralphasen, hohe Ionenstärke des Grundwassers (betrifft Indikator 9.1b und 9.1c)

Die unbestimmte Formulierung wird in RESUS (GRS 2019) nicht aufgegriffen.

In den Anforderungen des StandAG werden keine quantifizierenden Erläuterungen dieser Formulierung gegeben.

Handlungsoption:

„Möglichst hoch“ bedeutet: Im oberen Bereich, z. B. oberhalb des 0,75-Quartils der üblicherweise oder erfahrungsgemäß in den betrachteten Gesteinen zu erwartenden Werte.

Folgender Umgang mit dem Begriff wird empfohlen:

- Ableiten der zu erwartenden Werte für die günstigen Eigenschaften für die zu betrachtenden Gesteinstypen (überregional),

- Abschätzen der Gehalte an relevanten Mineralphasen in den Gesteinen sowie der Ionenstärke des Grundwassers im Teilgebiet,
- Abgleich der abgeschätzten Werte des Teilgebietes mit den zu erwartenden Werten.

2.2.10 Anlage 10 – Kriterium zur Bewertung der hydrochemischen Verhältnisse

Unbestimmte Formulierung: möglichst geringer Gehalt an / geringe Karbonatkonzentration (betrifft Indikator 10.1d und 10.1e)

Die unbestimmte Formulierung wird in RESUS (GRS 2019) nicht aufgegriffen.

In den Anforderungen des StandAG werden keine quantifizierenden Erläuterungen dieser Formulierungen gegeben.

Handlungsoption:

„Möglichst gering“ bedeutet: möglichst unterhalb der üblicherweise oder erfahrungsgemäß in den betrachteten Tiefenwässern zu erwartenden Werten.

Folgender Umgang mit dem Begriff wird empfohlen:

- Ableiten der erforderlichen Werte für die Einschätzung der günstigen Eigenschaften der zu betrachtenden Tiefenwässer (überregional),
- Abschätzen der Gehalte an Kolloiden und Komplexbildnern sowie der Karbonatkonzentration im Tiefenwasser im Teilgebiet,
- Abgleich der abgeschätzten Werte des Teilgebietes mit den erforderlichen Werten.

2.2.11 Anlage 11 – Kriterium zur Bewertung des Schutzes des ewG durch das Deckgebirge

Unbestimmte Formulierung: grundwasserhemmende Gesteine (Indikator 11.1a)

Definition entsprechend RESUS (GRS 2019): *Der Indikator bewertet qualitativ die Mächtigkeit und die räumliche Verbreitung grundwasserhemmender Gesteine im Deckgebirge. Der Begriff „grundwasserhemmend“ wird im Folgenden mit dem Begriff geringleitend gleichgesetzt.*

In den Anforderungen des StandAG werden keine quantifizierenden Erläuterungen dieser Begriffe gegeben. In EL-KOM (2016) wird im Zusammenhang mit der Anlage 11 „grundwasserhemmend“ wie folgt definiert: Als „grundwasserhemmend“ (und zugleich

subrosionshemmend) werden hier vereinfachend nichtsalinare Gesteinstypen mit geringer Gebirgsdurchlässigkeit aufgefasst (Geringleiter/Nichtleiter). Die Einschränkung der EL-KOM (2016) auf nicht salinare Gesteinstypen steht im Widerspruch zur Begriffsbestimmung Deckgebirge in § 2 StandAG. In der Konsequenz muss daher der Formulierung „grundwasserhemmend“ für alle Gesteinstypen mit geringer Gebirgsdurchlässigkeit angewandt werden. Dies entspricht ebenfalls der in DIN 4049-3:1994-10 gegebenen Definition, bei der unter Grundwasserhemmer/Grundwassergeringleiter ein Gesteinskörper zu verstehen ist, der im Vergleich zu einem benachbarten Gesteinskörper gering wasserdurchlässig ist.

In der hydrogeologischen Kartieranleitung (Ad-hoc-Arbeitsgruppe Hydrogeologie 1997) werden quantitative Werte zur Abgrenzung zwischen Grundwassergeringleiter und Grundwasserleiter angegeben. Die Grenze zwischen Grundwasserleiter und Grundwassergeringleiter liegt bei einem k_f -Wert von $1 \cdot 10^{-5}$ m/s.

Handlungsoption:

Es wird empfohlen, die Definition von RESUS zu übernehmen.

Demnach sind „grundwasserhemmende Gesteine“ als Grundwassergeringleiter zu verstehen. Die Abgrenzung „grundwasserhemmender Gesteine“ zu Grundwasserleitern liegt bei einem k_f -Wert $> 1 \cdot 10^{-5}$ m/s.

3 Konkretisierung der Arbeitsschritte für die Konzeptentwicklung (A 8)

Die Aufgabe A 8 gliedert sich in sechs Teilaufgaben. Die beiden Teilaufgaben A 8.1 „Ermittlung der zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien erforderlichen geowissenschaftlichen Informationen/Daten“ und A 8.3 „Aufzeigen alternativer Möglichkeiten für die Bestimmung von Bewertungsgrößen/Indikatoren“ wurden weitgehend parallel bearbeitet, da sie in engem fachlichen Zusammenhang stehen. Die Teilaufgabe A 8.2 stellt den Zusammenhang zwischen den von der BGE bereits durchgeführten Datenabfragen und den erforderlichen Informationen für die Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien (AWK) her. Die folgenden Kapitel dienen im Wesentlichen der Erläuterung und zum besseren Verständnis der abgeleiteten und in Anhang 2 (Zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse zu den Teilaufgaben A 8.1, A 8.2 und A 8.3) zusammengestellten Informationen.

Auf die Abfragen zu den Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen (BGE 2018a, 2018b) hat die BGE von den zuständigen Behörden des Bundes und der Länder Daten zur Anwendung der Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen erhalten. Eine Einsichtnahme in diese bei der BGE vorliegenden Daten erfolgte seitens BGR nicht.

Die erforderlichen geowissenschaftlichen Informationen und Daten, die zur Anwendung der Bewertungsgrößen/Indikatoren der Anlagen 1 bis 11 zum § 24 StandAG notwendig sind, wurden daher unabhängig von den bei der BGE vorliegenden Informationen ermittelt und zusammengestellt. Es erfolgte ein Abgleich der erforderlichen Daten mit den von der BGE durchgeführten Datenabfragen zu den Ausschlusskriterien und den Mindestanforderungen. Ziel dieses Abgleichs war es, eine Übersicht der Informationen und Daten zu erhalten, die zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien zusätzlich zu den bereits durch BGE erhobenen Daten vorliegen müssen. Soweit möglich, wurden Informationen und Daten, die durch Kombination und weitergehende Auswertungen eine Bewertung von Bewertungsgrößen/Indikatoren erlauben, identifiziert.

Der Aufbau der Tabelle in Anhang 2 orientiert sich streng an den Anlagen 1 bis 11 zum § 24 StandAG. Zu jedem Kriterium sind die jeweiligen bewertungsrelevanten Eigenschaften und die dazugehörigen Bewertungsgrößen/Indikatoren aufgeführt. Die Nummerierung im folgenden Text entspricht der Nummerierung der Tabelle im Anhang 2 dieses Berichtes und ist in Kapitel 2.2 erläutert. Zur Einordnung der Bewertungsgrößen/Indikatoren wurden auch die im Gesetz vorgegebenen Angaben zu den Wertungsgruppen in die Tabelle übernommen.

Die Ausführungen zu den Bewertungsgrößen/Indikatoren im vorliegenden Bericht stehen im engen Kontext mit der Ermittlung von Teilgebieten nach § 13 StandAG. Das StandAG gibt vor, dass die geowissenschaftlichen Abwägungskriterien auch in den nachfolgenden Schritten und Phasen für eine Einengung zur Anwendung kommen (§§ 14, 16 und 18 StandAG). Da im Zuge des Verfahrens durch Erkundungsmaßnahmen vermehrt standortspezifische Kenntnisse vorliegen werden, kann sich in den weiteren Schritten des Standortauswahlverfahrens Anpassungsbedarf der Ergebnisse an neuere Erkenntnisse ergeben. Die von den Behörden des Bundes und der Länder zur Verfügung gestellten Daten wurden zum größten Teil nicht mit der Zielstellung eines Standortauswahlverfahrens erhoben. Für die Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien sind jedoch zum Teil sehr spezielle Daten erforderlich. Es ist daher für viele Bewertungsgrößen/Indikatoren der Anlagen 1 bis 11 des § 24 StandAG davon auszugehen, dass zu den im Fokus stehenden Gesteinstypen in den geforderten Teufenbereichen in Phase 1 Schritt 1.3 des Standortauswahlverfahrens nicht sämtliche erforderliche oder nur ungenügende Daten hinsichtlich Umfang und Qualität zur Verfügung stehen. Es sollen deshalb in der Teilaufgabe A 8.3 alternative Möglichkeiten für die Anwendung der Bewertungsgrößen/Indikatoren herausgearbeitet werden. Diese sind der entsprechenden Spalte der Tabelle in Anhang 2 zum Bericht zu entnehmen. Der Textteil zu den Teilaufgaben A 8.1 (Kap. 3.1) und A 8.3 (Kap.3.3) beschränkt sich auf solche Erläuterungen, deren Bedarf in projektbegleitenden Gesprächen mit der BGE identifiziert wurden. Sie dienen dem besseren Verständnis der tabellarischen Übersicht im Anhang 2.

3.1 Ermittlung der zur Anwendung der Abwägungskriterien erforderlichen geowissenschaftlichen Informationen/Daten (A 8.1)

Nachfolgend werden Erläuterungen zu einzelnen Bewertungsgrößen/Indikatoren zur Verbesserung der Lesbarkeit der Tabelle im Anhang 2 vorgenommen.

Zu 1.4b:

Die Versenkungstiefe von Tongestein bezieht sich nicht allein auf die aktuelle Versenkungstiefe. Es ist auch ggf. eine in der Vergangenheit erreichte größere Versenkungstiefe zu berücksichtigen, da die maximalen Temperatur- und Druckverhältnisse maßgeblich den Verfestigungsgrad beeinflussen. Soweit in der Literatur verfügbar, sind „Versenkungspfade“ für die Bewertung des Indikators heranzuziehen.

Zu Anlage 2 des StandAG:

Das Kriterium zur Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper ist unter Berücksichtigung der Barrierewirkung der unversehrten Barriere mittels Modellberechnungen abzuleiten, sobald die hierfür erforderlichen geowissenschaftlichen Daten vorliegen, spätestens für den Standortvorschlag nach § 18 Abs. 3 StandAG. Der Gesetzgeber räumt ein, dass, solange die für die rechnerische Ableitung notwendigen Daten noch nicht vorliegen, die Lage, Ausdehnung und Mächtigkeit der barrierewirksamen Gesteinsformation, der Grad der Umschließung durch einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich sowie für das Wirtsgestein Tonstein deren Isolation von wasserleitenden Schichten und hydraulischen Potenzialbringern als Indikatoren herangezogen werden können.

Zu 2.2a:

Die Bewertungsgröße bzw. der Indikator zur bewertungsrelevanten Eigenschaft des Kriteriums ist „die Tiefe der oberen Begrenzung des erforderlichen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“. Die in Anhang 2 ausgewiesenen erforderlichen Informationen bzw. Daten zielen auf die Ausweisung der oberen Begrenzung des ewG. Eine Herleitung der erforderlichen Ausdehnung des ewG, beispielsweise in Abhängigkeit von Migrationslängen bestimmter Radionuklide über den Nachweiszeitraum, erfordert numerische Simulationen, die erst im Ergebnis der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen vorliegen können.

Zu 3.1a:

Die Bewertungsgröße bzw. der Indikator 3.1a lautet „Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich“. Die relevanten Eigenschaften, die zur Bewertung dieses Indikators herangezogen werden, sind unmittelbar aus den geowissenschaftlichen Anforderungen und Kriterien des StandAG abzuleiten. Darüber hinaus gehende Gesteins-

eigenschaften bleiben unberücksichtigt. Berücksichtigt werden Eigenschaften, die aus den Anlagen 1 bis 2 und 5 bis 11 abzuleiten sind. Zu den relevanten Eigenschaften der Gesteinstypen gehören grundsätzlich auch die Mindestanforderungen Gebirgsdurchlässigkeit, Mächtigkeit und Teufenlage des Gesteinstyps. Diese Anforderungen werden durch verschiedene Abwägungskriterien abgedeckt und müssen demzufolge nicht separat betrachtet werden. Anlage 4 wird nicht gewürdigt, weil in diesem Kriterium die langfristige Stabilität der günstigen Verhältnisse zu bewerten ist. Indikatoren sind insbesondere die Zeitspannen, über welche sich die Betrachtungsmerkmale in der Vergangenheit wesentlich verändert haben und diese stehen nicht in unmittelbarem Zusammenhang mit der Variationsbreite von Gesteinseigenschaften.

Die zur Bewertung erforderlichen Informationen werden in der Tabelle an dieser Stelle (3.1a) nicht umfassend ausgeführt. Sie sind den Beschreibungen der jeweiligen Indikatoren der Tabelle zu den Anlagen 1, 2 und 5 bis 11 zu entnehmen.

Zu 3.1a und 3.1b:

Im vorgesehenen Endlagerbereich sind die charakteristischen Eigenschaften der Gesteinstypen zu bewerten. Unter Beachtung der Begriffsbestimmung in § 2 StandAG zu den Begriffen Endlagerbereich und Endlagersystem sollte die Bewertung der Kriterien 1, 2 und 5 bis 11 für die in den jeweiligen Kriterien geforderten spezifischen Endlagerbereiche (wie beispielsweise ewG, Einlagerungsbereich oder Deckgebirge) erfolgen.

Zu 3.1b:

Zur Ermittlung der zur Anwendung dieses Abwägungskriteriums erforderlichen Informationen werden zwei Varianten vorgeschlagen. In Variante 1 kommen die relevanten Daten und Informationen (Kenntnisse über die Lage der Gesteinstypen) unmittelbar zur Anwendung. Sofern diese Informationen z. B. in Form von Profilen oder geologischen Modellen nicht vorliegen, kann ggf. der Indikator über die Variante 2 bewertet werden. Die Variante 2 baut auf dem Ergebnis der Bearbeitung des Indikators 3.1a (Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen) auf. Informationen über Eigenschaften von Gesteinen sind an Raumlagen gebunden, in denen die Informationen gewonnen wurden. Mit diesen räumlichen Informationen lassen sich ggf. Homogenbereiche ableiten. Diese werden im räumlichen Zusammenhang gebracht und daraus die räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich abgeleitet. Dem StandAG sind keine Hinweise auf die Ausweisung von Homogenbereichen zu entnehmen. Ein Widerspruch zum StandAG wird bei dieser Vorgehensweise nicht gesehen.

3.2 Methoden zur Sichtung und Prüfung der vorliegenden Informationen (A 8.2)

Die Ermittlung und Bewertung von Teilgebieten nach § 13 StandAG erfordert eine systematische Erhebung, Sammlung, Aufbereitung und Archivierung sowie die Auswertung und Bereitstellung von geologischen Informationen zu den im StandAG genannten bewertungsrelevanten Eigenschaften.

Für die Anwendung der Abwägungskriterien wird erwartet, dass die vorliegenden geologischen Daten eher selten eine direkte Bewertung der Wertungsgruppen in den Anlagen 1 bis 11 des StandAG erlauben (SGD 2016). Vielmehr wird eine themenspezifische Auswertung und Bereitstellung von Informationen erwartet, die auf interdisziplinären Datenanalysen basieren. Zu den Voraussetzungen für belastbare Datenanalysen zählen qualitätsgesicherte Datengrundlagen (s. Kap. 3.5), wobei die gezielte Sichtung und Prüfung der vorliegenden Informationen ihre Verifizierung unterstützt.

Grundsätzlich ist eine Verifizierung von geologischen Daten und Informationen eng mit der fachspezifischen Beschreibung der Daten und ihrer methodischen Erhebung verbunden. Voraussetzung für qualitätsgesicherte geologische Datengrundlagen sind Nachweisdaten, wie z. B. Stammdaten und Metadaten. Das sind Informationen, die u. a. eine Antwort auf die Frage: „Wer hat wann was wo gemacht?“ liefern. Im Gegensatz zu den Nachweisdaten enthalten die „Fachdaten“ die eigentlichen Messwerte und Untersuchungsergebnisse.

Um den Raumbezug der Informationen festzulegen, sind topographische Daten für die Sichtung und Prüfung notwendig. Im Verfahren können so die geowissenschaftlichen Informationen mit Raumbezug direkt einem Teilgebiet zugeordnet werden (z. B. Informationen aus einer Bohrung) (s. a. Kap. 3.4). Bei fehlendem Raumbezug, bzw. keiner direkten Zuordnung zu einem Teilgebiet, kann die Übertragbarkeit der Eigenschaften auf ein Teilgebiet sowie auf einen Gesteinstyp geprüft werden.

Die erforderlichen geologischen Informationen resultieren aus den Anforderungen an die bewertungsrelevanten Eigenschaften bzw. sind als quantitative oder qualitative Bewertungsgrößen und Indikatoren in den Anlagen 1 bis 11 des StandAG festgeschrieben. Die bei den zuständigen Landesbehörden vorhandenen geologischen Informationen beruhen dagegen auf vielseitigen geologischen Untersuchungen, die zum Teil seit über hundert Jahren dokumentiert und archiviert werden.

Entsprechend der Zielstellung geologischer Untersuchungen sind die eingesetzten Untersuchungsmethoden recht unterschiedlich. Auf Grund dessen sind diese bei einer Zusammenstellung qualitätsgesicherter Daten zu dokumentieren. So basieren Aussagen

u. a. zu Gesteinstypen und geologischen Strukturen des tieferen Untergrundes auf den Ergebnissen von Oberflächenkartierungen, der Tiefen- und Untertage-Erkundung, Labor- und Feldversuchen sowie der geologischen Modellierung.

3.2.1 Systematik der geowissenschaftlichen Informationen

Die für die Anlagen 1 bis 11 des StandAG notwendigen Informationen und Datenabfragen betreffen die verschiedensten geowissenschaftlichen Methoden und Datenquellen. Anhand der abzu prüfenden Eigenschaften können die Informationen wie folgt gruppiert werden:

- Geologische Information:
 - Bohrungen, Schichtenverzeichnisse, Kernstrecken, Probedaten.
- Geophysikalische Informationen:
 - Seismik,
 - geophysikalische Bohrlochmessungen,
 - Potenzialfeldmessungen,
 - Geoelektrik.
- Hydrogeologische Informationen:
 - Gesteinsanalysen/Messungen in Bohrungen (in situ und im Labor).
- Gebirgsmechanische Informationen:
 - Versuche, Modellierungen, Berechnungen,
 - geophysikalische Messungen (Schallgeschwindigkeit).
- Geochemische und petrographische Informationen:
 - Laboruntersuchungen,
 - geophysikalische Bohrlochmessungen,
 - Gesteinsanalysen.
- Strukturgeologische Informationen:
 - Schnitte, 3D-Modelle, Karten.
- Informationen über die Nutzung des tieferen Untergrundes.

Die oben genannten Informationen werden im Folgenden als Datenklassen bezeichnet. Die in den einzelnen Datenklassen enthaltenen Daten werden als Datenarten bezeichnet, z. B. Bohrungen, Schichtenverzeichnisse, Gesteinsdurchlässigkeiten, einzelne Bohrlochmessungen oder chemische Zusammensetzungen von Lösungen. Die Gesamtmenge aller Datenklassen einer Untersuchung werden als Datensatz bezeichnet. Zusätzlich zu den genannten Datenklassen sind für die Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien Informationen über die Erfahrungen der Nutzung des tieferen Untergrundes relevant. Diese Informationen und die Datenklassen können zu den bewertungsrelevanten Eigenschaften wie folgt in Bezug gesetzt werden:

- Direkte Informationen: beziehen sich direkt auf Bewertungsgröße/Indikator des Kriteriums,
- zusätzliche Informationen: können zur Bestimmung der Bewertungsgröße/Indikator des Kriteriums ergänzend herangezogen werden,
- indirekte Informationen: dienen als Grundlage für die weitere Bearbeitung.

3.2.2 Zuordnung der abgefragten geowissenschaftlichen Informationen zu den Indikatoren der Abwägungskriterien

Geologische Informationen

Geologische Informationen zum tieferen Untergrund beruhen meist auf Bohrungen, die konkrete punktuelle Untergrundinformationen einschließlich Materialproben liefern. Grundlegende Bedeutung für ihren Nachweis haben Archive und digitale Informationssysteme, in denen Informationen zu Bohrungen und deren Schichtenverzeichnisse vorgehalten werden. Der Informationsgehalt einer archivierten Bohrung ist abhängig von der Zielstellung der Bohrung und den eingesetzten Methoden während der Erkundung. Nach der wissenschaftlich-technischen Aufgabenstellung können Bohrungen unterschieden werden in:

- Forschungsbohrungen,
- Explorationsbohrungen,
- Produktionsbohrungen,
- technische Bohrungen.

Für die Aussage geologischer Informationen ist ebenfalls die Art der Probengewinnung wichtig. Informationen können mit Hilfe der Bohrkleinanalyse gewonnen werden, d. h. durch die Untersuchung der Gesteinsbruchstücke, die während der Bohrphase aus dem Bohrloch ausgetragen werden. Dagegen werden bei Kernbohrungen, die jedoch meist nur für einzelne Abschnitte bestimmter Bohrungen vorliegen, weitestgehend unzerstörte Gesteinszylinder gewonnen. Geophysikalische Untersuchungen im Bohrloch erlauben daneben das Gewinnen indirekter geologischer Informationen zu den durchhörten Gesteinstypen (s. u.).

In den Bohrungsberichten sind alle unmittelbaren Informationen zu einer Bohrung dokumentiert: Die Stammdaten, z. B. Name, Koordinaten, Operatorfirma, Eigentümer, Bohrdatum, die Existenz von Kernen und Bohrlochmessungen sowie die aufgenommenen Schichtenverzeichnisse mit den Angaben zur erbohrten Schichtenfolge. Insbesondere letztere Angaben sind wesentliche Grundlagen der Erfassung von Gesteinstypen in einem Teilgebiet.

In Bezug auf die bewertungsrelevanten Eigenschaften werden die Informationen wie folgt zugeordnet (Nummerierung s. Tabelle Anhang 2):

- Direkte Informationen:
 - 2.1 bis 2.3, 3.2, 11.1.
- Zusätzliche Informationen zur Einschätzung folgender Eigenschaften:
 - 1.2a, 1.4b, 2.4, 7.1, 9.1b.
- Indirekte Informationen als Grundlage für die weitere Bearbeitung:
 - 4.1, 5.1.

Im Rahmen der Datenabfragen der BGE zu den Mindestanforderungen wurden bei den Staatlichen Geologischen Diensten die folgenden geologischen Informationen abgefragt:

- Lithologische Gliederungen zu Steinsalz, Tongestein, Plutoniten sowie hochregional-metamorphen Gesteinen im Teufenbereich von 300 m bis 2000 m, bzw. sofern Angaben zur lithologischen Gliederung nicht möglich sind, stratigraphische Gliederungen.

Diese Angaben können für folgende Bewertungsgrößen/Indikatoren genutzt werden: 1.4b, 2.1a, b, 2.2a, 2.3a, 2.4, 3.1b, 3.2, 5.1a, 5.b, 11.1a, b, c.

- Angaben der Teufen für den Verlauf der jeweiligen Hangend- und Liegendfläche.

Diese Angaben können für folgende Bewertungsgrößen/Indikatoren genutzt werden:
3.1b, 3.1c.

Diese beiden oben abgefragten Informationen können ebenfalls über geophysikalische Informationen (s. Seismik und Bohrlochmessungen) erhalten werden.

Im Rahmen der Datenabfragen der BGE zu den Ausschlusskriterien wurden bei den Staatlichen Geologischen Diensten die folgenden geologischen Informationen abgefragt:

- Räumliche Lage und Erstreckung neotektonischer Störungen:

Diese Angaben können für folgende Bewertungsgrößen/Indikatoren genutzt werden:
3.1c, 4.1b, 4.1c.

- Hebungsraten:

Diese Angaben können für folgende Bewertungsgröße bzw. folgenden Indikator genutzt werden: 4.1a.

- Tiefenlage der Quartärbasis:

Diese Angaben können für folgende Bewertungsgrößen/Indikatoren genutzt werden:
4.1a, 4.1b, 4.1c.

Geophysikalische Informationen

Unterschiedliche physikalische Eigenschaften von Gesteinstypen und Fluiden sind die Grundlage für geophysikalische Erkundungen und liefern meist indirekte Indikatoren, die durch Befunde aus geologischen Erkundungsmethoden ergänzt werden können. Die gemessenen physikalischen Parameter werden geologisch interpretiert und liefern so integrierte geologische Modellvorstellungen.

Geophysikalische Untersuchungen sind meist zerstörungsfrei oder erfordern nur einen gering dimensionierten Aufschluss.

Seismik:

Seismische Daten erlauben die Darstellung geologischer Strukturen des Untergrundes. Durch eine Analyse der Laufzeiten und Wellenformen ergeben sich Rückschlüsse auf die geometrische Struktur der Grenzflächen, die Eigenschaften der Gesteinsschichten und die Stratigraphie.

Die zur Verfügung stehenden seismischen Daten bestehen aus Rohdaten, den prozessierten Daten und den zugehörigen Berichten (Aquisitions-, Processing- und Ergebnisbericht).

Zu den Rohdaten zählen:

- Seismikdaten, die Metadaten (standardisierte Metadatenfelder) sowie die eigentlichen Messdaten zu Laufzeiten und der Energie der Schallwellen,
- Geometriedaten,
- Messprotokolle.

Neben der Bestimmung von geometrischen Strukturen anhand von Reflexionshorizonten, eignen sich seismische Daten für weitere indirekte Auswertungen der Daten, z. B. für die Ableitung gesteinsphysikalischer Parameter (u. a. Impedanzen, seismische Geschwindigkeiten, Dichten, elastische Moduli etc.). Daneben können seismische Attribute (u. a. Amplitude, Einfallen) für eine strukturelle Differenzierung lithologischer Einheiten sowie zur Bestimmung von Faziestypen und petrophysikalischen Daten (insbesondere Porosität, Fluide) genutzt werden. Diese Parameter ergänzen sich in der Interpretation anderer Methoden und erhöhen die Aussagesicherheit.

In Bezug auf die bewertungsrelevanten Eigenschaften werden die Informationen wie folgt zugeordnet:

- Direkte Informationen:
 - 2.1, 2.2, 2.3, 3.1, 3.2, 11.1.
- Zusätzliche Informationen zur Einschätzung folgender Eigenschaften:
 - 1.4, 2.4, 4.1.
- Indirekte Informationen als Grundlage für die weitere Bearbeitung:
 - 5.1.

Bohrlochmessungen:

Für die Charakterisierung und Bewertung von Gesteinstypen in einem Teilgebiet können geophysikalische Bohrlochmessungen spezifische Aussagen bzw. Hinweise zu folgenden Aufgaben liefern:

- Bestimmung von Schichtgrenzen und Gesteinstypen auf Basis geophysikalischer Untersuchungsmethoden,

- Grundlagen für die Korrelation von markanten Schichten (Gesteinstypen) in einem Gebiet,
- Bestimmung von hydrogeologischen und geotechnischen Parametern,
- Aussagen zur stofflichen und mineralogischen Zusammensetzung,
- Erfassung kleinräumiger Strukturelemente in der Bohrung,
- Parameter für die oberflächengeophysikalischen Untersuchungen.

Entsprechend der Zielstellung von geologischen Untersuchungen (z. B. Kohlenwasserstoff-Explorationen) wurden bei Tiefbohrungen zum Teil nur die Zielhorizonte intensiv (überwiegend Speichergesteine) analysiert und weniger die für die Endlagerung relevanten Wirts- und Barrieregesteine. Daher sollten Stammdaten (Metadaten) Informationen zur Teufenreferenz der Messungen, zu den Messverfahren inkl. den Sondentypen und zur eingesetzten Spülung enthalten.

Die Eindringtiefe der geophysikalischen Messung ins Gebirge und die vertikale Auflösung der Gesteinseigenschaften schränkt die Bestimmung der räumlichen Eigenschaften von Gesteinstypen ein. Trotz dieser Einschränkung kann durch die Kombination mit anderen Erkundungsmethoden, wie der geologischen Kernaufnahme und der Bohrkleinanalyse, eine hohe Informationsgüte erzielt werden.

Mit den verschiedenen Messmethoden werden dabei meist physikalische Parameter gemessen, die indirekt Aussagen zu den im StandAG genannten geologischen Parametern erlauben (z. B. Durchlässigkeit). So kann durch unterschiedliche Konfigurationen der Widerstandsmessungen eine unterschiedliche Eindringtiefe von wenigen Zentimetern bis etwa 1 m erreicht werden. Die Kombination solcher Widerstandsmessungen erlaubt es, durchlässige Abschnitte im Bohrloch zu erkennen.

Die verschiedenen Bohrlochmessverfahren sind in Tab. 1 zusammengestellt. Ausführliche Darstellungen zur Auswertung von Bohrlochmessungen finden sich in der Literatur (z. B. Fricke & Schön 1999; Doveton 1994; Boyer & Mari 1997).

Tab. 1: Übersicht über übliche Bohrlochmessverfahren

Verfahren	Messmethode	Beispiel der geophysikalischen Messung	Interpretation
passive elektrische und elektromagnetische Verfahren	Eigenpotenzialmessung	SP-Log	Lithologie z. B. bei Ton-Sandstein Wechselfolgen
aktive elektrische und elektromagnetische Verfahren	Widerstandsmessung	Widerstandsmessung	Lithologie, Porositäts-Sättigungsbestimmung
	induktive Messung, dielektrische Wellenmessung	Microlog, Induktionslog, Electromagnetic-Propagation-Tool	Dielektrizität, Leitfähigkeit
passive kernphysikalische Verfahren	Gamma-Messung	Gamma Ray Log (integral, spektral)	Lithologie, Tongehalt
aktive kernphysikalische Verfahren	Gamma-Gamma-Messung	Gamma-Gamma Dichtelog, P_g -Log ⁴ ,	Dichte, Lithologie, Porosität, Wassergehalt
	Neutronenmessung	Neutron-Neutron-, Neutron-Gamma-Messung	
akustische Verfahren	Transmission	Akustiklog	Porosität, Klüftigkeit, mechanische Eigenschaften
	Refraktion	Cement Bond Log	
	Reflexion	Borehole-Televiwer	
Verfahren zur Bestimmung geometrischer Kenngrößen (Bohrloch)	Bohrlochdurchmesser	Kaliberlog	Gesteinsfestigkeit, Verifizierung der Teufenangaben z.B. Schichtgrenzen
	Bohrlochabweichungsmessung	Bohrlochabweichungsmessung	
gravimetrische Verfahren	Relative Messung der Erdschwere	Bohrlochgravimeter	Gesteinsdichte
Messung der Eigenschaften, Zustandsgrößen und Bewegungen des Bohrlochfluids	Messung des Bohrlochfluids	Temperaturlog, Salinitätslog, Flowmeter	Temperaturverlauf, Grundwasserdynamik

Um eine Aussage zur räumlichen Verbreitung von Gesteinstypen in einem Teilgebiet zu erhalten, können Methoden der Korrelation zwischen Bohrungen verwendet werden (Korrelationen von Peaks, Peakgruppen, charakteristischen Logverläufen). Die Korrelation markanter Gesteinsschichten oder Schichtgrenzen von mehreren Bohrungen sowie die Bestimmung von Parametern für die oberflächengeophysikalischen Untersuchungen sind Grundlage für 2D- und 3D-Modelle.

⁴ Gamma-Gamma-Messung auf Basis des Photo-Effectes (P_g -Messung)

In Bezug auf die bewertungsrelevanten Eigenschaften werden die Informationen wie folgt zugeordnet:

- Direkte Informationen über in den AWK aufgeführte Eigenschaften:
 - Keine.
- Zusätzliche Informationen zur Einschätzung folgender Eigenschaften:
 - 1.2a, 1.4, 2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 3.2, 7.1, 9.1b, 9.1c, 11.1.
- Indirekte Informationen als Grundlage für die weitere Bearbeitung:
 - 1.1a, 2.4, 3.1a, 3.1b, 3.1c, 5.1b, 6.1a.

Potenzialfeldmessungen:

Potenzialfeldmessungen sind passive Methoden, die natürliche physikalische Feldgrößen messen. Magnetische und gravimetrische Modellierungen, gestützt durch Tiefenseismik, dienen der Interpretation der tektonisch-strukturellen und lithologisch-faziellen Verhältnisse des tieferen Untergrundes. Informationen wurden für Deutschland u. a. von Gabriel & Vogel (2010) und Skiba & Gabriel (2010) veröffentlicht, die Regionalanomalien der Feldmessungen darstellen.

Im Zusammenhang mit der Tiefenseismik können Gravimetrie und Geomagnetik Hinweise zu Tiefenlage und Relief sowie zur stofflichen Zusammensetzung des kristallinen Grundgebirges liefern (Scheibe et al. 2005). Hinweise auf Störungszonen können abgeleitet werden, wenn diese von Materialunterschieden (Gesteinsdichte, Magnetisierung) begleitet werden (Rappsilber 2003).

Vorausgesetzt, dass die zu messenden physikalischen Eigenschaften der Gesteinskörper oder Strukturen einen Kontrast zur Umgebung aufweisen, können Potenzialfeldmessungen spezifische Aussagen bzw. Hinweise zur Charakterisierung eines Teilgebietes liefern:

- Bestimmung der lateralen Verbreitung von Gesteinskörpern:
 - Mächtigkeit der sedimentären Deckschichten bzw. der Verwitterungszone oberhalb eines kristallinen Grundgebirges,
 - Verlauf von Störungszonen.

In Bezug auf die bewertungsrelevanten Eigenschaften werden die Informationen wie folgt zugeordnet:

- Direkte Informationen über in den AWK aufgeführte Eigenschaften:
 - Keine.
- Zusätzliche Informationen zur Einschätzung folgender Bewertungsgrößen/Indikatoren:
 - 2.2a, 2.3a, 3.2.
- Indirekte Informationen als Grundlage für die weitere Bearbeitung:
 - 3.1c.

Geoelektrik:

Die geoelektrischen Verfahren dienen zur Bestimmung der räumlichen Verteilung des spezifischen elektrischen Widerstandes im untersuchten Medium, meist oberflächennah. Eine wichtige physikalische Eigenschaft ist somit die elektrische Leitfähigkeit. Die Gesteinsleitfähigkeit ist insbesondere abhängig von der Wassersättigung, dem Chemismus der Porenwässer und der Porenraumstruktur. Die elektrische Leitfähigkeit gesteinsbildender Mineralien (Silikate, Karbonate) ist dagegen sehr gering, mit Ausnahme der Erzminerale. Bei Tonen entsteht durch die Wechselwirkung der Porenflüssigkeit mit der Gesteinsmatrix eine Grenzflächenleitfähigkeit, die den Stromfluss an der Kornoberfläche ermöglicht.

In Bezug auf die bewertungsrelevanten Eigenschaften werden die Informationen wie folgt zugeordnet:

- Direkte Informationen über in den AWK aufgeführte Eigenschaften:
 - Keine.
- Zusätzliche Informationen zur Einschätzung folgender Bewertungsgrößen/Indikatoren:
 - 11.1a, 11.1c.
- Indirekte Informationen als Grundlage für die weitere Bearbeitung:
 - Keine.

Hydrogeologische Informationen

Hydrogeologische Informationen beruhen nach der Hydrogeologischen Kartieranleitung (Grimmelmann et al. 1997) im Allgemeinen auf den hydraulischen Potenzialen, der Grundwasserfließrichtung, der Grundwassermächtigkeit und der Grundwasserbeschaffenheit zur Bestimmung der Grundwasserdynamik und zum Verständnis der regionalen Verteilung hydrogeologischer Eigenschaften. Diese Parameter und Bestimmungen der Daten können nach Appel & Habler (2001) vornehmlich aus Bohrungen durch Packer-Versuche und Bohrlochmessungen (Flowmetermessungen, Pumpversuche, Tracerversuche) gewonnen werden. Weitere Daten können durch Laborexperimente anhand von Gesteinsanalysen und Messungen ermittelt werden.

Zur Bestimmung der Indikatoren werden folgende hydrogeologische Informationen benötigt:

- Für die Abstandsgeschwindigkeiten des Grundwassers [mm/a] werden folgende Daten zur Ableitung der Bewertungsgröße/des Indikators benötigt: Durchlässigkeitsbeiwert [m/s], effektive Porosität [-], hydraulischer Gradient [-] aus Potenzialmessungen und ggf. Gleichenplänen,
- Transmissivität [m^2/s],
- für charakteristische Gebirgsdurchlässigkeiten [m/s] werden folgende Daten zur Ableitung der Bewertungsgröße/des Indikators benötigt: Durchlässigkeitsbeiwert (Gesteinsdurchlässigkeit/Gebirgsdurchlässigkeit) k_f [m/s], Volumenstrom [m^3/s], hydraulischer Gradient [-], durchströmte Fläche [m^2],
- hydraulische Durchlässigkeiten in verschiedenen Skalen zur Abbildung repräsentativer Gebirgs- und Gesteinsdurchlässigkeiten.

Weitere Daten, die aus Kartenwerken, hydrogeologischen Kartierungen, Schichtenverzeichnissen inkl. hydrogeologischer Gliederung, Angaben über hydraulische Fenster, hydraulische Kennwerte anstehender Formationen sowie geologische und hydrogeologische 3D-Modelle gewonnen werden können, werden z. B. für die beiden folgenden Punkte benötigt:

- Bestimmung von Gesteinskörpern, die als Potenzialbringer in Frage kommen (Grundwasserleiter und hydraulische Potenziale) sowie deren räumliche Verteilung,
- Bestimmung der Überdeckung des ewG mit grundwasserhemmenden Gesteinen, Verbreitung und Mächtigkeit grundwasserhemmender Gesteine im Deckgebirge.

Für die Tiefenwässer werden noch direkte Messungen zu folgenden Informationen benötigt:

- Angaben zum Alter des Wassers und zur Konzentration stabiler Isotope,
- pH-Wert Bestimmung,
- Redoxpotenzial,
- Gehalt an Kolloiden und Komplexbildnern,
- Karbonatkonzentrationen.

Appel & Habler (2001) haben festgestellt, dass eine Zuweisung charakteristischer Bandbreiten hydraulischer Parameter zu bestimmten Gesteinstypen die Zuverlässigkeit bzw. Reproduzierbarkeit, Vergleichbarkeit und annähernd übereinstimmende räumliche Aussagekraft der einfließenden Daten voraussetzt. Diese Eigenschaften hängen ihrerseits von der zur Erhebung hydraulischer Daten eingesetzten Untersuchungsmethode und den konkreten Versuchsbedingungen, aber auch von den hydraulischen Eigenschaften des betrachteten Gesteinstyps bzw. deren ortsspezifischer Ausprägung ab.

Weiterhin sagen die Autoren, dass sich die Reichweite hydraulischer Tests aus deren Art näherungsweise ableiten lässt. Umgekehrt können die üblichen Testverfahren bestimmten charakteristischen Skalenbereichen der Reichweite zugeordnet werden. Dabei unterscheiden Appel & Habler (2002) in ihrer Datenbank zur Gebirgsdurchlässigkeit und bei der Datenauswertung folgende Skalenbereiche und zugehörige Testverfahren:

- Kleinskaliger Bereich: Laterale Reichweite bis ca. 10 m (Packerversuche an Kluffzonen und im intakten Gebirgsbereich, einschließlich Bohrloch-Logging),
- mittelskaliger Bereich: Laterale Reichweite ca. 10 m bis 100 m (Interferenzversuche, wie hydraulische Mehrbohrlochversuche und Tracerversuche),
- großskaliger Bereich: Laterale Reichweite mehr als 100 m (Langzeitpumpversuche und Ventilationsversuche).

Diese Skalenbereiche und Variationen aus den unterschiedlichen Methoden sollten bei der Datenerhebung berücksichtigt werden.

In Bezug auf die Bewertungsgrößen/Indikatoren werden hydrogeologische Informationen wie folgt zugeordnet:

- Direkte Informationen über in den AWK aufgeführte Eigenschaften:
 - 1.2a.
- Zusätzliche Informationen zur Einschätzung folgender Eigenschaften:
 - 1.1, 1.2, 2.4, 6.1, 10.1 und 11.1.
- Indirekte Informationen als Grundlage für die weitere Bearbeitung:
 - 3.1a, 7.1a.

Im Rahmen der Datenabfragen der BGE zu den Mindestanforderungen wurden durch einen Staatlichen Geologischen Dienst Informationen zur Gebirgsdurchlässigkeit abgefragt. Diese Angaben können für folgende bewertungsrelevanten Eigenschaften genutzt werden: 1.1a, b, 6.1a, 7.1a.

Gebirgsmechanische Informationen

Bewertungen der gebirgsmechanischen Gegebenheiten basieren auf Stoffgesetzen oder Stoffmodellen, durch deren Anwendung in Modellberechnungen das mechanische Verhalten (Elastizität, Bruchfestigkeit) des Gebirges beschrieben werden kann. Die Anlage 5 StandAG bezieht sich auf den Einlagerungsbereich und das Barrieregestein, Anlage 6 auf das Barrieregestein. Die gebirgsmechanischen Eigenschaften werden von den angetroffenen Gesteinstypen bestimmt. Für ihre Bewertung sind Parameter mit ihrer natürlichen Variabilität notwendig, die aus den Anforderungen der bekannten Stoffgesetze abzuleiten sind, um insbesondere die Festigkeits- und Deformationseigenschaften zu beschreiben.

Für die Beschreibung der Festigkeit werden nach der Art der mechanischen Belastung Druck-, Zug-, Scher-, Biege-, Kompressions- und Torsionsfestigkeit unterschieden. Scher-, Druck- und Zugfestigkeit sind dabei insbesondere für das Kurzzeitverhalten relevant und kennzeichnen u. a. die Standfestigkeit des Gesteins, seine Konvergenz und die Größe der Auflockerungszone. Für die Beschreibung der Deformationseigenschaften werden statische Elastizitätsparameter durch Spannungs-Deformationsmessungen in einaxialen und triaxialen Druckversuchen ermittelt. Dynamische Elastizitätsparameter werden aus Ultraschallgeschwindigkeiten und Dichtewerten berechnet.

Die Ergebnisse aus den gesteinsmechanischen Untersuchungen hängen von den lithologischen Ausprägungen der Gesteinstypen (chemische und petrophysikalische Eigenschaften) ab. Dazu gehören u. a. Schichtungen, Gesteinsdichte, Mineralbestand, Gefüge sowie Porenanteil und Fluideigenschaften bzw. -menge. Diese Parameter werden in den o. a. Stoffgesetzen berücksichtigt. Dabei erfordern Gesteinstypen, in denen mehrere Effekte nebst gegenseitigen Abhängigkeiten zu berücksichtigen sind (z. B. Aufsättigung und Quellen von Tonmineralen), höherentwickelte Stoffmodelle mit zusätzlichen Parametern.

Für die Übertragung der Laboruntersuchungen auf die Gesteinstypen in einem Teilgebiet werden in den Modellberechnungen Informationen zu den dort herrschenden Spannungsverhältnissen berücksichtigt, die z. B. durch die Tiefenlage und strukturgeologische Verhältnisse beeinflusst werden. Insgesamt werden bei der Bestimmung der Elastizität und Festigkeit thermische (T), mechanische (M) und hydraulische (H) Einwirkungen betrachtet, die als gesteinsmechanische Referenzwerte zur Abschätzung der gebirgsmechanischen Gegebenheiten in einem Teilgebiet genutzt werden können.

Aufgrund der vielfältigen Bestimmungsmethoden und Modellierungsansätze sind die Metadaten (z. B. Stoffgesetz, Modellansatz) zu den gesteinsmechanischen Informationen von besonderer Bedeutung.

In Bezug auf die Bewertungsgrößen/Indikatoren werden die gebirgsmechanischen Informationen wie folgt zugeordnet:

- Direkte Informationen über in den AWK aufgeführte Eigenschaften:
 - Keine.
- Zusätzliche Informationen zur Einschätzung folgender Eigenschaften:
 - 5.1a, 5.1b, 6.1c, 6.2a, 6.2b, 8.1a, 8.1b.
- Indirekte Informationen als Grundlage für die weitere Bearbeitung:
 - Keine.

Geochemische und petrographische Informationen

Petrographische Untersuchungen dienen der Untersuchung und Beschreibung von Vorkommen, der Zusammensetzung und des Gefüges von Gesteinen und der in ihnen auftretenden Mineralbildungen. Auf Grund dieser Untersuchungen werden die Gesteine benannt und klassifiziert. Untersuchungsmethoden sind u. a.: Feldarbeiten einschließlich Bohrungsanalyse (Auswertung von Schichtenverzeichnissen, geophysikalischen Bohr-

lochmessungen, Bohrkernen), mikroskopische und elektronenmikroskopische Untersuchungen sowie die Röntgendiffraktometrie. Neben der Kenntnis des Mineralbestandes ist darüber hinaus auch die chemische Charakteristik eines Gesteins hinsichtlich der Haupt-, Neben- und Spurenelemente von Bedeutung. Abhängig von der Fragestellung werden die verschiedensten Methoden der instrumentellen chemischen Analytik genutzt. Beispielhaft sollen genannt werden: Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA), Raman-Spektroskopie, Atomabsorptionsspektroskopie, Atomemissions-spektroskopie, induktiv gekoppelte Plasmen gekoppelt mit Optischer Emissionsspektroskopie (ICP-OES) oder gekoppelt mit Massenspektrometrie (ICP-MS) sowie Sekundärionen-Massenspektrometer (SIMS).

Entsprechend der vielfältigen Analysemethoden sind die Metadaten (z. B. Methodik, verwendete Geräte, Randbedingungen) zu den petrographischen/geochemischen Informationen von besonderer Bedeutung.

In Bezug auf die Bewertungsgrößen/Indikatoren werden geochemische und petrographische Informationen wie folgt zugeordnet:

- Direkte Informationen über in den AWK aufgeführte Eigenschaften:
 - 1.4, 3.1a, 3.2a, 3.4a, 6.2b, 8.1, 8.2, 9.1.
- Zusätzliche Informationen zur Einschätzung folgender Eigenschaften:
 - 5.1, 6.1c, 6.2a, 7.1a, 10.1.
- Indirekte Informationen als Grundlage für die weitere Bearbeitung:
 - 11.1.

Strukturgeologische Informationen

Die größte Informationsdichte über ein Gebiet bieten geowissenschaftliche Karten. Besonders wichtig sind Darstellungen stratigraphischen, lithologischen, tektonischen, rohstoff-, hydro- und ingenieurgeologischen sowie geophysikalischen Inhalts.

Die geologischen Vorstellungen zum Bau und zur Genese des tieferen Untergrundes sind vorwiegend eine Interpretation, basierend auf geologischen Informationen und geophysikalischen Daten. Beispiele für die zusammenfassende Interpretation der Informationen und die Grundlage aktueller 3D-Modelle sind der Geotektonische Atlas von NW-Deutschland (Baldschuhn et al. 2001) und das regionale Kartenwerk der Reflexionsseismik (Reinhardt 1968-1991).

Aus seismischen Messungen und Bohrlochmessungen sowie Aufschlüssen über Tage lassen sich Lagerungsverhältnisse (z. B. Schichtstreichen und -einfallen, Faltenachsengeometrie) ermitteln. Interpretierte Informationen sind in Kartenwerken (geologische, tektonische Karten), geologischen Schnitten und 3D-Modellen aufbereitet. Diese geben Informationen u. a. zu Mächtigkeiten einzelner stratigraphischer Horizonte sowie zu Vorkommen und Lage struktureller Elemente. Des Weiteren lassen sich aus Tiefenlinien-, Mächtigkeits-, Lithofazies- und abgedeckten Karten Informationen zur tektonischen und strukturgeologischen Entwicklung von Gebieten ableiten.

Im Allgemeinen sind strukturgeologische Prozesse für die räumliche Verteilung und damit für die räumliche Charakterisierbarkeit und Vorhersagbarkeit verantwortlich. Diese Prozesse können durch geologische Modellberechnungen nachgebildet werden, z. B. bilanzierte Profile. In sich konsistente Lösungen der strukturgeologischen Entwicklung hängen von der Dichte der Datenbasis (Stratigraphie, Paläo-Thermo-Barometrie, Geophysik, Strukturgeologie etc.) ab sowie von der Komplexität der geologischen Struktur. Ein weiterer Aspekt von strukturgeologischen Informationen sind Berechnungen zur Versenkungstiefe und Messungen zum Diagenesegrad von Tonmineralen (z. B. Illitkristallinität).

In Bezug auf die Bewertungsgrößen/Indikatoren werden strukturgeologische Informationen wie folgt zugeordnet:

- Direkte Informationen über in den AWK aufgeführte Eigenschaften:
 - 2.1a, 2.1b, 2.2a, 3.1a, 3.1b, 3.1c.
- Zusätzliche Informationen zur Einschätzung folgender Eigenschaften:
 - 1.4b, 3.2, 4.1.
- Indirekte Informationen als Grundlage für die weitere Bearbeitung:
 - Keine.

Informationen über die Nutzung des tieferen Untergrundes

Informationen zur Nutzung des tieferen Untergrundes dienen der Einschätzung des Indikators „Erfahrung über die Barrierewirksamkeit der Gebirgsformationen in folgenden Erfahrungsbereichen“ der Anlage 6. Entsprechend der Handlungsoption zum Begriff Gebirgsformationen (siehe Kapitel 2.2.6) sind Erfahrungen für die Gesteinstypen Steinsalz, Tongestein und Kristallingestein gefragt (s. Tab. 2).

Tab. 2: Erfahrungsbereiche zur Barrierewirksamkeit der Wirtsgesteine (0 = keine Erfahrungen, 1 = Erfahrungen vorhanden)

Nr.	Erfahrungen über die Barrierewirksamkeit	Kristallin	Tongestein	Steinsalz
1	rezente Existenz als wasserlösliches Gestein	0	0	1
2	fossile Fluideinschlüsse	1	1	1
3	unterlagernde wasserlösliche Gesteine	0	1	1
4	unterlagernde Vorkommen flüssiger oder gasförmiger KW	0	1	1
5	Heranziehung als hydrogeologische Schutzschicht bei Gewinnungsbergwerken	0	1	1
6	Aufrechterhaltung der Abdichtfunktion auch bei dynamischer Belastung	0	1	1
7	Nutzung von Hohlräumen zur behälterlosen Speicherung von gasförmigen und flüssigen Medien	0	0	1

- Zu 1) Steinsalzvorkommen sind in Deutschland weit verbreitet (z. B. (Reinhold & Hammer 2016)), Kristallin und Tongestein sind keine wasserlöslichen Gesteine.
- Zu 2) Fluideinschlüsse kommen in allen drei Gesteinstypen vor. Für die Bewertung des Alters der Einschlüsse sind die Genese sowie die Herkunft und Migration der vorgefundenen Gase und Lösungen zu klären (Siemann & Ellendorf 2001; van den Kerkhof & Simon 2014).
- Zu 3) Tongestein (z. B. Rupelton) als Schutzschicht gegen Subrosion. Steinsalz kann über anderen löslichen Salzgesteinen liegen.
- Zu 4) Ton- und Salzgesteine sind die wichtigsten Barrieregesteine von Erdöl- und Erdgaslagerstätten (Kockel et al. 1994; Karnin et al. 2006).
- Zu 5) Im Rahmen der Betriebssicherheit bei bergbaulicher Salzgewinnung wurden für Steinsalz und Tongestein Labor- und Felduntersuchungen zur Bewertung der hydrogeologischen Schutzschicht durchgeführt (Böttge et al. 2003). Zudem kann für Tongestein die geologische Situation am Standort Konrad berücksichtigt werden.
- Zu 6) Die Abdichtfunktion von Steinsalz wurde für die Sicherheit von Bergwerken und Untergrundspeichern untersucht. Vorausgesetzt, dass ein Ausbau der bergmännischen Hohlräume im Tongestein vorliegt, kann eine Abdichtung auch bei technogener Beanspruchung angenommen werden.
- Zu 7) Nutzung von Salz-Kavernen zur behälterlosen Speicherung von gasförmigen und flüssigen Energieträgern. Hierüber erfolgt eine jährliche Dokumentation zur Untertage-Gasspeicherung in Deutschland durch das Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) in der Zeitschrift „Erdöl Erdgas Kohle“.

In Bezug auf die Bewertungsgrößen/Indikatoren werden die Informationen wie folgt zugeordnet:

- Direkte Informationen über in den AWK aufgeführte Eigenschaften:
 - 6.1b.
- Zusätzliche Informationen zur Einschätzung folgenden Eigenschaften:
 - 1.2a, 6.1a, 7.1a, 11.1a.
- Indirekte Informationen als Grundlage für die weitere Bearbeitung:
 - Keine.

3.3 Aufzeigen alternativer Möglichkeiten für die Bestimmung von Indikatoren/Bewertungsgrößen (A 8.3)

Zu Anlage 1 des StandAG:

Für das Kriterium zur Bewertung des Transportes radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich (Anlage 1 zu § 24 Abs. 3 StandAG) räumt der Gesetzgeber ein, dass - solange die entsprechenden Indikatoren nicht standortspezifisch erhoben sind - für die Abwägung das jeweilige Wirtsgestein als Indikator verwendet werden kann. Diese Vereinfachung gilt ausschließlich für dieses Kriterium. In der Umsetzung bedeutet dies beispielsweise für 1.2a, dass für das betrachtete Wirtsgestein typische charakteristische Gebirgsdurchlässigkeiten verwendet werden und somit eine Zuordnung zu einer der drei Eigenschaften (günstig, bedingt günstig oder weniger günstig) in der Wertungsgruppe vorgenommen wird. Sofern Tongestein als Wirtsgestein in Betracht gezogen wird, kann dieses Vorgehen bei der bewertungsrelevanten Eigenschaft 1.4 „Diffusionsgeschwindigkeit bei Tonstein“ nicht zu einer Differenzierung in günstig, bedingt günstig oder weniger günstig führen. Allerdings sollte auch bei der Umsetzung des Kriteriums mit Hilfe der genannten Vereinfachung die Übertragbarkeit von relevanten Informationen zu den bewertungsrelevanten Größen / Indikatoren auf das Teilgebiet bzw. auf die Barrieregesteine geprüft werden.

Zu 1.4b

Prinzipiell ist die Bestimmung der Gesteinsdichte mittels Seismik möglich. Kompressionsmodul, Schubmodul und Dichte gehen in die Geschwindigkeiten der Wellen ein. Zur Bestimmung der Dichte ist ein spezielles Processing zur Bestimmung der wahren Amplituden erforderlich (true amplitude processing). Eine Anwendung auf Altdaten ist wenig praktikabel. Bereits mit anderer Zielsetzung prozessierte Daten eignen sich nicht. Nur bei Vorhandensein der erforderlichen Rohdaten kann ein Processing erfolgshöflich sein.

Zu 6.1b:

Die Bewertungsgröße bzw. der Indikator lautet: „Erfahrungen über die Barrierewirksamkeit der Gebirgsformationen in folgenden Erfahrungsbereichen“. In der daran anschließenden Aufzählung in Anlage 6 des StandAG wird unter der Nummer 6 die Aufrechterhaltung der Abdichtungsfunktion auch bei dynamischer Beanspruchung genannt. Als dynamische Beanspruchungen werden grundsätzlich Beanspruchungen resultierend aus veränderten Spannungsverhältnissen im Gebirge verstanden. Diese können durch natürliche Vorgänge (z. B. Be- und Entlastung) oder anthropogen induzierte geogene und technogene Einwirkungen (z. B. Änderung der Temperatur) hervorgerufen werden (Lux 2002). Für die Abwägung im Rahmen des StandAG werden die anthropogen induzierten Einwirkungen bewertet (vergleiche Kapitel Handlungsoptionen zum Umgang mit unbestimmten Begriffen), da die geogenen Einwirkungen bereits mit den Ausschlusskriterien abgeprüft wurden.

Zu 7.1a:

Das Wasserangebot im Einlagerungsbereich wurde, dem Vorschlag der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfälle (EL-KOM 2016) folgend, vom Gesetzgeber als Bewertungsgröße bzw. Indikator für das Kriterium zur Bewertung der Gasbildung im StandAG festgeschrieben. Neben der Temperatur und dem chemischen Milieu hängt die Gasbildungsrate auch von der Feuchte im Einlagerungsbereich beziehungsweise im Abfallgebände ab. In der Nachbetriebsphase eines Endlagers kann es zur Gasbildung kommen, wenn Lösung an die Abfallbehälter gelangt und diese korrodiert werden. Die Gasmenge wird im Wesentlichen von der Art und den Inhaltstoffen der Abfälle, sowie der für die Korrosion zur Verfügung stehenden Lösungsmenge bestimmt. Nach AkEnd (2002) wird die Situation im Sinne des Indikators als „feucht“ eingestuft, wenn das Wasserangebot im Einlagerungsbereich die zur Korrosion erforderliche Feuchtigkeit bereitstellt, im anderen Fall als „trocken“.

3.4 *Diskussion der erforderlichen Datenverteilung und Datendichte zur Anwendung der Abwägungskriterien (A 8.4)*

Die Ausführungen zu diesem Kapitel fokussieren sich auf die Anforderungen an die Datenverteilung und Datendichte bei der Anwendung der Abwägungskriterien im Rahmen der Ermittlung von Teilgebieten. In Phase 1 Schritt 1 des Standortauswahlverfahrens wird die Verfügbarkeit bzw. das Fehlen von Datenarten zur Prüfung der Bewertungsgrößen/Indikatoren eher als problematisch angesehen, als die vorhandene Datenmenge und ihre Verteilung. Datengenauigkeit, Datenmenge und Datenverteilung werden im Fokus der Einengung mit Hilfe des Abwägungsprozesses mit dem Ziel der Ausweisung von Teilgebieten diskutiert.

Geologische Daten werden bei den Staatlichen Geologischen Diensten im Rahmen ihrer Aufgaben generiert, von Externen übernommen, archiviert und z. T. in Einzelprojekten geprüft, ausgewertet und interpretiert. Dabei müssen auch die Rechte Dritter berücksichtigt werden. Die BGR generiert Daten einerseits selbst und nutzt andererseits projektbezogene Daten von den Staatlichen Geologischen Diensten und von Externen. Jedoch kann der Datenbestand in seiner Gesamtheit inhomogen und/oder unvollständig sein. Eine qualitätssichernde Überarbeitung wird während der Datennutzung in Projekten durchgeführt und nicht grundsätzlich bereits bei der Archivierung.

3.4.1 Datengenauigkeit

Der Begriff Datengenauigkeit wird in diesem Bericht als Äquivalent des Begriffes Datenqualität betrachtet. Da die Datenqualität in Kapitel 3.5 behandelt wird, werden in Kapitel 3.4.1 ausschließlich einige generelle Aussagen getroffen. Zur Einschätzung der Qualität der eigentlichen Daten als Ergebnisse von Messungen und Untersuchungen sind die folgenden Punkte festzuhalten:

- Die Genauigkeit der Daten richtet sich nach der Methodik der Datenerhebung, Qualität und Umfang der Datendokumentation und ihrer weiteren Bearbeitung. Die Feststellung einer ausreichenden Datengenauigkeit ist dabei immer im Zusammenhang mit der Zielstellung der Untersuchung und der angewandten Methode zu sehen.
- Die Leistungsfähigkeit von Verfahren und Methoden hinsichtlich der Datenqualität ist zu beurteilen.
- Bei geographischen Daten ist die Lagegenauigkeit zu beachten (Koordinatensysteme, Georeferenzierung).

Eine Abschätzung der Datengenauigkeit sollte in Bezug auf das gegebene Auflösungsvermögen der jeweiligen Untersuchungsmethoden bzw. die maximal erreichbare Genauigkeit erfolgen (Hinweise auf Nachweisgrenzen, Messgenauigkeit und Messfehler).

Daten müssen über Metadaten recherchierbar und vergleichbar gemacht werden. Es wird vorgeschlagen, als Teil der Prüfung der Datengenauigkeit (als wesentliches Merkmal für die Datenqualität) eine Prüfung der Güte (Vollständigkeit und Aussagekraft) der Metadatensätze durchzuführen. Nachfolgend sind beispielhaft wichtige Anforderungen genannt:

- Die Metadaten sollten für jede einzelne Datenart standardisiert sein. Dies dient der Prüfung auf Vollständigkeit und der Werterhaltung im Sinne einer zukünftigen Nutzung der Datensätze,

- Koordinaten mit Angaben zum Koordinatensystem und Ellipsoid (Positionsgenauigkeit) müssen vorliegen,
- Ausführungen zur Messmethode (was wurde wie gemessen, mit welchen Instrumenten, Abschätzung der Fehlertoleranz der verwendeten Messmethode),
- Datum der Datengenerierung,
- Verweis auf Weiterbearbeitung der Datensätze mit Datum der Auswertung und Berichtserstellung.

Die Anforderungen zur Qualitätsprüfung der Daten werden in Kapitel 3.5 ausführlich aufgezeigt und diskutiert.

3.4.2 Datenmenge

Die Datenmenge, die für die Anwendung der Bewertungsgrößen/Indikatoren zur Verfügung steht, ist für Schritt 1 und 2 der ersten Phase der Standortsuche durch die Lieferung der Staatlichen Geologischen Dienste und von Bundesbehörden und durch die entsprechende Aufbereitung durch die BGE vorgegeben. Dabei richtet sich die vorhandene Datenmenge stark nach den Nutzungsoptionen innerhalb eines Gebietes, für die die Daten erhoben wurden. Je intensiver ein Gebiet bzw. eine geologische Einheit im Untergrund untersucht wurde, z. B. in Hinblick auf die Nutzung als unterirdisches Speichergestein, eine wasserwirtschaftliche Nutzung oder den Abbau von Energie- und mineralischen Rohstoffen, desto größer wird die Menge und Vielzahl von Datensätzen unterschiedlicher Datenklassen (geologische Informationen, geophysikalische Informationen, hydrogeologische Informationen) sein. Im Allgemeinen wird die Datenmenge, die bei Erkundungskampagnen generiert wird, von der geologischen Gesamtsituation des Erkundungsgebietes bestimmt. Stark strukturierte Gebiete werden in der Regel umfangreicher erkundet, so dass die Datenmenge deutlich erhöht ist. Eine geringere Datendichte findet sich meist in Gebieten mit einer weniger komplexen geologischen Situation.

Unterschiedliche Datenmengen bezogen auf die jeweiligen Parameter (z. B. Gesteinsporosität, Grundwasseralter) können sich je nach geologischer Situation im betrachteten Gebiet unterschiedlich auswirken. So kann die Aussagekraft für ein Gebiet bei geringer Datenmenge gleich gut sein wie für ein Gebiet mit vergleichsweise höherer Datenmenge. Beispielsweise dann, wenn die Erhebung für eine geologische Einheit erfolgte, für die eine geringe Variabilität in der Fazies, eine ungestörte Abfolge sowie gut charakterisierbare Lagerungsverhältnisse erwarten werden. In einem Gebiet mit einheitlicher geologischer Situation können auch bei geringer Datenmenge Aussagen von z. B. einzelnen wenigen Punktdatensätzen auf ein größeres Gebiet übertragen werden.

3.4.3 Datenverteilung und -verbreitung

Die räumliche Verteilung von Datensätzen ist sowohl bezogen auf die Fläche als auch bezogen auf eine vertikale Verteilung in die Tiefe zu betrachten. Dabei ist die Datenverteilung zum tieferen Untergrund, ähnlich wie die Datenmenge, sehr stark nutzungsorientiert und konzentriert sich konsequenterweise auf die mit wirtschaftlichen Interessen verknüpften geologischen Areale. Um die Verteilung von Daten darstellen und auswerten zu können, ist ein Raumbezug der Datensätze mit Koordinaten Voraussetzung.

a) Datenverteilung in der Fläche (z. B. in Hinblick auf die Übertragbarkeit von Bohrungsdaten):

- Die Belegdichte von Daten zum geologischen Untergrund ist nutzungsorientiert, d. h. für die im Standortauswahlverfahren interessierenden Teufenlagen kommen insbesondere Tiefbohrungen aus der Kohlenwasserstoffindustrie, der tiefen Geothermie sowie dem Bergbau inklusiv Kavernenbau in Frage. Die zu diesen Zwecken gewonnenen geologischen, geochemischen und geophysikalischen Informationen sind auf die Erkundungsziele ausgerichtet. Die Gesteine der Erkundungsziele müssen nicht mit den im StandAG ausgewiesenen Wirtsgesteinen korrespondieren.
- Bereiche mit hoher Datendichte können neben Bereichen mit geringer Datendichte liegen. Auch in Bereichen mit hoher Datendichte und vergleichbaren Datenklassen können einzelne Datenarten in den zu betrachtenden Bereichen unterschiedlich sein.
- Generell besteht die Möglichkeit, geologische Informationen zu übertragen. Die Übertragbarkeit von Informationen von einem Bereich (= Region) in einen anderen ist jedoch vorab zu prüfen. Grundlage hierfür ist die Kenntnis der geologischen Entwicklung der jeweiligen Regionen, insbesondere für die relevanten geologischen Einheiten. Folgende Fragestellungen sind dabei u. a. zu beachten: Sind die Ablagerungs- bzw. Bildungsbedingungen der Wirtsgesteine und der Gesteine des Endlagersystems in den jeweiligen Gebieten vergleichbar bzw. inwiefern unterscheiden sich ihre Ablagerungs-/Bildungsbedingungen (Faziesräume)? Unterscheidet sich die strukturelle Entwicklung der Region nach der Ablagerung/Bildung der Gesteinseinheiten, auf die die Informationen übertragen werden sollen? Dazu sind beispielsweise Versenkungs- bzw. Heraushebungsverlauf, Diageneseverlauf sowie der Einfluss endogener und exogener Prozesse zu berücksichtigen. Befinden sich die zu vergleichenden Regionen rezent in vergleichbaren strukturellen Positionen, tektonischen Regimen?

- Bezüglich Datenlücken ist zu überlegen, inwieweit diese durch Übertragung von Kenntnissen aus anderen Bereichen geschlossen werden können. Neben der direkten Übertragung von Eigenschaften aus einem benachbarten Bereich besteht grundsätzlich die Möglichkeit, unter Beachtung statistischer Regeln Schätzungen von Gesteinseigenschaften vorzunehmen. Die Belastbarkeit der Übertragung von Eigenschaften mittels Expertenschätzungen und die Anwendung geostatistischer Methoden ist im Einzelfall zu überprüfen.
- Statistische Angaben zu Datenmengen bzw. Datendichte pro Flächeneinheit, wie sie z. B. in der Literatur zu finden sind ((Golder 2006), Tabelle 2.4.1-1), machen demnach nur Sinn, wenn die betrachtete Fläche in einem strukturell einheitlichen Gebiet liegt (im zitierten Bericht auch Studienraum genannt) und sich die Daten auf das gleiche Gestein beziehen.

b) Datenverteilung vertikal:

Der relative Kenntnisstand zur Geologie des Untergrundes nimmt mit zunehmender Tiefe progressiv ab, da bspw. die Anzahl von Bohrungen, entsprechend zunehmender Endteufe sortiert, abnimmt. Auch die Anzahl von Bergwerken, in denen Messungen und Beprobungen stattfinden konnten und können, nimmt zur Tiefe hin ab.

3.4.4 Übertragbarkeit von Daten/Informationen

Bei der Anwendung der Abwägungskriterien in Phase 1 des Standortauswahlverfahrens ist der Umgang mit Inhomogenitäten in den Datensätzen in Bezug auf die Datengenauigkeit, Datenmenge und Datenverteilung notwendig. In dieser Phase werden keine neuen Daten im Gelände generiert. Für Gebiete, in denen in der Vergangenheit nur wenig explorative oder andere Tätigkeiten stattfanden, die der Charakterisierung des Untergrundes dienten, können Datenlücken oder -defizite auch nach eventueller Aufarbeitung analoger Datensätze nicht aufgehoben werden. Für diese Gebiete sollte eine Übertragbarkeit von Informationen aus anderen Gebieten, z. B. durch die Anwendung geostatistischer Methoden, geprüft werden. Findet eine Übertragung von Informationen vom Standort der Erhebung auf eine größere Fläche statt, muss diese sorgfältig durchgeführt und dokumentiert werden. Eine Begründung für die Machbarkeit bzw. Gründe für den Verzicht der Informationsübertragung in die Fläche ist anzugeben. Die Nachvollziehbarkeit des argumentativen Einengungsprozesses soll damit sichergestellt werden.

Vor einer Einschätzung der Übertragbarkeit von Daten/Informationen zur Anwendung der Abwägungskriterien wird empfohlen, das Gebiet in abgrenzbare geologische Struktureinheiten einzuteilen. Diese Einteilung des Untergrundes dient der Bündelung der Argumente für bzw. gegen die Übertragbarkeit von Daten/Informationen. Diese

Struktureinheiten sollten auf Basis der rezenten geologischen Verhältnisse, die das Resultat der Entstehungsgeschichte der Gesteine in diesen Struktureinheiten und aller später auf sie eingewirkten Prozesse sind, benannt werden. Für größere Struktureinheiten ist eine weitergehende, interne Gliederung vorstellbar.

Eine andere Möglichkeit wäre ein geometrisches Raster, das unabhängig von geologischen und geomorphologischen Gegebenheiten über das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland gezogen wird. Der Vorteil eines Rasters liegt darin, dass gebräuchliche Raster aus der Kartographie zu Verfügung stehen und ohne Wertung als Grundlage übernommen werden können. Aus dieser Ausgangsposition heraus sollte die Rasterung an die geologischen Gegebenheiten angepasst und auf diesem Weg Struktureinheiten generiert werden. Allerdings könnte die Bewertung von Abwägungskriterien auf Rastersegmente durch geologische Strukturgrenzen, die ein Rastersegment durchziehen, erschwert werden. Für die Begründung der Rastergröße sowie die Ausrichtung eines Rasters können vorhandene Kartenwerke herangezogen werden. Für großräumige Festlegungen ist die GÜK200 als Grundlage geeignet. Als Standard für die Größe des Rasters können größer maßstäbige Karten wie die GK 50 oder GK 25 geprüft werden.

Im Abschlussbericht der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (EL-KOM 2016) wird ausgeführt, dass die „räumliche Charakterisierbarkeit auf der Ermittlbarkeit der relevanten Gesteinstypen und ihrer Eigenschaften und der Übertragbarkeit dieser Eigenschaften durch Extrapolation bzw. Interpolation beruht. Beides, die Ermittlbarkeit und die Übertragbarkeit, hängen maßgeblich von den Entstehungsbedingungen der Gesteinstypen oder / und ihrer späteren Überprägung ab“. Somit ist die Möglichkeit der Übertragung geowissenschaftlicher Informationen von einem Gebiet in ein anderes ein Merkmal der guten räumlichen Charakterisierbarkeit und diese als Grundgedanke im § 24 StandAG verankert. Auch wird im Kommissionsbericht darauf eingegangen, dass zur Überprüfung der Sinnhaftigkeit einer Übertragung von Informationen auf die Entstehungsbedingungen einschließlich einer späteren Überprägung der Gesteinstypen fokussiert werden kann.

3.5 Vorgehensweise zur Qualitätsprüfung von Daten (A 8.5)

Bewertung der Datengrundlage

Im Standortauswahlverfahren umfasst die Bewertung von Daten zur Anwendung der Abwägungskriterien alle relevanten Daten zu den Gebieten, die nach Anwendung von § 22 und § 23 StandAG grundsätzlich als Endlagerstandort geeignet sind (s. Kap. 3.2). Zur Ermittlung und Bewertung von Teilgebieten stehen sehr viele unterschiedliche Daten zur Verfügung, die mit verschiedenen Methoden und unterschiedlichen Zielstellungen erfasst

wurden. Die Kenntnisse resultieren aus der Kohlenwasserstoff-Exploration, Untersuchungen der öffentlichen Hand und der Industrie, Tunnelbauprojekten, Untersuchungen zu Endlagerstandorten und sonstigen geowissenschaftlichen Untersuchungen. Dabei sind die in den Untersuchungen erzielte Datenqualität und die bundesweite Datendichte sehr unterschiedlich. Zur Auswahl und Bewertung dieser Daten wird eine Qualitätseinstufung empfohlen, um relevante Daten herauszufiltern. Ergänzend werden hier der Datenumfang und die Bedeutung der Daten für die Anwendung der Abwägungskriterien zur Bewertung und Ermittlung von geologischen Teilgebieten als zusätzliche Qualitätskriterien genutzt.

Methodik zur Dateneinstufung

Da die zur Verfügung stehenden Daten und Methoden sehr heterogen sind, ist ihre Qualitätsprüfung und -einstufung sehr komplex. Es sind zahlreiche Parameter zu berücksichtigen, die für jeden Datensatz unterschiedlich sind. Eine qualitative oder quantitative Qualitätseinstufung ist daher immer eine Bewertung des Einzelfalls. Je nach Datenklasse muss zuerst die Methode oder der Datensatz allgemein beurteilt werden. Generell können für die Qualitätseinstufung QM-Methoden genutzt werden. Im Folgenden wird das Ampelsystem für die Qualitätseinstufung genutzt (Tab. 3). In den Tab. 4 und Tab. 5 werden die Qualitätsbewertungen anhand von Qualitätsmerkmalen bzw. erweiterten Qualitätsmerkmalen zusammengefasst.

Tab. 3: Einstufung der Daten nach Qualitätskriterien nach dem Ampelsystem

Einstufung der Daten nach Qualitätskriterien		
Qualität unbekannt oder keine Qualitätsmerkmale	Ausreichende Qualität	Hohe Qualität
Weniger/bedingt geeignet	geeignet	Sehr geeignet

Die Qualitätseinstufung berücksichtigt dabei folgende Gesichtspunkte bzw. Qualitätsmerkmale:

Qualitätssicherung:

- Qualitätsgesicherte Daten (Qualitätssicherung/Homogenisierung von Daten durch die BGE im Rahmen der Standortauswahl nach entsprechenden, ggf. zu entwickelnden Anforderungen),

- Qualitätssicherung bzw. Durchführung der Datenerhebung nach feststehenden Normen, Richtlinien, technischen Regeln, Verordnungen etc. (z. B. Durchführung nach gültiger DIN EN ISO 9001 (DIN 9001 2015), DIN EN ISO/IEC 17025 (DIN 17025 2018), (DGGT 2010), (VDI 2013), KTA 1401 (KTA 1401 2013) etc.). Ziel ist, bei der Durchführung von Bohrungen, Messungen, Dokumentationen etc. einen gleichbleibenden, nachvollziehbaren Qualitätsstandard zu erfüllen. Für Standarduntersuchungen gelten die Anforderungen von Normen als Qualitäts-Mindestanforderung. Untersuchungen, die nach bestehenden Normen durchgeführt werden, lassen sich unkompliziert qualitativ bewerten,
- bei sogenannten wissenschaftlichen Untersuchungen sind die Anforderungen an spezielle Fragestellungen häufig deutlich höher als bei Standarduntersuchungen. Darüber hinaus werden im wissenschaftlichen Bereich aber auch zahlreiche Methoden eingesetzt, die sich gerade in der Entwicklung befinden bzw. die für spezielle Fragestellungen entwickelt oder angepasst werden. Sie sind häufig Eigenentwicklungen von wissenschaftlichen Institutionen und werden nicht für kommerzielle Anwendungen genutzt. Daher kann es für diese Verfahren meist keine Normung geben. Die Bewertung ihrer Qualität kann nur durch den Vergleich erfolgen; z. B. durch Wiederholungsmessungen, Ergebnisvalidierung verschiedener Methoden im Zusammenhang, ggf. durch unterschiedliche Institutionen (Benchmarking),
- Qualifikation des Datenerstellers, z. B. durch ein (zertifiziertes) Qualitätsmanagementsystem oder vergleichbare Systeme zur Qualitätssicherung, Zertifizierung für definierte Methoden und Akkreditierung,
- wissenschaftliche Qualität (Peer Review, Veröffentlichungen).

Datendokumentation und Verfügbarkeit:

- Vollständige Dokumentation und Datensicherung incl. aller Rohdaten und Metadaten, Verfügbarkeit und Lesbarkeit aller Daten,
- unvollständige Dokumentation und Datensicherung (nur Ergebnisse),
- unvollständige Dokumentation und Datensicherung (nur Rohdaten ohne Auswertung und Metadaten),
- Daten nicht oder nur z. T. verfügbar.

Einstufung nach Art und Umfang der Daten (s. a. Kap. 3.4):

- Vollständiger Datensatz (Originaldaten des Datenerstellers) mit Rohdaten und Metadaten (inkl. Messdaten) – Daten sind interpretiert und dokumentiert, Nachbearbeitung nicht erforderlich,
- vollständiger Datensatz (Originaldaten des Datenerstellers) mit Rohdaten und Metadaten (inkl. Messdaten) – Nachbearbeitung und Auswertung der Daten erforderlich, ggf. nur im Kontext mit anderen Daten nutzbar,
- sekundäre Daten - keine Rohdaten und Metadaten vorhanden (z. B. Daten in Berichten, Veröffentlichungen).

Die Qualität von Interpretationsergebnissen kann durch einen komplementären Methodenansatz erheblich verbessert werden.

Ggf. kann die Daten-/Informationsdichte (Datenverteilung) in den zu betrachtenden Gebieten die Bewertung von Daten beeinflussen (s. Kap. 3.4). Zur Qualitätseinstufung könnte ein „Vertrauenskegel“ als Zuverlässigkeitsindex eingeführt werden, um geologische Aussagen zu den Lagerungsverhältnissen eines Wirtsgesteins oder zur Ermittlung der Gesteinseigenschaften treffen zu können (Golder 2006). Darunter ist ein festzulegender subjektiver Wert zu verstehen, der sich aus der Datenverteilung (Datengenauigkeit u. -menge, s. Kap. 3.4) ergibt, z. B. durch die Anzahl von Bohrungen in einem Gebiet. Tabelle 4 zeigt für verschiedene Qualitätsmerkmale anhand von Beispielen die Einordnung in die drei Kategorien der Datenqualität.

Tab. 4: Beispiele zur Einstufung der Datenqualität

Qualitätsmerkmal	Datenqualität		
	Qualität unbekannt oder keine Qualitätsmerkmale	Ausreichende Qualität	Hohe Qualität
Qualitätssicherung (ggf. Abstufung) Zuverlässigkeit	Keine Qualitätskontrolle, Kein System zur Qualitätssicherung	Daten von wissenschaftlich anerkannten Institutionen	Normenkonformität nach DIN, ISO etc. Vergleich (Benchmarking), Abstimmung u. Abgleich mit anderen Daten u. Methoden, Peer Review
QMS des Datenerstellers	Kein QMS	Sonstige Systeme zur Qualitätssicherung	QMS nach DIN ISO 9001, KTA 1401, Vorgaben der BGEoder vergleichbar zertifizierte Methode
Wissenschaftliche Qualität	Nur Daten ohne Interpretation	Interner Fachbericht	Veröffentlichung mit Peer Review, Veröffentlichungen, Prüfung durch ein QMS.
Datenumfang und Interpretation	Nur Rohdaten	Zusatzuntersuchungen vorhanden (In-situ-Versuche, Laborversuche, Modellberechnungen etc.) – Daten müssen aufbereitet, neu interpretiert werden	Zusatzuntersuchungen vorhanden (In-situ-Versuche, Laborversuche, Modellberechnungen etc.) – Daten mit Interpretation
Datendokumentation und Vollständigkeit	Daten von Dritten (z. B. interpretierte Daten in einer Publikation)	Originaldaten ohne Metadaten (z. B. Berichte)	Originaldaten mit Metadaten sowie Auswertungen/Interpretationen
Genauigkeit Georeferenzierung Messgenauigkeit	Anfangs-/ Endkoordinaten k. A.	2D-Vermessung, Kalibrierung	3D-Vermessung, Messsysteme geeicht etc.
Vertrauenskegel	Kein Abgleich mit anderen Daten möglich	Vergleich von einer Methode/Datenart	Abgleich verschiedener Daten und unterschiedlicher Methoden

Darüber hinaus können zur Qualitätseinstufung noch zusätzliche Kriterien bzw. ergänzende Qualitätsmerkmale herangezogen werden, um eine Differenzierung zu ermöglichen.

Ergänzende Qualitätsmerkmale:

Neben den generellen Qualitätsmerkmalen (s. Tab. 4) kommen die nachfolgend aufgeführten ergänzenden Qualitätsmerkmale in Betracht:

- Inhaltliche Eignung zur Anwendung im Standortauswahlverfahren (Relevanz), ggf. in Abstufung zum Verfahrensstand, z. B. Art der Daten und ihr Bezug zur Standortauswahl und zu den Abwägungskriterien,
- Aussagekraft/Eignung der Methode,
- Untersuchungsziel – jede Methode wird eingesetzt, um Daten für ein spezifisches Ziel zu erheben. Die Ergebnisse können für die Standortsuche oder die Charakterisierung von Wirtsgesteinen z. T. nur bedingt brauchbar sein. Z. B. liegt bei Bohrungen der Kohlenwasserstoff-Exploration das Ziel im höffigen Horizont. Dadurch liegt der Schwerpunkt der Untersuchungen auf diesem Bereich,
- Zusatzdaten - Absicherung der Daten durch den Vergleich unterschiedlicher Messmethoden und Daten, Behebung von Inkonsistenzen. Ergänzung der Daten durch Informationen, die ggf. eine Bewertung beeinflussen können,
- Alter der Daten – Der Zeitpunkt der Datenerhebung kann ein Qualitätskriterium darstellen, da der Stand von Wissenschaft und Technik und die Methodenentwicklung ggf. vorangeschritten sind. Dabei muss ggf. berücksichtigt werden, ob eine Nachbearbeitung der Originaldaten und dadurch eine Qualitätssteigerung möglich ist,
- Genauigkeit (Messgenauigkeit, Georeferenzierung mit Koordinaten, Vermessung der Bohrung, Genauigkeit der geologischen Ansprache etc.),
- Nachvollziehbarkeit/Vertrauenskegel – die Messung steht im Kontext mit ähnlichen oder anderen Methoden und Ergebnissen. Dadurch kann z. B. die Qualität einer einzelnen Bohrung oder von älteren Untersuchungsergebnissen abgesichert werden.

Aus der Anwendung von Qualitätseinstufungen und -richtlinien nach Normen etc. lässt sich nicht immer eine Beurteilung der wissenschaftlichen Qualität ableiten. Die Beurteilung von Daten für das Standortauswahlverfahren ist wesentlich für die Nachvollziehbarkeit von Entscheidungen in einem Auswahlverfahren. Letztendlich müssen aber alle verfügbaren Daten genutzt werden, um ein möglichst vollständiges Bild eines Teilgebietes zu erhalten oder um die Charakterisierung von Wirtsgesteinen zu ermöglichen.

Darüber hinaus gibt es gerade bei älteren Untersuchungen häufig in den Unterlagen keine Angaben über Qualitätsmerkmale oder die Einhaltung/Anwendung der jeweils gültigen Norm. Sie können trotzdem eine hohe Qualität für die Fragestellungen in der Endlagerung besitzen.

Generell ist bei vielen Methoden, insbesondere geophysikalischen Messungen, eine Qualitätseinstufung schwierig, da häufig keine belastbaren Informationen zu der Zielsetzung und dem Kontext vorliegen, in dem die Messungen durchgeführt wurden. Zahlreiche Methoden werden nach allgemeinen wissenschaftlichen und technischen Standards durchgeführt und können nach diesen beurteilt werden. Bei Spezialuntersuchungen können die folgenden Faktoren zur Qualitätseinstufung verwendet werden:

- Sensitivitätsanalyse,
- Wahl und Einstellung der Parameter,
- Kalibrierung,
- Messprotokolle,
- vollständige Dokumentation,
- Methodenbericht,
- Interpretation der Ergebnisse und
- Eindeutigkeit der Ergebnisse/Aussagekraft.

Daher ist es notwendig, für jede Methode oder jeden Datensatz eine Einzelbewertung zur Qualitätseinstufung durchzuführen.

Ergänzend kann zur Qualitätseinstufung von Daten ihre Relevanz zur Standortsuche oder zur Nutzung der Abwägungskriterien erfolgen (s. Tab. 5). Ggf. kann hierfür auch eine Wichtung von Daten entsprechend ihrer Bedeutung erfolgen.

Tab. 5: Ergänzende Qualitätsmerkmale

Ergänzende Qualitätsmerkmale	Datenqualität		
Relevanz - Teilgebiete	Keine Nur lokal verwendbar z. B. Sonderfazies etc.	Gering Nur eingeschränkt verwendbar z. B. regional spezifisch	Hoch Liegt in einem potenziellen Teilgebiet
Relevanz - Wirtsgesteinscharakterisierung	Keine Nur lokal verwendbar z. B. Sonderfazies etc.	Gut Wirtsgesteins-spezifisch allgemein (z. B. Tonstein)	Hoch Wirtsgesteins-spezifisch und Region (gesichert)
Verifizierung notwendig (Nachbearbeitung, Reprocessing etc.)	Nur Rohdaten	Daten müssen aufbereitet, neu interpretiert werden	Daten vollständig verwendbar

Bei der Bewertung und Auswahl von Teilgebieten könnten die verwendeten Daten ggf. eine Bewertung nach Punkten erhalten.

Darüber hinaus sollten die Qualitätsanforderungen an Daten dem Verfahrensstand angepasst werden. In der Phase 1 werden Daten verwendet, die a priori vorliegen und von den zuständigen Stellen der Länder und des Bundes bereitgestellt werden. Im Zuge der Verwendung dieser Daten sind sie hinsichtlich ihrer Qualität durch den Vorhabenträger zu bewerten. In Vorbereitung von Programmen zur übertägigen und anschließend zur untertägigen Erkundung müssen Qualitätsansprüche mit spezieller Ausrichtung auf die Anwendung bzw. Auswertung dieser Daten für die wiederholte Bewertung der Kriterien und Anforderungen sowie für die Sicherheitsbetrachtungen hergeleitet werden.

Qualitätseinstufung von Bohrungen

Bohrungen sind eine der wichtigsten Informationsquellen bei der Standortsuche, der Standortcharakterisierung und der Charakterisierung des Wirtsgesteins (s. Kap. 3.2). In Deutschland gibt es eine sehr hohe Anzahl von geowissenschaftlichen Bohrungen, die überwiegend in den Bohrdatenbanken der geologischen Landesämter enthalten sind. Sie unterscheiden sich wesentlich durch ihre Zielsetzungen (Tab. 6). Davon hängen u. a. Bohrmethode, Teufe, Art, Umfang und fachlicher Anspruch an die Aufnahme sowie der ergänzenden Untersuchungen ab. Diese Merkmale können auch für die Qualitätseinstufung und den Nutzwert einer Bohrung für die Endlagerung herangezogen werden. Unabhängig von der Qualität können Bohrungen die Anwendung von Mindestanforderungen und Ausschlusskriterien erleichtern, da sie wesentliche Informationen zu einem geologischen Umfeld liefern.

Tab. 6: Zielsetzung von Bohrungen als Qualitätsmerkmal

Bohrungstyp/Ziel	Vorteile	Nachteile
Forschungsbohrungen, Erkundungsbohrungen (Endlagerung), wissenschaftliche Tiefbohrungen (z. B. KTB)	Qualitativ hochwertige, umfangreiche Untersuchungen, sehr gute Dokumentation, umfangreiche und qualitativ hochwertige Datenbasis	Standortbezogen (Konrad, Morsleben, Gorleben), geringe Anzahl, ggf. nicht in relevanten Gebieten
Explorations- und Produktionsbohrungen, Geothermie, Energie- und mineralische Rohstoffe	Erfassung der über- und unterlagernden Schichtenfolgen, zahlreiche Bohrungen, allgemeine Basisinformationen zur regionalen Geologie	Zielbereiche u. U. permeables Gebirge, Endteufe meist bevorzugter Erkundungshorizont, Detaillierungsgrad der Schichtenverzeichnisse abhängig von der Zielsetzung der Bohrung (generelle Aussagen nicht machbar, da Anforderungen an die Aufnahmen der Bohrungen individuell), wenig Zusatzuntersuchungen, Bohrungen auf lokale Vorkommen beschränkt
Technische Bohrungen (Industrie), Hydrogeologische Bohrungen, Ingenieurgeologische Bohrungen etc.	Bohrungsabhängige Detailinformationen	Meist oberflächennah

Im Rahmen der Qualitätseinstufung muss für die Standortsuche zuerst eine Vorauswahl getroffen werden, um alle nicht relevanten Bohrungen herauszufiltern. Das betrifft i. d. R. einen Großteil der technischen, oberflächennahen Bohrungen. Hierfür ist eine Mindestteufe festzulegen, bzw. welche lithologischen oder stratigraphischen Abfolgen von Bedeutung sind.

Je nach Wirtsgestein sind dabei noch weitere Eigenschaften von Bedeutung, z. B. stratigraphische Einheiten oder Abfolgen mit besonderen Eigenschaften, Klüfte und Störungen, das Vorkommen von Rohstoffen etc.

Die Qualitätsbeurteilung von Bohrungen sollte die in Tab. 7 dargestellten Punkte berücksichtigen, die jeweils für sich beurteilt werden können.

Tab. 7: Qualitätsmerkmale von Bohrungen

Qualitätseinstufung von Bohrungen			
Bohrung	Weniger/bedingt geeignet	geeignet	Sehr geeignet
Ziel der Bohrung	Technische Bohrung (z. B. Baugrunduntersuchung)	Explorations-, Produktions- und Forschungsbohrungen	Bohrungen zu Endlagerfragen
Information	Ausschließlich Informationen zur Bohrung	zusätzliche Informationen Logs etc.	Informationen als Grundlage für die weitere Bearbeitung Bohrkern u. a. Proben
Bohrverfahren	Indirekte Verfahren (Spülbohrung etc.)	Bohrungen mit geophysikalischen Bohrungslogs	Gekernte Bohrungen und Logging
Vermessung/Koordinaten	Bohrpunkt	Anfangs-/Endkoordinaten	3D-Vermessung
QS	Kein QS	Anwendung der aktuellen Normen	QS Stand von Wissenschaft und Technik und Norm
Alter der Bohrungen ⁵	bis ca. 1950	ca. 1950 – 2000	nach ca. 2000
Dokumentation	Unvollständige Dokumentation	Analoge Dokumentation, Datenaufbereitung notwendig	Digitale aufbereitete Dokumentation
Schichtenverzeichnis	Indirektes Schichtenverzeichnis	Kurzschichtenverzeichnis	Schichtenverzeichnis mit detaillierter Schichtenbeschreibung
Nachweis der stratigraphischen/lithologischen Grenzen	geophysikalisch	Lithologie	Mikrofossilien, eindeutige Grenze (z. B. Transgressionshorizont)
Teufe (> 100 m)	Deckgebirge	Wirtsgestein	Unterlagernde Schichten
Vertrauenskegel	Geringe Anzahl von Bohrungen	Ausreichende Anzahl von Bohrungen/Seismik	Teil eines 3D-Modells

Die Jahreszahlen in der Tabelle sind nicht als absolut anzusehen, sondern als Eckpunkte für zeitlich bedingte Fortschritte zum Stand von Wissenschaft und Technik und Fortschritte in der technischen Dokumentation sowie der Speicherung von Daten (analog/digital). Beispiele sind die Vermessung oder die Abweichung vom geradlinigen Bohrverlauf sowie unvollständige Unterlagen.

In Bohrungen und an Bohrkernen werden häufig Zusatzuntersuchungen durchgeführt, die zu einer wesentlichen Qualitätssteigerung des Untersuchungsergebnisses führen (Tab. 8).

⁵ Das Alter der Bohrung kann u. U. von Bedeutung sein.

Tab. 8: Zusatzinformationen zu Bohrungen

Qualitätseinstufung von Bohrungs-Zusatzuntersuchungen			
Methode	Weniger/bedingt geeignet	geeignet	Sehr geeignet
Bohrlochmessungen (Logs)	keine	Standard	umfangreiches Programm
Probennahme in den Bohrungen (z. B. Wasserproben)	keine	Standard	umfangreiches Programm
Proben aus Bohrkernen	keine	Standard	umfangreiches Programm
Laboruntersuchungen (z. B. geomechanische Untersuchungen)	keine	Standard	umfangreiches Programm
Sonstige/Spezialuntersuchungen (z. B. Altersbestimmung)	keine	Standard	umfangreiches Programm
Seismik (s. Tab. 7)	keine	2D-Seismik	3D-Seismik

Seismik

Anhand seismischer Untersuchungen lassen sich Reflektoren, die relevanten Schichteinheiten zugewiesen wurden, und tektonische Elemente auf einer größeren räumlichen Skala ausweisen. Generell lässt sich eine Qualitätseinstufung nach Tab. 9 vornehmen. Darüber hinaus müssen für seismische Messungen die o. a. Qualitätskriterien angewendet werden.

Tab. 9: Qualitätseinstufung von reflexionsseismischen Messungen

Methode	Qualitätsrelevante Eigenschaften		
Seismik	2D-Seismik Alt ohne Metadaten	2D-Seismik (mit Metadaten) Reprozessing möglich	3D-Seismik (mit Metadaten)

3.6 Anforderung an die Datenaufbereitung (A 8.6)

Die Schaffung einer geeigneten gemeinsamen Datenumgebung mit weitestgehend generalisierten Datenformaten zur organisierten Ablage und zum verlustfreien Austausch der Daten ist die Grundlage für eine effiziente und nachvollziehbare Analyse der Daten.

Eine Ermittlung und Bewertung von Teilgebieten entsprechend den geowissenschaftlichen Abwägungskriterien § 24 StandAG erfordert die Parametrisierung von Gesteinstypen in den nach Anwendung von Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen verbleibenden Gebieten, insbesondere der dort vorkommenden Wirts- und Barrieregesteine. Basierend auf den Erkenntnissen aus den vorhergehenden Kapiteln (3.1-3.5) werden dafür praxisnahe Verfahren mit Anforderungen zur Aufbereitung von Daten empfohlen.

Die Notwendigkeit einer Datenaufbereitung zur Parametrisierung von Gesteinstypen resultiert aus der Bereitstellung von geologischen Daten durch eine Vielzahl von zuständigen Landesbehörden, die vom Vorhabenträger zusammenzuführen und aufzubereiten sind (Bundestag 2017). Dafür sollten Techniken und Maßnahmen berücksichtigt werden, die einem partizipativen, wissenschaftsbasierten und transparenten Verfahren dienen (vgl. § 1 Abs. 2 StandAG).

Die Ermittlung und Bewertung von Teilgebieten erfolgt in den verbleibenden Gebieten, die das Ergebnis der Anwendung der Ausschlusskriterien und Mindestanforderung (§§ 22, 23 StandAG) sind (Bundestag 2016). Die grundlegenden geowissenschaftlichen Informationen zur Bestimmung der Suchräume entsprechend §§ 22, 23 StandAG sind zu dokumentieren (vgl. § 13 Abs. 2 StandAG). Für die Bewertung der geologischen Gesamtsituation auf Grundlage der Kriterien des § 24 StandAG sollte diese Dokumentation konsistent fortgeschrieben werden. Mit einer fortgesetzten Zusammenführung und Interpretationen aller relevanten geowissenschaftlichen Informationen (Geodaten) soll eine plausible Darstellung der Geologie entsprechend des aktuellen Kenntnisstandes in den Suchräumen geschaffen werden. Die aktualisierten und verdichteten Kenntnisse der geologischen Situationen in den Suchräumen ermöglicht die Anwendung und Bewertung der Abwägungskriterien in ebendiesen Gebieten. Zugleich bilden sie die Grundlage für die vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen (§§ 14, 27 StandAG) in den Teilgebieten, die eine günstige geologische Gesamtsituation erwarten lassen.

Dieses Vorgehen erfordert eine systematische, dauerhafte Datenspeicherung. Die von der BGE bei den zuständigen Stellen des Bundes und der Länder erhobenen Geodaten können unmittelbar gewonnene Primärdaten oder weiter bearbeitete Sekundärdaten darstellen. Bei den aufzubereitenden Geodaten handelt es sich um raumbezogene Daten mit einem fachlichen Bezug wie z. B. Messungen zur hydraulischen Durchlässigkeit von Gesteinsabfolgen in einem Bohrloch. Diese Messwerte können von den verschiedensten Institutionen, mit unterschiedlichen Methoden und zu diversen Zwecken aufgenommen worden sein. Demzufolge ist zu erwarten, dass einerseits die Messwertdarstellungen ausgesprochen vielseitig und andererseits die Methoden, die zur Anwendung gekommen sind, unterschiedlich sind.

Daher sind neben den eigentlichen Messdaten die Metadaten von besonderer Bedeutung für eine qualifizierte Synthese. Die Metadaten enthalten Beschreibungen zur Einordnung der Messdaten und verfügbaren Datensätzen. Es sind i. W. Angaben zum räumlichen und zeitlichen Bezug sowie zur Entstehung der Messdaten oder zu den relevanten Geodatenspeichern (Datenprovenienz). Des Weiteren sind Angaben über die Tiefenlage der Messwerte relevant. Die Kenntnisse dieser Sachverhalte sind die Voraussetzungen für Normierung (z. B. einheitliches Bezugssystem), Korrekturoperationen

(z. B. Bohrlochverlaufsmessungen liegen vor oder wurden nicht durchgeführt) oder Vereinheitlichung unterschiedlicher Messgrößen (z. B. Angaben zur hydraulischen Durchlässigkeit wie hydraulische Durchlässigkeit und Permeabilität). Damit wird die Vergleichbarkeit und Auswertung verschiedener Datensätze gefördert sowie Grundlagen für die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse geschaffen.

Die unterschiedlichen Bezugspunkte wie m NN, Teufe, Sohlenbezeichnungen in Bergwerken, Bohrlänge oder Rasenhängebank sind auf einen für die weitere Bearbeitung der Daten festgelegten Bezug zu normieren. Besondere Beachtung ist der Tiefenangabe von Bohrspaden zu widmen. Da Bohrungen nicht exakt geradlinig verlaufen, sind, soweit vorhanden, Bohrlochverlaufsmessungen auszuwerten und die Messdaten den wahren Tiefenlagen zuzuordnen (Datenkorrektur). Die Auswirkungen von Abweichungen zwischen Bohrlochlänge und wahrer Tiefe kann u. U. relevant bei der weiteren Bearbeitung der Daten sein.

Die systematische Datenaufbereitung ist Grundlage für eine verständliche Visualisierung und Dokumentation von entscheidungserheblichen Tatsachen und Erwägungen bei der Ermittlung und Abwägung der Teilgebiete. Die bereitgestellten Informationen können z. T. einen unterschiedlichen Gehalt bzw. Detailierungsgrad bezüglich der vorgesehenen Anwendung aufweisen. D. h., die Informationen könnten direkt verwendet werden (beispielsweise eine Schichtgrenze in einer Bohrung) oder die Informationen dienen der Bestimmung oder Verifizierung von charakteristischen Merkmalen (bspw. geophysikalische Messungen) oder diese sind Teil einer Datengrundlage für eine begründete Einschätzung eines Merkmals (bspw. Übertragung von Mineralgehaltsbestimmungen im Labor; vgl. Kap. 3.2). Daher beinhaltet die systematische Datenaufbereitung sowohl Methoden der Vervollständigung als auch der Reduktion der gegebenen Vielfalt von Daten des Untergrundes.

Neben der Standardisierung von Datenformaten sind auch Angaben zur Provenienz mit den Daten zu verknüpfen. An die Ermittlung und Bewertung der Daten schließt sich die Bereinigung und Prüfung der Daten an. Wichtige Aufgaben sind hier u. a. die Entfernung von irrelevanten Daten wie Duplikaten oder Ausreißern, die Anpassung der Daten an ein standardisiertes Format zur möglichst einfachen Übernahme in eine Datenbank, Konsistenzprüfungen und die Maskierung privater oder sensibler Dateneinträge. Um die spezifischen Informationen zu extrahieren, sind aufgabenbezogen und dem Stand des Auswahlverfahrens entsprechend, geeignete qualitative oder objektiv-quantitative Analyseverfahren heranzuziehen. Dies kann durch eine Auswahl oder durch eine Verknüpfung von Datensätzen erfolgen, die im Hinblick auf ein gefordertes Merkmal (bspw. Gebirgsdurchlässigkeit) eine signifikante Korrelation miteinander haben könnten (vgl. Tongehalt und Durchlässigkeit (Hoth et al. 2007)). Daraus folgt, dass auch der zugrunde gelegte Methodensatz zur Ermittlung von Werten, entsprechend den Kriterien des StandAG, die Anforderungen an die Datenaufbereitung prägt.

Für die Zusammenführung und Interpretationen der Geodaten wird ein Vorgehen zur Datenaufbereitung, inklusive Dateninterpretation und -dokumentation, vorgeschlagen, das zunächst großräumige Strukturen erfasst, dann Datenanalysen bzw. -interpretationen zur Beschreibung relevanter Gesteinstypen berücksichtigt und letztlich zu einer zusammenfassenden geologischen Modellbeschreibung eines Gebietes hinführt.

Es wird vorgeschlagen, Methoden der Geoinformatik mit denen der klassischen geologischen Beschreibung zu verknüpfen, mit dem Ziel spezielle Abfragen auf den aufbereiteten Datensatz anzuwenden, um den räumlichen Zusammenhang sicherheitsrelevanter Parameter der Gesteinskörper und weiterer Sachthemen qualitativ und quantitativ erfassen und darstellen zu können. Dies betrifft die geologischen Eigenschaften von Komponenten des Endlagersystems sowie geologische Prozesse im Endlagersystem, die einen sicheren Einschluss der Radionuklide in einem Endlager gewährleisten. Die Datenaufbereitung muss auf die Bedürfnisse eines Datenmanagementsystems ausgerichtet sein, dass sowohl der Bewertung der nach §§ 22 – 24 StandAG vorgegebenen Mindestanforderungen und Kriterien, als auch den auf der Grundlage von § 27 StandAG und einer Rechtsverordnung nach § 27 Absatz 6 StandAG durchzuführenden Sicherheitsuntersuchungen gerecht wird. Auf den letztgenannten Punkt wird in dieser Ausarbeitung nicht weiter eingegangen.

Informationen, die in Form von Berichten und Karten vorliegen und daher auf einer komplexen Interpretation von Basisdaten beruhen, sollten als aktueller Kenntnisstand anerkannt werden. Dieses Prinzip entspricht der Forderung des § 12 Abs. 3 StandAG, die vorhandenen Informationen der zuständigen Landesbehörden zu nutzen. Jedoch können aus der Berücksichtigung der im § 1 Abs. 2 StandAG genannten Stichworte „Transparenz“ und „selbsthinterfragend“ zusätzliche Aufgaben an die Datenaufbereitung resultieren:

- A: Synthese des bestehenden Kenntnisstandes (Daten-/Kartenkompilation, sprachlich vereinheitlichte geologische Beschreibungen).
- B: Referenzdatensätze zur Verifizierung des Kenntnisstandes erstellen (z. B. Referenzprofile, Richtschnitte).
- C: Neubewertung der geologischen Informationen (Bestandsdaten und neu gewonnene Daten) im Rahmen der übertägigen Erkundung von Standortregionen und der sich daran anschließenden untertägigen Standorterkundungen.

Mit dem Vorgehen können sowohl Punkt A als auch Punkt B als Anforderungen an die Datenaufbereitung berücksichtigt werden. Insbesondere die Erstellung von Referenzdatensätzen (Punkt B) optimiert die qualitätsgerichtete Auswertung der vorliegenden Datensätze. Der Punkt C wird hier nicht betrachtet, da dieses Vorgehen für die Ermittlung und Bewertung der Teilgebiete im StandAG nicht vorgesehen ist (vgl. § 13 Abs. 2 StandAG).

Für die Aufgaben von Punkt A sollten die verfügbaren Daten und Informationen so verarbeitet werden, dass eine Verbreitung von Wirts- und Barrieregesteinen⁶ vereinfacht als Gesteinskörper mit durchgehend gleichmäßigen Eigenschaften dargestellt werden kann, die in einem lateral und vertikal abgegrenzten Gebirgsbereich vorkommen. Solch ein geologisches Modell mit stark fokussiertem Informationsgehalt würde Informationen enthalten, die der räumlichen Charakterisierung relevanter Gesteinskörper dient, z. B. Ausdehnung, Anordnung und Tiefenlage. Insbesondere zu Beginn eines zielgerichteten Standortauswahlverfahrens besitzen diese Informationen, als früh erkennbare Merkmale einer günstigen geologischen Gesamtsituation, eine hohe Bedeutung für die Einschätzung der geologischen Verhältnisse (Deutscher Bundestag 2017).

Für die Datenaufbereitung mit Blick auf die nachvollziehbare Ausweisung von Teilgebieten wird daher eine Festlegung auf kartierbare geologische Einheiten empfohlen, die potenzielle Barrieregesteine enthalten könnten, deren Eigenschaften anhand zugeordneter geophysikalischer und geologischer Daten im Abwägungsprozess geprüft und bewertet werden können. Solch eine kartierbare geologische Einheit ist durch Leit-Horizonte (Marker-Horizonte) abgrenzbar, mit denen vorhandene geologische Aufschlüsse korreliert bzw. in räumliche Beziehung gesetzt werden können. Für den Punkt B könnte diese Art der Datenaufbereitung die Erarbeitung von Referenzdatensätzen zur Verifizierung der verwendeten Datensätze ermöglichen. Werden diese Datengrundlagen für die Ermittlung und Bewertung von Teilgebieten verwendet, so sollte die geologisch-geophysikalische Aussagenschärfe zu den Gegebenheiten im Untergrund erläutert werden.

Für die Festlegung und die Benennung kartierbarer geologischer Einheiten wird empfohlen, sich zunächst an den Arbeiten der Deutschen Stratigraphischen Kommission zu orientieren, konkret an der Stratigraphischen Tabelle von Deutschland inklusive den Erläuterungen (Menning 2018). Darüber hinaus sollten für die Kartierung des tieferen Untergrundes regional vorkommende reflexionsseismische Horizonte genutzt werden. Diese resultieren aus markanten lithologischen Wechsellagen in der Schichtenfolge des Untergrundes. Entsprechende zusammenfassende Interpretationen befinden sich beispielsweise im Geotektonischen Atlas von Nordwestdeutschland (Baldschuhn et al. 2001) und dem Regionalen Kartenwerk der Reflexionsseismik (Reinhardt 1968-1991). Die Datenaufbereitung dieser Art der Datengrundlagen hat insbesondere die Aufgabe die Vergleichbarkeit der Informationen zu gewährleisten (z. B. Processing-Methoden zur Zeit-Tiefen-Wandlung).

Beim Wirtsgestein Kristallin sollten bei oberflächennahen oder anstehenden Vorkommen insbesondere tektonostratigraphische Informationen zur Erfassung bzw. Begrenzung kristalliner Kernbereiche ausgewertet werden. Das sind Informationen, z. B. der Deformationsgrad, die der räumlichen und zeitlichen Gliederung von Kristallinkomplexen dienen.

⁶ Die Gebirgsbereiche, die die Mindestanforderungen nach § 23 des StandAG erfüllen.

Mit einer derart aufbereiteten Datengrundlage kann in der frühen Phase des Auswahlverfahrens eine Einschätzung von Gebirgsbereichen erfolgen, die potenziell geeignete Wirts- und Barrieregesteine enthalten könnten. Mit dieser Einschätzung können Teilgebiete innerhalb der Suchräume ermittelt werden und Wirts- und Barrieregesteine kartographisch dargestellt werden (Verbreitung, Tiefenlage und Mächtigkeit) sowie der Kenntnisstand erläutert werden.

Die Darstellung der geologischen Lagerungsverhältnisse sowie die geologische Erläuterung zu den Eigenschaften der sicherheitsrelevanten Gesteinskörper sind zusammen mit der zusätzlichen Erfassung schichtbezogener Daten Grundlagen der weiteren Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien.

Für die detaillierte Charakterisierung geologischer Schichten entsprechend den Anforderungen des StandAG gelten spezielle Anforderungen an die Datenaufbereitung, die häufig eine erneute Datenanalyse und die Kombination von Datensätzen zur Informationsgewinnung beinhalten. Dabei sind Informationen zu extrahieren, mit denen Homogenbereiche (Gesteinstypen) innerhalb der Gesteinskörper bestimmt werden können. Homogenbereiche bzw. Gesteinstypen sind Gesteinsbereiche, für die einheitliche Materialeigenschaften angenommen werden können und die im besten Falle einer Wertungsgruppe zuzuordnen sind. Dabei ist zu beachten, dass geophysikalische Messungen meist nur indirekt mit physikalischen Gesteinseigenschaften verknüpft werden können, dass das Auflösungsvermögen für die Gesteinsheterogenität begrenzt ist und oft eine Mehrdeutigkeit der Messergebnisse gegeben ist. Der wesentliche Vorteil der Erfassung von Homogenbereichen mit ihren Merkmalen ist, dass die Übertragbarkeit von Eigenschaften auf den Gesteinstyp geprüft werden kann.

Eine Empfehlung für die weitergehende Ermittlung und Bewertung der Teilgebiete ist, sich auf die Aufbereitung von Informationen zur Genese der Wirts- und Barrieregesteine, generell auf die regionale tektonische Entwicklung und zusätzlich bei Ton- und Salzgestein auf die sedimentäre und diagenetische Prägung zu fokussieren.

Um geeignete Such- und Analysefunktionen aufbereiteter Daten in Datenbanken vorzuhalten, sind bereits bei der Datenaufbereitung konzeptionelle Überlegungen zur Struktur und zum Aufbau geeigneter Datenbanken anzustellen. Die Ableitung von Anforderungen an eine Datenbank oder ein Datenbanksystem für die Auswertung der Geodaten im Standortauswahlverfahren ist ausgesprochen aufwändig und nicht Bestandteil der Leistungsbeschreibung. Aus diesem Grund wird an dieser Stelle lediglich auf die Notwendigkeit der Erstellung eines Datenbanksystems für die Vorhaltung der aufbereiteten Daten hingewiesen. Strukturelle Überlegungen zum Datenbanksystem sind frühestmöglich anzustellen, um eventuelle Nachbearbeitungen der Daten möglichst zu vermeiden.

4 Methoden der Abwägung (A 9)

Auf internationaler Ebene werden von der IAEA, der OECD NEA und der ICRP Empfehlungen und Standards zur Bewertung der Langzeitsicherheit von Endlagern für radioaktive Abfälle entwickelt und veröffentlicht (IAEA 2015, 2011, 2012; NEA 2007; ICRP 2013). Darauf aufbauend erfolgt auf nationaler Ebene die Umsetzung dieser Standards. Dabei ist die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen der in den meisten Staaten favorisierte Entsorgungsweg. Grundsätzlich sehen die nationalen Entsorgungsprogramme kriteriengestützte Suchverfahren zur Auswahl von Endlagerstandorten vor. Um einen Überblick über Auswahlverfahren für Endlagerstandorte in anderen Staaten, insbesondere mit Blick auf die Vorgabe von Abwägungskriterien und deren Anwendung in einer Abwägungsmethode zu erhalten, wurden umfangreiche Literaturrecherchen durchgeführt. Aus den Recherchen geht hervor, dass international in allen Verfahren zur Standortauswahl Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen angewendet werden. Häufig kommen auch geowissenschaftliche Anforderungen und Kriterien zur Anwendung, die beispielsweise von der EKRA (EKRA 2000) und dem AkEnd (AkEnd 2002) hergeleitet und dokumentiert wurden. Jedoch wird ein Auswahlverfahren unter Anwendung von Abwägungskriterien in ähnlicher/vergleichbarer Form, wie es in Deutschland nach § 24 StandAG vorgegeben ist, bis jetzt nur in der Schweiz praktiziert. Daher beschränken sich die folgenden Ausführungen auf das Schweizer Verfahren zur Standortauswahl. Ausführungen zu weiteren recherchierten internationalen Verfahren befinden sich in Anhang 3.

Das Schweizer Standortauswahlverfahren (Sachplan geologische Tiefenlager [SGT](BFE 2011)) zur Suche jeweils eines Endlagers für hochradioaktive und alphatoxische Abfälle (HAA) sowie schwach- und mittelradioaktive Abfälle (SMA) begann im April 2008. Zurzeit finden übertägige Erkundungen in den ausgewählten Standortgebieten statt.

Das Verfahren sieht eine kriteriengestützte Suche nach einem Standort vor. Auswahlverfahren, Auswahlkriterien, Einengungsschritte, Beteiligungsverfahren und Art des letztendlichen Genehmigungsverfahrens wurden vor Beginn des Verfahrens detailliert festgelegt. Es gilt das Primat der Sicherheit, wobei die Freiwilligkeit betroffener Gebietskörperschaften nicht Voraussetzung für die Standortauswahl ist. Der Sicherheit nachgeordnet sind Aspekte der Raumnutzung, Ökologie, Wirtschaft und Gesellschaft. Am Ende des Auswahlverfahrens reicht die Nagra das Rahmenbewilligungsgesuch⁷ ein. Der Bundesrat entscheidet über die Rahmenbewilligung. Nach erteilter Rahmenbewilligung genehmigt die Schweizer Bundesversammlung die Rahmenbewilligung. Diese Genehmigung untersteht einem fakultativen Referendum. Bereits im Verlauf des Auswahlverfahrens werden die Belange Betroffener durch ein umfangreiches und intensives Beteiligungsverfahren berücksichtigt.

⁷ Am Ende der Etappe 3 erfolgt das nach Artikel 12 Kernenergiegesetz (KEG 2003) für Kernanlagen erforderliche Bewilligungsverfahren.

Höchste Priorität bei der Standortauswahl hat die sicherheitstechnische Qualität des Endlagers. Dazu werden in einem mehrstufigen Verfahren die in Frage kommenden Gebiete, unter Anwendung sicherheitsorientierter Kriterien, für die schrittweise Einengung mit Hilfe von Indikatoren beurteilt und bewertet. Zudem fließen die Ergebnisse quantitativer provisorischer Sicherheitsanalysen in die Gesamtbewertungen der jeweiligen Etappen ein.

Der Schweizer Sachplan geologische Tiefenlager stellt somit ein gutes Beispiel für ein komplexes mehrstufiges und modernes Auswahlverfahren dar, das ergebnisoffen ist und eine frühzeitige umfangreiche Beteiligung vorsieht. Das in der Schweiz angewendete Einengungsverfahren wird nachfolgend in Kapitel 4.1 skizziert. Dabei wird insbesondere auf das Vorhandensein von Indikatoren und deren Anwendung eingegangen. In Kapitel 4.2 erfolgt die Diskussion der Einengungsmethode in der Schweizer Standortauswahl mit Blick auf die Anwendung von Indikatoren.

Neben der qualitativen und quantitativen kriteriengestützten Vorgehensweise (Bewertung von Indikatoren hinsichtlich der Sicherheit und bautechnischen Machbarkeit) sieht der Sachplan die Durchführung und Bewertung provisorischer Sicherheitsanalysen vor, deren Ergebnisse in den sicherheitstechnischen Vergleich einfließen. Darüber hinaus werden sozioökonomische und raumplanerische Aspekte bei der Einengungsprozedur berücksichtigt. Sowohl auf die provisorischen Sicherheitsanalysen als auch auf die sozioökonomischen und raumplanerischen Aspekte wird in diesem Kapitel nicht näher eingegangen.

4.1 Übersicht über das Einengungsverfahren im Schweizer Sachplanverfahren Geologische Tiefenlager (A 9.1)

Das Vorgehen bei der Standortauswahl in der Schweiz beruht auf dem „Sachplan geologische Tiefenlager (SGT)“ (BFE 2008) und (BFE 2011). Die Nagra als Entsorgungspflichtiger wendet ein komplexes Auswahlverfahren an, das sich in drei Etappen gliedert:

1. Etappe 1: Auswahl von geologischen Standortgebieten für je ein geologisches Tiefenlager für SMA und für HAA⁸.
2. Etappe 2: Auswahl von mindestens zwei Standorten für je ein geologisches Tiefenlager für SMA und für HAA.
3. Etappe 3: Standortwahl und Rahmenbewilligungsverfahren für je ein geologisches Tiefenlager für SMA und für HAA.

⁸ Bei geeigneten geologischen Situationen ist der Nagra grundsätzlich auch die Möglichkeit gegeben, ein Endlager für alle Abfallkategorien (sogenanntes Kombilager) vorzuschlagen.

In jeder Etappe erfolgt eine Evaluation in mehreren Schritten, jeweils durch die Anwendung von Kriterien zur Sicherheit und technischen Machbarkeit und eine Bewertung der erzielten Ergebnisse mit dem Ziel der Einengung auf geeignete Standortgebiete und später auf Standorte.

Der aktuelle Stand des Verfahrens in Deutschland entspricht der Etappe 1 des Schweizer Verfahrens. Aus diesem Grund bezieht sich hier die Beschreibung des Schweizer Verfahrens im Wesentlichen auf die Etappe 1. Die Darstellung der Indikatorbewertung der Etappe 2 beschränkt sich auf Besonderheiten und Präzisierungen gegenüber der Etappe 1. Die zweite Etappe des Schweizer Verfahrens der Standortsuche für geologische Tiefenlager für radioaktive Abfälle ist bereits abgeschlossen. Da das Sachplanverfahren Schweizer Tiefenlager derzeit am Anfang von Etappe 3 steht, wird diese Etappe im vorliegenden Bericht nicht weiter betrachtet. Der Bundesrat hat in seiner Sitzung vom 21.11.2018 entschieden, dass die drei Standortgebiete Jura Ost (Kanton Aargau), Nördlich Lägern (Kantone Aargau und Zürich) und Zürich Nordost (Kantone Thurgau und Zürich) in der folgenden dritten Etappe weiter untersucht werden sollen (UVEK 2018). Das Auswahlverfahren in der ersten Etappe wird mit Blick auf die Bewertung von Indikatoren u. a. im NTB 08-03 (Nagra 2008b) detailliert erläutert (siehe auch BGR 2015). Das betrifft die „Vorgaben aus dem Sachplan geologischer Tiefenlager“, die Einengungsmethodik, die Erläuterung der angewendeten Kriterien und der verwendeten Indikatoren sowie die vergleichenden Bewertungen anhand von Bewertungsskalen (mit den Attributen sehr günstig, günstig, bedingt günstig, ungünstig), die zum Vorschlag potenzieller Standortgebiete führen. Wird im nachfolgenden Text kein anderer Bezug definiert, beziehen sich alle verfahrenstechnischen Beschreibungen auf den Bericht NTB 08-03. Die sicherheitsbezogenen Grundlagen sowie die erdwissenschaftlichen Grundlagen sind in den Referenzberichten NTB 08-05 (Nagra 2008a) und NTB 08-04 (Nagra 2008c) dokumentiert.

Etappe 1

In der Etappe 1 erfolgt die Festlegung der Standortgebiete nach den Vorgaben des SGT sowie den sicherheitstechnischen Vorgaben des ENSI.

Das Verständnis des Vorgehens im Einengungsverfahren setzt einige Begriffserklärungen voraus, die im Folgenden umrissen werden. Für die Standortevaluation werden gemäß SGT vier Kriteriengruppen vorgegeben, denen 13 Kriterien zugeordnet sind, die entsprechend ihrer Funktion und Bedeutung für die Langzeitsicherheit und Machbarkeit des Tiefenlagers von Bedeutung sind (Abb. 2).

Kriteriengruppe	Kriterien
1. Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches	1.1 Räumliche Ausdehnung 1.2 Hydraulische Barrierenwirkung 1.3 Geochemische Bedingungen 1.4 Freisetzungspfade
2. Langzeitstabilität	2.1 Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften 2.2 Erosion 2.3 Lagerbedingte Einflüsse 2.4 Nutzungskonflikte
3. Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen	3.1 Charakterisierbarkeit der Gesteine 3.2 Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse 3.3 Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen
4. Bautechnische Eignung	4.1 Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen 4.2 Untertägige Erschließung und Wasserhaltung

Abb. 2: Kriteriengruppen und Kriterien zur Standortevaluation nach SGT 2011

Die Kriterien werden durch zu beurteilende Aspekte beschrieben. Dabei sind unter zu beurteilenden Aspekten Systemeigenschaften und Zusammenhänge zu verstehen, die in ihrer Gesamtheit ein Kriterium beschreiben (s. Abb. 3).

<i>Kriteriengruppe</i>	1 Eigenschaften des Wirtgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches
<i>Kriterium</i>	1.1 Räumliche Ausdehnung
<i>Zu beurteilende Aspekte</i>	Beurteilt wird das räumliche Eignungspotential (Mächtigkeit, laterale Ausdehnung, Verbreitung) und die Tiefenlage des Wirtgesteinskörpers bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches unter Berücksichtigung der regionalen geologisch-tektonischen Verhältnisse (z. B. regionale Störungszonen, glazial übertiefte Talrinnen, Fremdgesteinseinschlüsse). In die Beurteilung einzubeziehen sind auch der erforderliche Platzbedarf des Tiefenlagers (inkl. Reserve), das Platzangebot sowie die Flexibilität bei der Anordnung der untertägigen Lagerkavernen und -stollen.
<i>Relevanz für die Sicherheit</i>	Günstig sind Verhältnisse, bei welchen das Wirtgestein bzw. der einschlusswirksame Gebirgsbereich derart beschaffen und ausgedehnt ist, dass die Radionuklide grösstenteils im Wirtgestein bzw. im einschlusswirksamen Gebirgsbereich zurückgehalten werden.

Abb. 3: Zusammenhang zwischen Kriteriengruppe, Kriterium und zu beurteilende Aspekte am Beispiel des Kriteriums „Räumliche Ausdehnung“ (BFE 2011)

Mit Hilfe von insgesamt 49 Indikatoren werden die zu beurteilenden Aspekte beurteilt und bewertet. Unter Indikatoren werden direkte oder indirekte Messgrößen für Kriterien und zu beurteilende Aspekte verstanden (s. Abb. 4).

Schritt	Zu beurteilende Aspekte	Zugeordnete Kriterien gemäss Tabelle 1	Relevante Indikatoren für die Umsetzung
3. Identifikation geeigneter geologisch-tektonischer Grossräume	Einfluss Erosion	2.2 Erosion	Grossräumige Erosion im Betrachtungszeitraum

Abb. 4: Zusammenhang zwischen „Zu beurteilende Aspekte“ und „Relevanten Indikatoren“ am Beispiel des Kriteriums „Erosion“ (BFE 2011)

Gemäss Sachplan gliedert sich die erste Etappe in die folgenden 5 Schritte:

1. Zuteilung der Abfälle auf die beiden Lager (SMA und HAA),
2. Sicherheitskonzept für die Lager und Bestimmung der Anforderungen an die Geologie,
3. Identifikation geeigneter geologisch-tektonischer Großräume,
4. Identifikation potenziell geeigneter Wirtsgesteine und
5. Identifikation von Wirtsgesteinsvorkommen in geeigneter Anordnung, Tiefenlage, Mächtigkeit.

Basierend auf der vorgenommenen Zuteilung der Abfälle auf das HAA-Lager und das SMA-Lager (Schritt 1 in Etappe 1) werden das Barrieren- und Sicherheitskonzept definiert und die Anforderungen an die standortbezogenen geologischen Verhältnisse festgelegt (Schritt 2). Schritt 2 beinhaltet weiterhin die quantitativen Anforderungen an das Wirtsgestein und die Geosphäre (Tiefenlage, Mächtigkeit, laterale Ausdehnung und hydraulische Durchlässigkeit des Wirtsgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs). Die qualitative Bewertungsskala für die Kriterienanwendung umfasst die Einstufungen sehr günstig / günstig / bedingt günstig / ungünstig. Der Bewertungsmaßstab wird in Bezug auf die Ergebnisse der generischen Sicherheitsbetrachtungen sowie, gestützt auf Erfahrungswerte für die betreffende Eigenschaft, erläutert. Die zusammenfassende Bewertung der Standortgebiete ist auf einer entsprechenden qualitativen Bewertungsskala der Eignung (sehr geeignet / geeignet / bedingt geeignet / weniger geeignet) darzustellen.

Im Schritt 3 sind zur Identifikation geeigneter geologisch-tektonischer Großräume, welche den sicherheitstechnischen Anforderungen genügen, die folgenden Kriterien und Aspekte zu berücksichtigen und zu bewerten:

- Großräumige Erosion,
- Langzeitstabilität: differenzielle Bewegungen, neotektonische Aktivität und Seismizität,

- Prognostizierbarkeit der möglichen Langzeitveränderungen und
- großräumige geologisch-tektonische Komplexität und Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse.

In Schritt 4 wird abgeklärt, welche Gesteine bzw. Gesteinsabfolgen sich potenziell als Wirtgesteine bzw. als einschlusswirksame Gebirgsbereiche eignen. In die Bewertung der potenziell möglichen Wirtgesteine bzw. einschlusswirksamen Gebirgsbereiche fließt auch die in Schritt 3 durchgeführte Charakterisierung der geologisch-tektonischen Situation der Vorkommen dieser Wirtgesteine ein. Es sind hier Kriterien bzw. Indikatoren relevant, welche einen gesteinspezifischen Bezug aufweisen.

In Schritt 5 wird geprüft, wo die in Schritt 4 identifizierten Wirtgesteine und einschlusswirksamen Gebirgsbereiche innerhalb der als geeignet eingestuften Großräume für das SMA- bzw. das HAA-Lager in geeigneter Konfiguration vorliegen. Relevant sind in Schritt 5 alle Kriterien bzw. Indikatoren mit einem räumlichen Bezug (Tiefenlage, Mächtigkeit sowie laterale Ausdehnung der Wirtgesteine und einschlusswirksamen Gebirgsbereiche). Weiterhin sind die Indikatoren bezüglich gebietsbegrenzender geologischer Elemente (regionale Störungszonen, glazial übertiefte Felsrinnen, Zonen mit Anzeichen erhöhter tektonischer Zergliederung, konzeptionell zu meidende Zonen) sowie Fragen bezüglich Platzangebot, ausgewählte Aspekte der Langzeitstabilität und der Prognostizierbarkeit von Langzeitveränderungen, geochemische und hydrogeologische Bedingungen, felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen für den Bau, Betrieb und Verschluss des Tiefenlagers sowie Explorationsbedingungen und mögliche Nutzungskonflikte relevant. Im Ergebnis stehen bevorzugte Bereiche, innerhalb derer die bevorzugten Wirtgesteine in geeigneter Tiefe und Mächtigkeit und in genügender lateraler Ausdehnung vorliegen (s. Abb. 5).

Schritte gemäss SGT	SMA-Lager	HAA-Lager
Schritt 1 und 2: Abfallzuteilung, Barrieren-/Sicherheitskonzept, Anforderungen und Vorgaben	Festlegung der Abfallzuteilung, des Barrierenkonzepts sowie der Anforderungen bzw. Bewertungsskalen bezüglich Betrachtungszeiträume, Platzbedarf, Tiefenlage, Wirtgesteinseligenschaften, Hebung/Erosion, etc.	
Schritt 3: Identifikation und Bewertung der weiter zu betrachtenden geologisch-tektonischen Grossräume Evaluation der grossräumigen Verhältnisse bzgl. Hebung/Erosion, Geodynamik, geologischer Komplexität und räumlicher Verhältnisse. Die Evaluation ergibt 'günstig bis sehr günstig' (dunkelgrau), 'ungünstig bis bedingt günstig' (hellgrau) oder 'ungenügend' (weiss) bewertete geologisch-tektonische Grossräume.		
Schritt 4: Auswahl bevorzugter Wirtgesteine Auswahl potenziell möglicher Wirtgesteine anhand des Gesteinsinventars (dargestellt als 27 repräsentative stratigraphische Sammelp Profile). Die Bewertung der potenziell möglichen Wirtgesteine führt schrittweise zur Auswahl von bevorzugten Wirtgesteinen und deren Verbreitungsräumen.		
Schritt 5: Festlegung der geologischen Standortgebiete Zuerst werden innerhalb der weiter betrachteten Verbreitungsräume Karten erstellt für die bevorzugten Wirtgesteine in geeigneter Tiefenlage und mit genügender Mächtigkeit. Dann werden bevorzugte Bereiche abgegrenzt durch Berücksichtigung der Berandung durch regionale Störungszonen, über tiefe Felsrinnen, Zonen mit Anzeichen kleinräumiger Zergliederung (diffus gestörte Zonen) und konzeptionell zu meidenden Zonen mit ungünstigem tektonischem Regime (Neotektonik). Die Bewertung dieser bevorzugten Bereiche führt weiter zu prioritären Bereichen. Diese prioritären Bereiche wiederum ergeben, zusammen mit den überlappenden bzw. in der Nähe liegenden bevorzugten Bereichen, schliesslich die geologischen Standortgebiete. Die Festlegung der Grenzen der geologischen Standortgebiete berücksichtigt die Ungewissheiten in den räumlichen Daten. Die Bewertung der Bereiche bildet die Basis für die Bewertung der geologischen Standortgebiete.		

Abb. 5: Erarbeitung von Vorschlägen für geologische Standortgebiete für das SMA- bzw. das HAA-Lager: Schritte gem. Sachplan geologische Tiefenlager (SGT), Etappe 1 - aus (Nagra 2008b)

In den Schritten 3 bis 5 erfolgt die eigentliche Einengungsprozedur (s. Abb. 5). Die im Verlauf der Umsetzung des Einengungsverfahrens erzeugten Zwischenresultate werden von der Nagra als Varianten⁹ bezeichnet. Die Anwendung der Indikatoren (Beurteilung und Bewertung der Kriterien) für die Evaluation der geologisch-tektonischen Großräume, der Wirtsgesteine bzw. einschlusswirksamen Gebirgsbereiche erfolgt in einer vorgegebenen Reihenfolge. Dabei können bestimmte Indikatoren zur Bewertung von Kriterien mehrfach zur Anwendung kommen. In den verschiedenen Schritten werden z. T. zusätzliche Kriterien und Indikatoren berücksichtigt. Bei der Anwendung der Indikatoren wird unterschieden zwischen Indikatoren, die unmittelbar zur Einengung führen, und Indikatoren, welche der Bewertung dienen. Zur Einengung führen Indikatoren, an welche Mindestanforderungen oder verschärfte Anforderungen gestellt werden. Indikatoren für die Bewertung umfassen gewünschte Eigenschaften, an die keine Mindestanforderungen oder verschärfte Anforderungen gestellt werden. Diese Indikatoren (zur Bewertung) dienen dazu, innerhalb der bevorzugten Varianten Prioritäten zu setzen. Ausgehend von diesen Überlegungen wird bei jedem Schritt (3 bis 5) grundsätzlich dreistufig vorgegangen:

Stufe 1: Identifikation potenziell möglicher Varianten durch Anwendung von Mindestanforderungen für ausgewählte Indikatoren.

Stufe 2: Auswahl bevorzugter Varianten (weitere Einengung) durch Anwendung von verschärften Anforderungen für ausgewählte Indikatoren.

Stufe 3: Charakterisierung und Bewertung der bevorzugten Varianten, deren Resultate bei Bedarf für eine Prioritätensetzung verwendet werden können (Bezeichnung von prioritären Varianten).

Mindestanforderungen

In der Stufe 1 werden zur Identifikation potenziell möglicher Varianten Mindestanforderungen an solche ausgewählten Indikatoren gestellt, die für die Langzeitsicherheit eines Endlagers in tiefen geologischen Schichten unabdingbar sind. Es sind Mindestanforderungen mit quantitativen Anforderungen und Zielvorgaben an das Wirtsgestein und an die Geosphäre. Kann eine Mindestanforderung nicht erfüllt werden, wird das entsprechende Gebiet (nach NTB 08-03: „Variante“) ausgeschlossen. Sämtliche Varianten, welche alle Mindestanforderungen erfüllen, werden als potenziell möglich bezeichnet.

Verschärfte Anforderungen

Stufe 2 führt in der weiteren Einengung zur Auswahl bevorzugter Varianten durch die Anwendung von verschärften Anforderungen für ausgewählte Indikatoren. Diese verschärften Anforderungen betreffen Indikatoren, die einen ausgeprägten Einfluss auf

⁹ Varianten umfassen die geologisch-tektonischen Großräume, die Wirtsgesteine bzw. einschlusswirksamen Gebirgsbereiche und die Konfigurationen (Bereiche bzw. geologische Standortgebiete). NTB 08-03

die Langzeitsicherheit haben oder für die, bei Indikatoren mit übergeordneter Bedeutung, noch größere Ungewissheiten bestehen und gehen über die Mindestanforderungen hinaus. Im Ergebnis dieser Bewertung liegen die bevorzugten Varianten vor. Mit dieser Vorgehensweise soll erreicht werden, dass die bevorzugten Varianten sich tatsächlich als geeignet erweisen und dass sie bezüglich der Sicherheit vergleichbar und von hoher Qualität sind. Varianten die zwar die Mindestanforderungen erfüllen, aber nicht die verschärften Anforderungen, werden zurückgestellt. Auch wird so sichergestellt, dass im Hinblick auf Etappe 2 des SGT alle Varianten (Standortgebiete) das Potenzial haben, sich bezüglich der Sicherheit als vergleichbar zu qualifizieren, wie dies für Etappe 2 gefordert wird (BFE 2008). Neben den Mindestanforderungen dienen die verschärften Anforderungen der direkten Einengung.

Anforderungen zur Bewertung

In Stufe 3 erfolgt die Charakterisierung und Bewertung der bevorzugten Varianten, deren Resultat für eine Prioritätensetzung verwendet wird, mit dem Ziel der Benennung von prioritären Varianten. Die Bewertung der bevorzugten Bereiche umfasst die geologisch/tektonische Situation, das Wirtgestein sowie weitere die Konfiguration betreffende Indikatoren. Die Bewertung der einzelnen Indikatoren wird pro Kriterium und die Kriterien werden pro Kriteriengruppe zusammengezogen. Dies führt schließlich zu einer Gesamtbewertung der bevorzugten Bereiche. Wo machbar und sinnvoll, werden für die Bewertungsskalen quantitative Werte verwendet. Teilweise sind jedoch für die Bewertung nur qualitative Argumente und Aussagen möglich, und in einigen Fällen ist es eine Kombination einer quantitativen und qualitativen Bewertung. Einige der Indikatoren kommen bei der stufenweisen Evaluation mehrmals zur Anwendung. In einer ersten Stufe als Mindestanforderung, in einer zweiten Stufe als verschärfte Anforderung und/oder in einer dritten Stufe für die Bewertung der bevorzugten Varianten.

Abb. 6 bildet die Schritte 1 bis 5 sowie die drei Stufen in diesen Schritten exemplarisch ab.

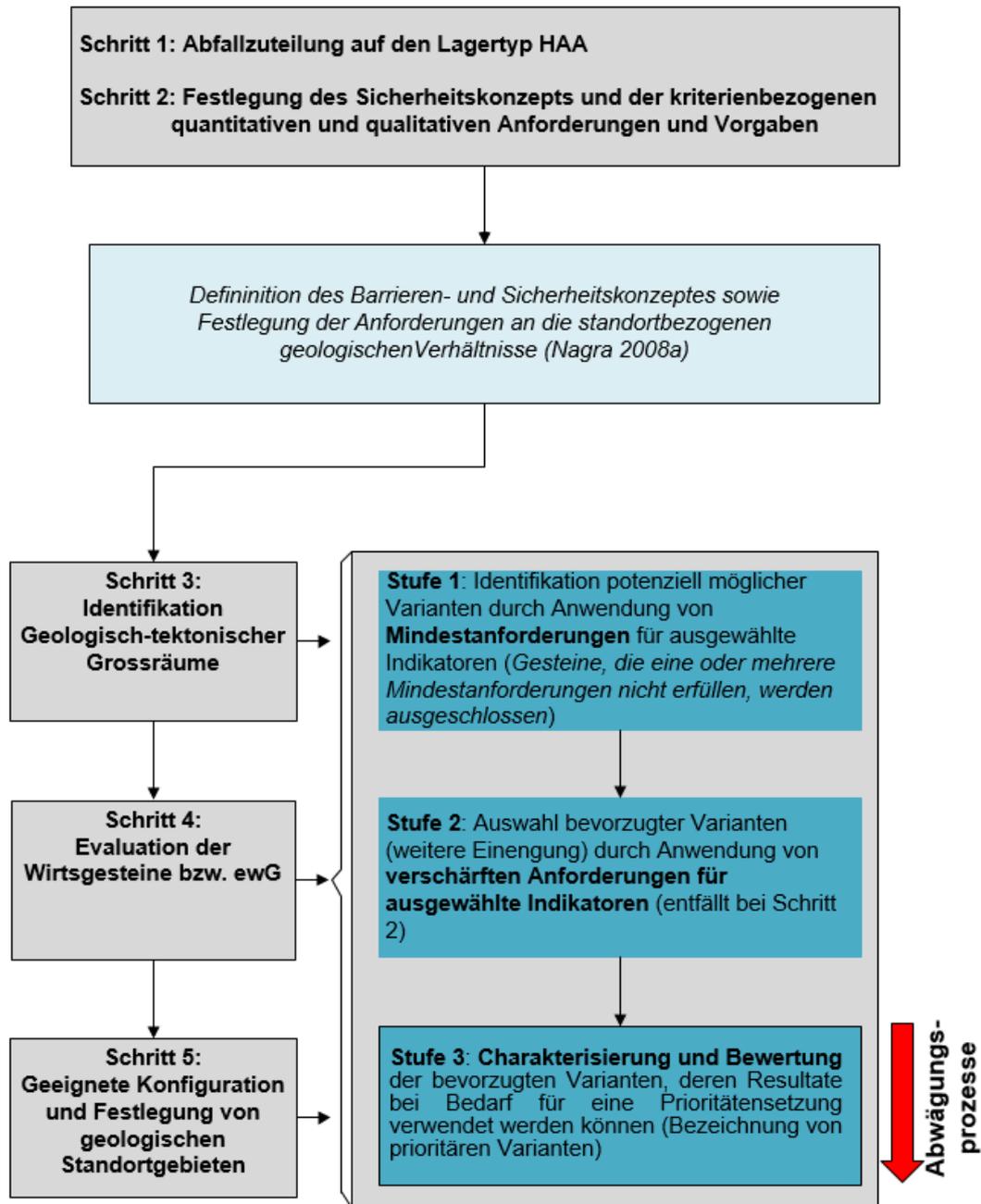


Abb. 6: Vereinfachtes Schema des schrittweises Vorgehen bei der Auswahl und Bewertung von geologische Standorten für ein HAW-Endlager in der Schweiz nach NTB 08-03

Quantitative Bewertung

Die quantitative Bewertung von Indikatoren in Schritt 5 erfolgt über eine Zahlenskala von 1 bis 4, wobei die Zahl 1 die schlechteste und die Zahl 4 die beste Bewertung ist. In Einzelfällen erfolgen die Angaben mit einer Dezimalstelle. Die Gesamtnote für eine Variante ergibt sich aus einer arithmetischen Mittelwertbildung. Dabei ergeben die Bewertungen der Indikatoren die Mittelwerte der Kriterien. Aus diesen werden die Mittelwerte für die Kriteriengruppen gebildet, woraus schließlich die Gesamtbewertung ermittelt wird. Diese Vorgehensweise ist in der nachfolgenden Abb. 7 schematisch dargestellt.

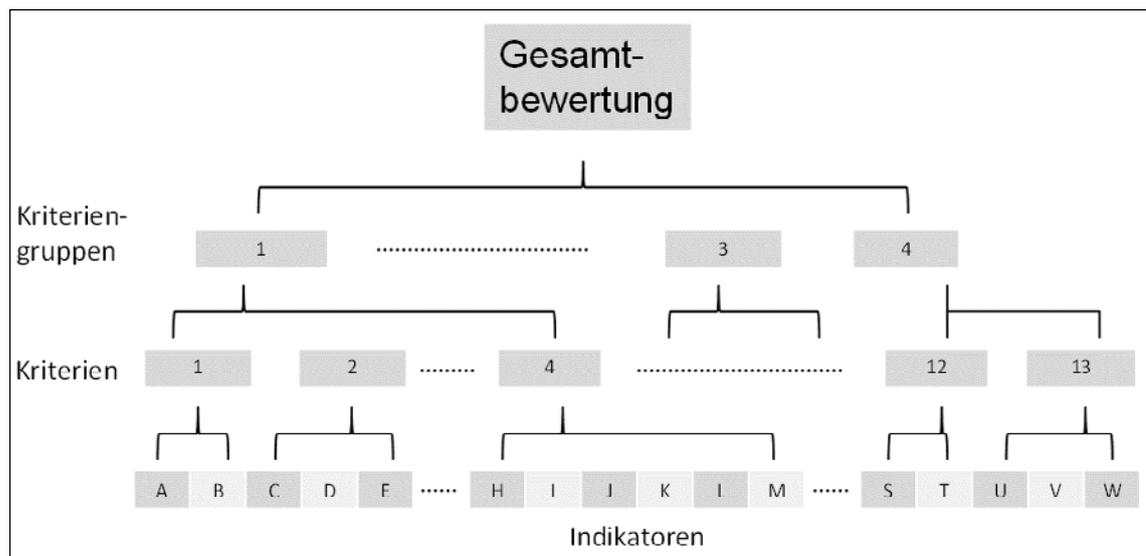


Abb. 7: Schema der Gesamtbewertung durch hierarchische arithmetische Mittelwertbildung (ESCHT 2010)

Qualitative Bewertungsskalen

Für Indikatoren einzelner Kriterien zur Sicherheit und bautechnischen Machbarkeit, für die keine quantitativen Anforderungen und Zielvorgaben ausgewiesen werden können, wird eine qualitative Bewertungsskala mit den Attributen sehr günstig, günstig, bedingt günstig und ungünstig vorgegeben. Der Maßstab stützt sich auf die Ergebnisse der generischen Sicherheitsbetrachtungen und auf Erfahrungswerte zu den betreffenden Indikatoren.

Die zusammenfassende Bewertung der Standortgebiete wird auf einer entsprechenden qualitativen Bewertungsskala der Eignung dargestellt (sehr geeignet / geeignet / bedingt geeignet / weniger geeignet).

Abb. 8 zeigt die Einengungsprozedur und die verwendeten Begriffe der qualitativen Bewertungsskalen im Überblick.

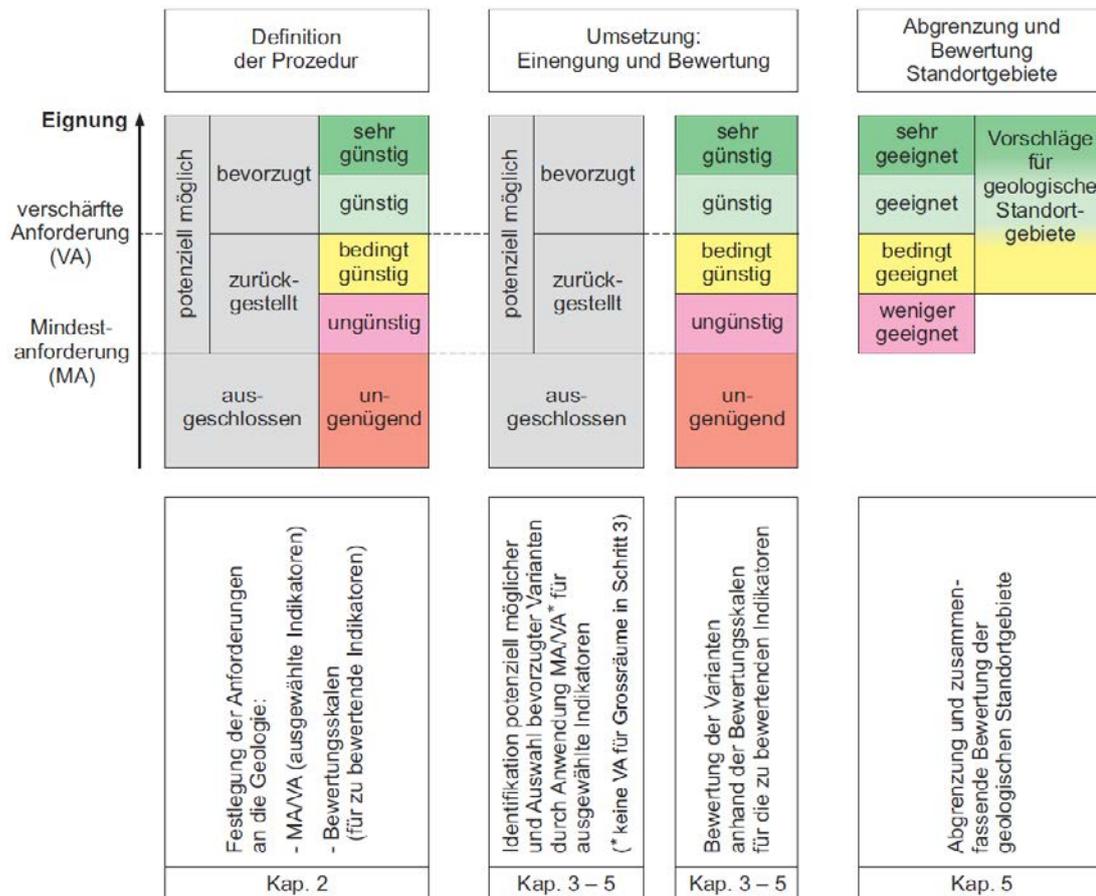


Abb. 8: Überblick über die Einengungsprozedur und die verwendeten Begriffe (Nagra 2008b)

Zusammenfassende Bewertung der geologischen Standortgebiete

Zum Abschluss des Schritts 5 erfolgt die zusammenfassende Bewertung. Darin fließen die Bewertungen der bevorzugten Bereiche ein, die zum jeweiligen Standortgebiet gehören. Die zusammenfassende Bewertung der geologischen Standortgebiete baut auf den vier folgenden Hierarchiestufen auf:

1. Indikatoren,
2. die durch verschiedene Indikatoren erfassten Kriterien,
3. die aus verschiedenen Kriterien gebildeten Kriteriengruppen und
4. eine gesamtheitliche Bewertung über alle Kriteriengruppen.

Die Bewertungsskala sehr günstig, günstig, bedingt günstig und ungünstig kommt auf allen vier Hierarchiestufen zur Anwendung. Mit Hilfe einer Bewertungsmatrix werden die einzelnen Kriterien zu einem Gesamturteil über die Eignung der Standortgebiete zusammengeführt.

Im Ergebnis werden die Vorschläge für potenzielle Standortgebiete auf einer qualitativen Bewertungsskala dargestellt. Als geeignete geologische Standortgebiete kommen nur solche in Frage, die insgesamt mindestens die Bewertung bedingt geeignet haben (s. Abb. 8). Die Bewertung der prioritären Bereiche auf der Hierarchiestufe der Indikatoren ist auszugsweise am Beispiel der Indikatoren zur Bewertung der Kriterien „Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen“ und „Bautechnische Eignung“ in Abb. 9 dargestellt.

Gesamtbewertung sowie Kriterien und Kriteriengruppen (SGT Tab. 1)	Bewertung	Verwendete Indikatoren (gemäss Tab. 5.1-1)	Bewertung		
			geolog.-tekton. Situation	WG/EG	Konfiguration
3 Zuverlässigkeit der geol. Aussagen	3.8				
3.1 Charakterisierbarkeit der Gesteine	4	Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit	-	4	-
		Erfahrungen	-	4	-
3.2 Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse	3.5	Kontinuität der interessierenden Schichten	4	-	-
		Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund *	-	4	-
		Explorationsbedingungen an Oberfläche	-	-	2.5
3.3 Prognostizierbarkeit der Langzeit- veränderungen	4	Modellvorstellungen zur Geodynamik u. Neotektonik	4	-	-
		Unabhängige Evidenzen der Langzeitisolation	-	4	-
4 Bautechnische Eignung	3.5				
4.1 Felsmechanische Eigenschaften und Bedingungen	3	Gesteinsfestigkeiten und Verformungseigenschaften *	-	3	-
		Tiefenlage unter Terrain im Hinblick auf bautechnische Machbarkeit	-	-	3
4.2 Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung	4	Geotechnische und hydrogeologische Verhältnisse in überlagernden Gesteinsformationen	-	-	4
		Natürliche Gasführung (im Wirtgestein)	-	-	4

● sehr günstig
 ● günstig
 ● bedingt günstig
 ● ungünstig
 ● ungenügend

WG/EG Wirtgestein bzw. einschlusswirksamer Gebirgsbereich

* berücksichtigt konfigurationsspezifische Aspekte

Abb. 9: Bewertung des prioritären Bereichs mit dem Wirtsgestein Opalinuston (Nagra 2008b).

Abb. 10 zeigt die qualitative Bewertung der bevorzugten Bereiche für das HAA-Lager auf den Hierarchiestufen Kriterien und Kriteriengruppe gemäß SGT.

Gesamtbewertung sowie Kriteriengruppen und Kriterien (SGT Tab.1)		OPA			
		HAA-OPA-TJ	HAA-OPA-VZ-O	HAA-OPA-VZ-M	HAA-OPA-VZ-W
Gesamtbewertung für bevorzugte Bereiche		(P)	(P)	○	(P)
1	Eigenschaften des WG/EG	●	●	●	●
1.1	Räumliche Ausdehnung	●	●	●	●
1.2	Hydraulische Barrierenwirkung	●	●	●	●
1.3	Geochemische Bedingungen	●	●	●	●
1.4	Freisetzungspfade	●	●	●	●
2	Langzeitstabilität	○	○	○	○
2.1	Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften	●	●	●	●
2.2	Erosion	●	●	●	●
2.3	Lagerbedingte Einflüsse	○	○	○	○
2.4	Nutzungskonflikte	○	●	●	○
3	Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen	●	●	●	●
3.1	Charakterisierbarkeit der Gesteine	●	●	●	●
3.2	Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse	●	●	○	●
3.3	Prognostizierbarkeit der Langzeitveränderungen	●	●	●	●
4	Bautechnische Eignung	○	●	●	○
4.1	Felsmechanische Eigen- schaften und Bedingungen	●	●	●	●
4.2	Untertägige Erschliessung und Wasserhaltung	●	○	●	●

(P) prioritärer Bereich

● sehr günstig

○ günstig

● bedingt günstig

○ ungünstig

● ungenügend

Abb. 10: Bewertung der bevorzugten Bereiche für das HAA-Lager auf den Hierarchiestufen Kriterien und Kriteriengruppe gemäß SGT (Nagra 2008b).

Etappe 2

Die Etappe 2 hatte das Ziel, aus den durch Bundesentscheid in den Sachplan aufgenommenen geologischen Standortgebieten, basierend auf einem sicherheitstechnischen Einengungsprozess, mindestens 2 Standorte je Lagertyp (HAA und SMA) für weitere Untersuchungen in Etappe 3 vorzuschlagen. Gemäß den Vorgaben des Sachplans und des ENSI wurden für jeden Standort aus Etappe 1 provisorische Sicherheitsanalysen sowie eine Bewertung der Standortgebiete anhand eines Kriterienkatalogs in Bezug auf die Eigenschaften des Wirtgesteins, die Langzeitstabilität, die Zuverlässigkeit der geologischen Aussagen und die bautechnische Eignung durchgeführt. Darauf basierend wurden die Standorte sicherheitstechnisch verglichen (BFE 2015). Es erfolgte weiterhin eine Beurteilung der Unterlagen zur Klärung der Notwendigkeit ergänzender geologischer Untersuchungen (Nagra 2010, 2014c, 2014b, 2014a).

Im Detail wird in Etappe 2 eine quantitative Bewertung der Wirksamkeit der Barrierensysteme und eine Bewertung ihrer Langzeitentwicklung unter Berücksichtigung der lagerbedingten Einflüsse durchgeführt. Für die provisorischen Sicherheitsanalysen wurden zuvor die für die Sicherheit und technische Machbarkeit relevanten Prozesse und Parameter abgeleitet und der diesbezügliche Kenntnisstand beurteilt. Für die Auswahl von mindestens zwei Standortgebieten wurden übergeordnete Forderungen bezüglich des sicherheitstechnischen Vergleichs von potenziellen Standortgebieten abgeleitet (ENSI 2013c, 2013a, 2013b; BFE 2008; ENSI 2010). Dies umfasst die quantitativen Ergebnisse der Dosisberechnungen (charakteristische Dosisintervalle), die qualitative Bewertung der Kriterien zur Sicherheit und technischen Machbarkeit und gegebenenfalls identifizierte eindeutige Nachteile der geologischen Standortgebiete. Gemäß ENSI-Vorgaben kann ein geologisches Standortgebiet in Etappe 2 nur dann zurückgestellt werden, wenn mindestens eine der folgenden vier Fragen mit einem Ja beantwortet wird (vgl. Abb. 3):

Frage 1: Erfüllt das Standortgebiet das Dosis-Schutzkriterium nicht?

Frage 2: Ist das Standortgebiet aufgrund der Ergebnisse der Dosisberechnungen eindeutig weniger geeignet?

Frage 3: Ist die Gesamtbewertung des Standortgebiets schlechter als „geeignet“?

Frage 4: Können beim Standortgebiet anhand der Kriterien zur Sicherheit und technischen Machbarkeit belastbare eindeutige Nachteile gegenüber anderen Standortgebieten festgestellt werden?

Die Beantwortung der Fragen erfolgt anhand der Dosisberechnungen (Frage 1), anhand der charakteristischen Dosisintervalle gemäß Strahlenschutzverordnung (Frage 2), anhand einer qualitativen Bewertung der verbleibenden Standortgebiete bezüglich der Kriterien

gemäß (Frage 3) und wenn es gegenüber den anderen Standortgebieten eindeutige Nachteile aufweist (Frage 4). Zur Identifikation geologischer Standortgebiete mit eindeutigen Nachteilen kommen die vom ENSI (ENSI 2013c) festgelegten entscheidungsrelevanten Merkmale zur Anwendung.

Die Vorgaben für Etappe 2 umfassen die nachfolgenden Untersuchungen:

- Dosisberechnungen für die realistischer Weise zu erwartende Entwicklung des Tiefenlagers (s. Tab. 2.1-3 in (Nagra 2014c)) sowie anhand von Parametervariationen (s. Tab. 2.1-4 (Nagra 2014c)).
- Qualitative Bewertung der Standortgebiete anhand der 13 Kriterien gemäß SGT (s. a. Etappe 1) zur Sicherheit und technischen Machbarkeit. Für Etappe 2 waren teilweise Anpassungen der Indikatoren notwendig, um eine sicherheitsbezogene Optimierung vorzunehmen.
- Evaluation möglicher eindeutiger Nachteile der Standortgebiete anhand der entscheidungsrelevanten Merkmale und Indikatoren (s. Tab. 2.1-5 (Nagra 2014c)): Als zusätzlicher Prüfpunkt gegenüber Etappe 1 sind in Etappe 2 die Standortgebiete bezüglich eindeutiger Nachteile vergleichend zu beurteilen.
- Für den sicherheitstechnischen Vergleich muss eine vergleichende Gesamtbewertung der geologischen Standortgebiete bezüglich der o. a. Punkte erfolgen. Dies umfasst die quantitativen Ergebnisse der Dosisberechnungen (charakteristische Dosisintervalle), die qualitative Bewertung der Kriterien zur Sicherheit und technischen Machbarkeit und allenfalls identifizierte eindeutige Nachteile der geologischen Standortgebiete.

Die Resultate der Etappe 2 bilden eine wichtige Grundlage für den übergeordneten „Sicherheitstechnischen Vergleich“ und führen zu einer Einengung auf je mindestens zwei Standortgebiete pro Lagertyp sowie zu einem Vorschlag der in Etappe 3 weiter zu untersuchenden „geologischen Standortgebiete“.

4.2 **Diskussion möglicher Abwägungsmethoden (A 9.2)**

Die deutsche Expertengruppe Schweizer Tiefenlager (ESCHT) schätzt in ihrer Stellungnahme zur ersten Etappe des Schweizer Standortauswahlverfahrens (ESCHT 2010) ein, dass mit dem Ansatz einer sicherheitsgerichteten Priorisierung von Standortgebieten das Schweizer Standortauswahlverfahren wesentlichen und grundlegenden Anforderungen, die nach heutigem Stand von Wissenschaft und Technik an ein derartiges Verfahren zu stellen sind, gerecht wird. Zu nennen sind hier insbesondere die Auswahl bestmöglicher und hinreichend sicherer Standortgebiete sowie Alternativenprüfung und Verfahrensgerechtigkeit.

Das Einengungsverfahren nach SGT verläuft ähnlich wie das Standortauswahlverfahren in Deutschland, das, zurückgehend auf den Vorschlag des AkEnd (AkEnd 2002), über den Abschlussbericht der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfälle (Bundestag 2016) schließlich im StandAG (StandAG 2017) gesetzlich vorgegeben ist. Zur Ermittlung von Teilgebieten werden im deutschen Standortauswahlverfahren sukzessive Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen und Abwägungskriterien angewendet, wobei zur Abwägung Indikatoren herangezogen werden, die zu bewerten sind. Auch das Schweizer Auswahlverfahren beinhaltet die Anwendung von Indikatoren. Allerdings wird der Begriff „Abwägung“ im Sachplan und in den Berichten der Nagra zum Vorschlag geologischer Standortgebiete (Nagra 2008b) sowie zum Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage (Nagra 2014c) nicht in diesem Zusammenhang erwähnt. Ausschließlich zum Kriterium „Nutzungskonflikte“ und dort bei der Bewertung des Indikators „Rohstoffvorkommen unterhalb des Wirtsgesteins“ fällt der Begriff „Interessenabwägung“ (Nagra 2008b).

Grundsätzlich erfolgen sowohl im Schweizer, als auch im deutschen Verfahren Gebietsausschlüsse kriterienbasiert. Nach Anwendung der Mindestanforderungen werden an die verbleibenden Gebiete¹⁰ im Schweizer Verfahren verschärfte Anforderungen angewendet. Gebiete, die zwar den Mindestanforderungen genügen, aber die verschärften Anforderungen nicht erfüllen, werden zurückgestellt. Damit soll erreicht werden, dass die verbleibenden Gebiete das Potenzial haben, sich bezüglich der Sicherheit in der folgenden Etappe als vergleichbar zu qualifizieren und dass sie in Bezug auf die Sicherheit ein hohes Niveau aufweisen. Neben den Mindestanforderungen dienen auch die verschärften Anforderungen der direkten Einengung von Gebieten. Eine Zurückstellung von Gebieten sieht das StandAG nicht vor. Sofern Gebiete vorhanden sind, die aufgrund nicht hinreichender geologischer Daten nicht eingeordnet werden können, ist von der BGE eine Empfehlung zum weiteren Umgang mit diesen Gebieten in den Zwischenbericht nach § 13 StandAG aufzunehmen. Grundelemente der Schweizer Einengungsprozedur sind die Indikatoren, welche in Übereinstimmung mit dem SGT die Beurteilungsgrößen für die Einengung sind und welche die Basis für die Entscheidung bei der Einengung und für die Bewertung der resultierenden

¹⁰ Vereinfachend wird in dieser Diskussion für beide Standortauswahlverfahren der Begriff Gebiete verwendet.

Varianten bilden (Nagra 2008b). Indikatoren zur Einengung und für die Bewertung der resultierenden Gebiete werden für die Schritte 3, 4 und 5 jeweils in Stufe 3 angewendet. Das Vorgehen in Stufe 3 kann als ein Abwägungsprozess verstanden werden, in dessen Ergebnis Prioritäten abgeleitet und begründet werden.

Die Vorgehensweise, welche die Nagra entwickelt hat, löst das Problem der Aggregation von quantitativen und qualitativen Eigenschaften. Sie beschreibt den Umgang in der Bewertung der Indikatoren auf ordinaler und kardinaler Skala.

Die ESchT bewertet den Einengungs- und Bewertungsprozess als ein Verfahren, das ein robustes und belastbares Ergebnis liefert (ESCHT 2010).

Die geowissenschaftlichen Abwägungskriterien gemäß StandAG dienen zur Beurteilung von geologischen Sachverhalten hinsichtlich einer besseren oder weniger guten Eignung. Ihre Anwendung führt daher zur Einordnung von Gebieten im Vergleich zu anderen Gebieten hinsichtlich ihrer relativen Eignung. Mit ihrer Hilfe wird beurteilt, ob in einem Teilgebiet bzw. einer Standortregion eine insgesamt günstige geologische Gesamtsituation vorliegt. Dabei gilt grundsätzlich, dass ein einzelnes Abwägungskriterium nicht hinreichend ist, um die günstige geologische Gesamtsituation nachzuweisen oder auszuschließen. Die günstige geologische Gesamtsituation ergibt sich also nicht aus der besonders guten Erfüllung eines einzelnen Kriteriums, sondern aus der Summe der Erfüllung (bzw. Erfüllungsgrade) aller Anforderungen und deren Kriterien. Für Bewertung und Vergleich der jeweils zu betrachtenden Standortregionen bzw. Standorte ist ein verbal-argumentativer Abwägungsprozess erforderlich (Bundestag 2016). Eine wie im Schweizer Verfahren abschließend zum Einsatz kommende und vom SGT geforderte Bewertungsmatrix der Ergebnisse einzelner Kriterienbewertungen für ein Gesamturteil zur Eignung über eine qualitative vierstufige Bewertungsskala (z. B. sehr günstig/günstig/bedingt günstig/un-günstig) ist im deutschen Verfahren nicht vorgegeben.

Bei der großen Anzahl von Indikatoren und den gegebenen verschiedenen möglichen Wirtsgesteinen ist die Vergleichbarkeit in einem rein verbal-argumentativen Abwägungsprozess erheblich erschwert. Nicht abschließend geregelt sind auch Art, Inhalte und Ziele der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen sowie deren Stellenwert neben oder in dem Abwägungsprozess. Denkbar wäre ein Vorgehen vergleichbar mit dem Schweizer Verfahren, in dem ein bestimmter Dosisgrenzwert eingehalten werden muss, damit ein Gebiet weitergeführt werden kann. Weiterhin könnte auch, wie im Schweizer Standortauswahlverfahren, eine untere Schwelle der errechneten Dosis eingeführt werden, unterhalb derer die Gebiete sicherheitstechnisch quantitativ als gleichwertig betrachtet werden und eine Priorisierung ausschließlich auf dem Abwägungsprozess anhand der Abwägungskriterien beruht. Begründet werden kann eine solche Schwelle aufgrund von Vereinfachungen, Annahmen und Ungewissheiten in den Sicherheitsbetrachtungen.

Grundsätzlich basiert die Beurteilung in Etappe 2 auf den gleichen Indikatoren und Bewertungsskalen wie in Etappe 1. Aufgrund der Fokussierung auf die geologischen Standortgebiete mit ihren Wirt- und Rahmengesteinen sind einige der Indikatoren nicht mehr relevant und werden deshalb in Etappe 2 nicht mehr verwendet. Dabei handelt es sich insbesondere um diejenigen Indikatoren, welche in Etappe 1 nur bei der Beurteilung der Großräume angewendet wurden (bzw. für Standortgebiete irrelevant sind), und um solche, welche in Etappe 2 durch andere Indikatoren besser erfasst werden. Ferner werden einige Indikatoren und ihre Bewertungsskalen präzisiert, um den gegenüber Etappe 1 jetzt erhöhten Detaillierungsgrad zu berücksichtigen (Nagra 2014c).

In Etappe 2 des SGT wurde das Verfahren der multikriteriellen Entscheidungsfindung (MCDA-Verfahren) für die Bewertung und der darauf basierenden Einengung der Wirtsgesteine (nur SMA-Lager) und der geologischen Standortgebiete bzw. der zugehörigen Lagerperimeter angewendet. Das betrifft folgende Verfahren:

1. Qualitative Bewertung mit Nutzwertanalyse: Qualitative Bewertung der potenziellen Standorte anhand von Nutzwerten (analog Etappe 1).
2. Direkter Vergleich der Bewertungen und Darstellung als Stärken-Schwächen-Profil: Identifikation von eindeutigen Nachteilen anhand eines direkten Vergleichs der Bewertungen für die Alternativen.
3. Outranking-Methode: Identifikation von eindeutigen Nachteilen anhand eines paarweisen Vergleichs der Bewertungen für die Alternativen.
4. Malus-Bilanzierung: Identifikation von eindeutigen Nachteilen anhand eines Vergleichs der Bewertungen für die Alternativen mit absoluten Schwellenwerten.

Diese MCDA-Verfahren und deren Anwendung werden in (Nagra 2014c) im Anhang beschrieben.

Bei der Anwendung der o. a. Verfahren und der Bewertung können zur Entscheidungsfindung folgende Verfahren angewendet werden:

- Neben der Anwendung der entscheidungsrelevanten Kriterien und Indikatoren erfolgt die Anwendung der Bewertungsskalen, wenn möglich auf Messwerten, ansonsten auf „expert judgement“.
- Die Aggregation der Nutzwerte erfolgt primär mit Gleichgewichtung aller Kriterien und Indikatoren. Zur Bewertung der Robustheit und dem Einfluss wichtiger Kriterien und Indikatoren ist es grundsätzlich aber möglich, die Sensitivität der Bewertungen bezüglich alternativer Gewichtungen zu prüfen.
- Innerhalb einer jeden Gruppe von aggregierten Indikatoren, Kriterien und Kriteriengruppen wird z. T. volle Kompensation zugelassen, d.h. eine schlechte Bewertung kann durch eine gute Bewertung innerhalb der gleichen Gruppe und auf jeder Ebene des Kriterienkatalogs voll kompensiert werden (hoher Kompensationsgrad) (s. Abb. 7). Bei der Bewertung von entscheidungsrelevanten Merkmalen (Etappe 2) mittels entscheidungsrelevanten Indikatoren werden Kompensationen (Mittelwertbildung) nur für ausgewählte entscheidungsrelevante Merkmale zugelassen. Andernfalls gibt die schlechteste Bewertung eines entscheidungsrelevanten Indikators die Bewertung des entscheidungsrelevanten Merkmals an (s. Abb. 12).

Nr.	Entscheidrelevante Merkmale (EM) (gemäss Vorgabe des ENSI, vgl. Tab. 2.1-5) Entscheidrelevante Indikatoren (EI) (gemäss Tab. 2.3-2)	Aggregations methode
a)	EM 'Wirksamkeit der geologischen Barriere'	Mittelwert
5	Mächtigkeit	
9	Hydraulische Durchlässigkeit	
20	Transmissivität präferenzierter Freisetzungspfade	
22	Selbstabdichtungsvermögen	
18	Homogenität des Gesteinsaufbaus	
17	Art der Transportpfade und Ausbildung des Porenraums	
19	Länge der massgebenden Freisetzungspfade	
16	Kolloide	
b)	EM 'Langzeitstabilität der geologischen Barriere'	Minimum
27	Potenzial zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung)	
22	Selbstabdichtungsvermögen	
c)	EM 'Explorier- und Charakterisierbarkeit der geologischen Barriere im Standortgebiet'	Mittelwert
39	Variabilität der Gesteinseigenschaften im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit	
43	Explorationsverhältnisse im geologischen Untergrund	

Abb. 12: Entscheidrelevante Merkmale und Indikatoren für die Identifikation eindeutiger Nachteile der Wirtsgesteine (Nagra 2014c)

Im Vergleich zur Situation in Deutschland steht im Schweizer Auswahlverfahren eine geringere Anzahl an potenziell geeigneten Wirtsgesteinen zur Auswahl. Für ein HAA-Lager wurde in Etappe 1 des Sachplanverfahrens von der Nagra der Opalinuston als bevorzugtes Wirtsgestein für ein HAA Lager bestimmt. Durch den Schweizer Bundesrat erfolgte daraufhin die Festlegung des Opalinuston als einziges Wirtsgestein für ein HAA Lager. Im deutschen Standortauswahlverfahren kommen grundsätzlich die im StandAG genannten Wirtsgesteine Steinsalz, Tongesteine und Kristallingestein in Betracht. Dieser Sachverhalt erschwert den Abwägungsprozess im Vergleich zur Situation in der Schweiz, weil die unterschiedlichen sicherheitstechnischen Eigenschaften der drei potenziellen Wirtsgesteine sich auf die Bewertung bzw. Wichtung verschiedener Indikatoren auswirken.

Eine Aggregierungsmethode ist in beiden Ländern nicht vorgegeben (Schweizer SGT und deutsches StandAG). In der Kommission zur Lagerung hoch radioaktiver Abfälle

wurde u. a. intensiv über die Vorgabe einer Aggregierungsmethode diskutiert. Für Bewertung und Vergleich der jeweils zu betrachtenden Standortregionen bzw. Standorte ist aus Sicht der Kommission ein verbal-argumentativer Abwägungsprozess erforderlich. Formale Aggregationsregeln, insbesondere solche mit kompensatorischer Aggregierung der Einzelergebnisse der Kriterienanwendung, hält die Kommission nicht für zielführend (Bundestag 2016). Die rein verbal-argumentative Bewertung der Abwägungskriterien ist in jedem Fall transparent und nachvollziehbar zu gestalten.

5 Fazit

Die Ermittlung der erforderlichen geowissenschaftlichen Informationen/Daten, die zur Anwendung der Indikatoren benötigt werden, wurde gespiegelt an den Datenabfragen der BGE zu den Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen, welche bei den zuständigen Stellen der Länder und des Bundes vorgenommen wurden. Zudem wurde abgeschätzt, ob die durch die Abfragen bereitgestellten Daten/Informationen geeignet sind, die Indikatoren der Abwägungskriterien zu bewerten. Es zeigte sich, dass nur in Einzelfällen zu erwarten ist, dass Daten unmittelbar aus den genannten Abfragen für die Anwendung der Indikatoren verwendet werden können. Die direkte Nutzung der Daten zur Bewertung der Indikatoren ist für etwa 50% nicht und für den Rest nur bedingt möglich. Eine bedingte Eignung bedeutet, dass der Indikator zwar nicht unmittelbar bewertet werden kann, jedoch eine Einschätzung zur Bewertung des Indikators vorgenommen werden kann. Das betrifft zumeist Informationen zur lithologischen Gliederung des Teufenbereichs von 300 m bis 2000 m, bzw., sofern lithologische Gliederungen nicht vorhanden sind, stratigraphische Gliederungen. Zur Kompensation dieses Defizits an erforderlichen Daten wurden Möglichkeiten aufgezeigt, mit denen auf alternative Weise Informationen zur Bewertung der entsprechenden Indikatoren abgeleitet werden können.

Die Recherche von Abwägungsmethoden in den nuklearen Entsorgungsprogrammen anderer Länder ergab, dass eine vergleichbare Abwägungsmethode, wie sie in Deutschland angewendet werden soll, nur im Schweizer Sachplanverfahren Geologische Tiefenlager beschrieben wird. Auch in diesem Standortauswahlverfahren werden Einengungen auf der Grundlage der Bewertung von Indikatoren vorgenommen. Hierzu wird ein festgeschriebenes Aggregierungsverfahren mit qualitativen und quantitativen Bewertungen angewendet. Eine verbal-argumentativ begründete Einengung, wie im Bericht der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfälle ausgeführt, hat ein Alleinstellungsmerkmal unter den betrachteten Standortauswahlverfahren.

Literaturverzeichnis

- AkEnd (2002): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte - Empfehlungen des AkEnd. Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd), Abschlussbericht: 260 S., 30 Abb., 14 Tab., 3 Anh.; Köln.
- Alt, S., Kallenbach-Herbert, B. & Ustohalova, V. (2017): Vergleichende Analyse der tschechischen Endlagerkriterien. Öko-Institut e.V. Gutachten im Auftrag der Landesregierungen von Oberösterreich und Niederösterreich: 78 S.; Darmstadt.
- Andra (2013): Supplément thématique au Journal de l'Andra - Mieux comprendre le projet de centre industriel de stockage géologique. Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA). cigéomag, 491-n°3; Châtenay-Malabry, France.
- Andra (2019): PROJET CIGÉO - Centre industriel de stockage réversible profond de déchets radioactifs en Meuse/Haute-Marne. Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA), 568 E • DICOD/19-0095: 24 S.; Châtenay-Malabry, France.
- Andra (2020): Cigéo. Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA): Cigéo (Centre industriel de stockage géologique) est le projet français de centre de stockage profond de déchets radioactifs. Il est conçu pour stocker les déchets hautement radioactifs et à durée de vie longue produits par l'ensemble des installations nucléaires actuelles, jusqu'à leur démantèlement, et par le traitement des combustibles usés utilisés dans les centrales nucléaires; Châtenay-Malabry, France. <https://www.andra.fr/cigeo>
- Appel, H. & Habler, W. (2001): Quantifizierung der Wasserdurchlässigkeit von Gesteinen als Voraussetzung für die Entwicklung von Kriterien zur Grundwasserbewegung: Phase 1: Überprüfung der Datenbasis für die Ableitung von Kriterien zur Wasserdurchlässigkeit.
- Appel, H. & Habler, W. (2002): Quantifizierung der Wasserdurchlässigkeit von Gesteinen als Voraussetzung für die Entwicklung von Kriterien zur Grundwasserbewegung - Phase 2: Auswertung der Datensätze für die Kriterienentwicklung. Anhang u. Datenbank Gebirgsdurchlässigkeit.

- ASN (1991): Règles fondamentales de sûreté relatives aux installations nucléaires de base autres que réacteurs - Règle No. RFS-III.2.f du 01/06/1991 - Définition des objectifs à retenir dans les phases d'études et de travaux pour le stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde afin d'assurer la sûreté après la période d'exploitation du stockage (1er juin 1991). Autorité de Sûreté Nucléaire.
- ASN (2009): Guide de sûreté relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde du 12.02.08 (Ersetzt RFS-III.2.f du 01/06/1991). Autorité de Sûreté Nucléaire: 32 S..
- Baldschuhn, R., Binot, F., Fleig, S. & Kockel, F. (2001): Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland und dem deutschen Nordsee-Sektor - Strukturen, Strukturentwicklung, Paläogeographie. Geol. Jb., A 153: 3 CD-ROMs, 95 S. Hannover.
- Bäckblom, G., Stanfors, R., Gustafson, G., Rhen, I., Wikberg, P., Olsson, O. & Thegerström, C. (1997): Äspö Hard Rock Laboratory - Research, Development and Demonstration for Deep Disposal of Spent Nuclear Fuel. Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 12, No. 3: S. 385-406.
- Beushausen, M., Bebiolka, A., Kuhlmann, G., Reinhold, K. & Röhling, S. (2020): Standortauswahl - Zwischenbericht zum Konzept zur generellen Vorgehensweise zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien – Schritt 2. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Zwischenbericht Revision 01: 79 S.; Hannover/Berlin.
- BFE (2011): Sachplan geologische Tiefenlager - Sachplan Geologisches Tiefenlager - Konzeptteil. Revision vom 30. November 2011. Bundesamt für Energie (BFE): 93 S.; Bern/Schweiz.
- BFE (2015): Nagra will Jura Ost und Zürich Nordost als Standortgebiete für geologische Tiefenlager vertieft untersuchen. Bundesamt für Energie (BFE) 28.11....//www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/news-und-medien/medienmitteilungen/mm-test.msg-id-56084.html
- BGE (2018a): Abfrage der Daten für die Anwendung der Mindestanforderungen gemäß Standortauswahlgesetz (19.3.2018). Anhang: Arbeitshilfen zur Datenabfrage Mindestanforderungen. BGE TECHNOLOGY GmbH; Peine.
- BGE (2018b): Arbeitshilfe „Ausschlusskriterien“. Stand: 06.02.2018. BGE TECHNOLOGY GmbH: 5 S.; Peine.

- BGR (2007): 3D-Modellierung an den potenziellen russischen Endlagerstandorten Verchne Itatskij und Jenisejskij. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. Zwischenbericht: 66 S..
- BGR (2015): Projekt Endlagerkommission - Beratung der Kommission „Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe“ gemäß § 3 Standortauswahlgesetz - Abriss der Standortauswahl und Darstellung der angewandten geowissenschaftlichen Kriterien bei den Endlagerprojekten in den Ländern Schweiz, Frankreich, Schweden, Belgien und USA. Kurzstudie. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: 124 S.; Hannover.
- Borstel, L. E. (1993): Lösungen in marinen Evaporiten. BfS-Schriften, 10/93: 315 S.; Salzgitter.
- Bossart, P. & Thury, M. E. (2008): Mont Terri Rock Laboratory. Project, Programme 1996 to 2007 and Results. Swiss Geological Survey (SGS), 3: 194; Wabern/Schweiz.
- Böttge, V., Minkley, W. & Reichenbach, W. (2003): Zur Eignung des Roten Salztone (T4) als Barrieregestein. GGW, Exk.-Führ. u. Veröfftl., 222: S. 99-103.
- Boyer, S. & Mari, J.-L. (1997): Seismic Surveying and well logging. Oil and Gas Exploration Techniques - Editions Technic; Paris.
- Costin, L. S. (1997): Site Selection and Characterization Processes for Deep Geologic Disposal of High Level Nuclear Waste Sandia National Laboratories, KR9700361; Albuquerque, New Mexico.
- Degueldre, C., Scholtis, A., Laube, A., Turrero, M.J. & Thomas, B. (2003): Study of pore water chemistry through an argillaceous formation. A paleohydrochemical approach. Applied Geochemistry, 18, 1: S. 55-73.
- Deutscher Bundestag (2016): Abschlussbericht der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfälle. K-Drs. 268. Kommissionsdrucksache; Berlin.
- Deutscher Bundestag (2017): BT-DRS 18/11398 - Entwurf eines Gesetzes zur Fortentwicklung des Gesetzes zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle und anderer Gesetze. (Gesetzentwurf der Fraktionen CDU/CSU, SPD und BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN). Deutscher Bundestag 07.03.2017.

- DGGT (2010): Geophysikalische Standortuntersuchung - Technische Regel. DGGT E 1-3; (Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e. V. (DGGT)).
- DIN 4049-3:1994-10 (1994): Hydrogeologie. Teil 3 Begriffe zur quantitativen Hydrologie. Normenausschuss Wasserwesen (NAW): 80 S.; Berlin.
- DIN 9001 (2015): DIN EN ISO 9001 - Qualitätsmanagementsysteme – Anforderungen (ISO 9001:2015). Deutsches Institut für Normung e. V.: 71 S.; Berlin.
- DIN 17025 (2018): Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien (ISO/IEC 17025:2017). Deutsches Institut für Normung e. V.: 65 S.; Berlin.
- DOE (1984, 2001): Electronic Code of Federal Regulations (e-CFR) Title 10. Energy Chapter III. DEPARTMENT OF ENERGY Part 960. GENERAL GUIDELINES FOR THE PRELIMINARY SCREENING OF POTENTIAL SITES FOR A NUCLEAR WASTE REPOSITORY. <https://www.law.cornell.edu/cfr/text/10/part-960/subpart-B>
- Doveton, J. D. (1994): Geologic Log Analysis Using Computer Methods. AAGP Computer Applications in Geology, 2: 30 S..
- EKRA (2000): Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle - Schlussbericht. EKRA: 91 S.; Bern.
- EL-KOM (2016): Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe: Verantwortung für die Zukunft. Ein faires und transparentes Verfahren für die Auswahl eines nationalen Endlagerstandortes. Abschlussbericht. K-Drs. 268: 683 S.; Berlin. .
- ENSI (2010): Anforderungen an die provisorischen Sicherheitsanalysen und den sicherheitstechnischen Vergleich. Sachplan geologische Tiefenlager, Etappe 2. Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, ENSI 33/075 (April 2010); Bruegg.
- ENSI (2013a): Ablauf der Überprüfung des geologischen Kenntnisstands vor Einreichen der sicherheitstechnischen Unterlagen für Etappe 2 SGT. Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, ENSI 33/155 (Januar 2013); Bruegg.
- ENSI (2013b): Anforderungen an die bautechnischen Risikoanalysen und an ergänzende Sicherheitsbetrachtungen für die Zugangsbauwerke in Etappe 2 SGT. Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, ENSI 33/170 (Januar 2013); Bruegg.

- ENSI (2013c): Präzisierungen zur sicherheitstechnischen Methodik für die Auswahl von mindestens zwei Standortgebieten je für HAA und SMA in Etappe 2 SGT. Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat, ENSI 33/154 (Januar 2013); Bruegg.
- ESCHT (2010): Stellungnahme der ESchT zur ersten Etappe des Schweizer Standortauswahlverfahrens für geologische Tiefenlager Teil II: Sicherheitstechnische und geowissenschaftliche Aspekte.
- Fairhurst, C., Gera, F., Gnirk, P., Gray, M. & Stillborg, B. (1993): Stripa Project 1980-1992 - Overview Volume I - Executive Summary. NAGRA, NTB 90-03, Technical Report 93-41: 106 S.; Wettingen/Schweiz.
- Fricke, S. & Schön, J. (1999): Praktische Bohrlochgeophysik. 254 S.; Stuttgart (Enke in Thieme Verl.).
- Gabriel, G. & Vogel, D. (2010): Anomalien des erdmagnetischen Totalfeldes der Bundesrepublik Deutschland 1:1 000 000. Publisher; Hannover.
- Gerling, P., Beer, W. & Bornemann, O. (1991): Gasförmige Kohlenwasserstoffe in Evaporiten des deutschen Zechsteins. Kali und Steinsalz, 10: S. 376-383; Kassel.
- GAO (2020): Disposal of High-Level Nuclear Waste. U.S. Government Accountability Office. https://www.gao.gov/key_issues/disposal_of_highlevel_nuclear_waste/issue_summary
- Golder Associates (2006): Entwicklung zuverlässiger Datengrundlagen und Auswertemethoden für die Endlagerstandortsuche - Vorhaben: SR 2487 - Abschlußbericht – Juni 2006. Golder Associates GmbH in Kooperation mit: Geophysik GGD mbH, Institut für Gebirgsmechanik GmbH, K+S Consulting GmbH: 184 S.; Celle.
- Grimmelmann, W., Hannemann, M., Hecht, G., Müller, A., Plum, H., Pretschold, H.-H., Scharpff, H.-J. & Schlimm, W. (1997): Hydrogeologische Kartieranleitung. Geologisches Jahrbuch. Reihe G: Informationen aus den Bund/Länder-Arbeitsgruppen der Staatlichen Geologischen Dienste, 2 (1997): 157 S.
- GRS (2001): Zusammenstellung internationaler Kriterien zur Bewertung und Auswahl von Standorten für die Endlagerung von radioaktiven Abfällen in tiefen geologischen Formationen. Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS - A - 2834: 135 S.; Braunschweig.

- GRS (2019): Grundlagen für die Bewertung der Signifikanz der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien - Ergebnisse aus dem Vorhaben RESUS. BGE TECHNOLOGY GmbH, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) GmbH, Bericht: 150 S.; GRS Braunschweig.
- GRS, BGR & DBE Tec (2014): Site-specific evaluation of safety issues for high-level waste disposal in crystalline rocks. Gesellschaft für Reaktorsicherheit, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, DBE Technology GmbH. Technical Report: 110 S..
- Hammer, J., Sönke, J. & Mingerzahn, G. (2009): Entwicklung und Umsetzung von technischen Konzepten für geologische Endlager in allen Wirtsgesteinen (EUGENIA). - Teil I: Grundlagen und Beispiele für Standortauswahlverfahren für HAW-Endlager in unterschiedlichen Wirtsgesteinstypen Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Abschlussbericht: 161 S.; Hannover.
- Hansen, F. D. & Leigh, C. D. (2011): Salt Disposal of Heat-Generating Nuclear Waste. Sandia National Laboratories, SANDIA REPORT, SAND2011-0161: 101; Albuquerque, New Mexico.
- Hoth, P., Wirth, H., Reinhold, K., Bräuer, V., Krull, P. & Feldrappe, H. (2007): Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands - Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen. 118 S.; Berlin / Hannover (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe).
- IAEA (1977): Site selection factors for repositories of solid high-level and alpha-bearing wastes in geologic formations. Internat. Atomic Energy Agency, Technical Report Series, № 177: 64 S.; Wien.
- IAEA (1994): Siting of Geological Disposal Facilities - A Safety Guide. International Atomic Energy Agency No. 111-G-4.1, IAEA Safety Series 48; Wien.
- IAEA (2011): Geological Disposal Facilities for Radioactive Waste. International Atomic Energy Agency (IAEA), Safety Standards Series. Specific Safety Guide, No. SSG-14: 104 S.; Wien.
- IAEA (2012): The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste. IAEA. Specific Safety Guide, SSG-23: 120 S.; Vienna.
- IAEA (2015): Site Survey and Site Selection for Nuclear Installations. Specific Safety Guide, SSG-35: 61 S.; Vienna.

- ICRP (2013): Radiological protection in Geological Disposal of Long-Lived Solid Radioactive Waste. ICRP Publication 122; Versailles, France.
- Jentzsch, G. (2002): Temperaturverträglichkeit der Gesteine – Neigung zur Ausbildung von Wasserwegsamkeiten. Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (Hrsg.). K-Mat 12-13: 28 S.; Berlin.
- Karnin, W.-D., Gast, R., Bärle, C., Clever, B., Kühn, M. & Sommer, J. (2006): Play types, structural history and distribution of middle Buntsandstein gas fields in NW Germany; observations and their genetic interpretation. ZDGG, 157, 1: S. 121-133.
- KEG (2003): Kernenergiegesetz vom 21.03.2003. KEG (Stand am 1. Januar 2009). (Systematische Sammlung des Bundesrechts SR 732.1). Schweiz.
- Kienzler, B., Schüßler, W. & Metz, V. (2001): Günstige hydrochemische Verhältnisse. – Abschlussbericht: Ermittlung von Eignungskriterien von geologischen Formationen für die Endlagerung radioaktiver Abfälle mittels geochemischer Analysen. Forschungszentrum Karlsruhe – Institut für Nukleare Entsorgungstechnik (FZK-INE), 03/01: 30 S.; Karlsruhe.
- Kockel, F., Wehner, H. & Gerling, P. (Hrsg.) (1994): Petroleum Systems of the Lower Saxony Basin, Germany. 60. AAPG Memoir: S. 573-586.
- KTA 1401 (2013): Sicherheitstechnische Regel des KTA - KTA 1401 - Allgemeine Anforderungen an die Qualitätssicherung, Fassung 2013-11.
- Lappin, A. R. (1988): Summary of Site-Characterization Studies conducted from 1983 through 1987 at the Waste Isolation Pilot Plant (WIPP) Site, Southeastern New Mexico. Sandia National Laboratories, SAND88-0157 UC-70, SANDIA REPORT: 275; Albuquerque, New Mexico.
- Legifrance (1991): LOI n° 91-1381 du 30 décembre 1991 relative aux recherches sur la gestion des déchets radioactifs (1). NOR: INDX9100071L, Legifrance.gouv.fr.
- Legifrance (2016): LOI n° 2016-1015 du 25 juillet 2016 précisant les modalités de création d'une installation de stockage réversible en couche géologique profonde des déchets radioactifs de haute et moyenne activité à vie longue (1) Legifrance.gouv.fr.

- Legifrance (2019): LOI n° 2006-739 du 28 juin 2006 de programme relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs (1). NOR: ECOX0600036L - Version consolidée au 07 novembre 2019: Politique nationale pour la gestion durable des matières et des déchets radioactifs. Legifrance.gouv.fr.
- Lorenz, P. & Lahodynsky, R. (2013): ATOM Studie - Tschechische Endlagerpläne für geologische Tiefenlager – historische Entwicklung, wissenschaftliche und politische Beurteilung, Auswirkungen auf Österreich. Land Niederösterreich: 65 S.; Wien.
- Lux, K.-H. (2002): Entwicklung und Fundierung der Anforderung „Geringe Neigung zur Bildung von Wegsamkeiten“ - Gutachten im Auftrag des AkEnd. TU- Clausthal: 103 S.; Clausthal-Zellerfeld.
- Mazurek, M., Gautschi, A., Marschall, P., Vigneron, G., Lebon, P. & Delay, J. (2008): Transferability of geoscientific information from various sources (study sites, underground rock laboratories, natural analogues) to support safety cases for radioactive waste repositories in argillaceous formations. *Physics and Chemistry of the Earth*, 33, 1: 95-105. DOI: DOI: 10.1016/j.pce.2008.10.046
- Menning, M. (2018): Die Stratigraphische Tabelle von Deutschland 2016 (STD 2016). *Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften : ZDGG*, 169 S., 2. DOI:<https://doi.org/10.1127/zdgg/2018/0161>
- Mora, C. J. (1999): Sandia and the Waste Isolation Pilot Plant 1974 - 1999 - Being an Accurate and Truthful Historical Account of Sandia National Laboratories' Contribution in Resolving the Technical Issues in a Dynamic Political and Societal Framework. Sandia National Laboratories, SAND99-1482; Albuquerque, New Mexico.
- Nagra (2001): Sondierbohrung Benken - Untersuchungsbericht. Nagra Technischer Bericht, NTB 00-01: 288 S.; Wettingen/Schweiz.
- Nagra (2002): Projekt Opalinuston. „Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse - Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle“. NAGRA, Nagra Technischer Bericht, NTB 02-03: 560 S.; Wettingen/Schweiz.
- Nagra (2008a): Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager. Begründung der Abfallzuteilung, der Barrierensysteme und der Anforderungen an die Geologie - Bericht zur Sicherheit und technischen Machbarkeit Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, NTB 08-05: 659 S.; Wettingen/Schweiz.

- Nagra (2008b): Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager. Darlegung der Anforderungen, des Vorgehens und der Ergebnisse. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, NTB 08-03: 428 S.; Wetztingen/Schweiz.
- Nagra (2008c): Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager. Geologische Grundlagen. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, NTB 439 S.; Wetztingen/Schweiz.
- Nagra (2010): Beurteilung der geologischen Unterlagen für die provisorischen Sicherheitsanalysen in SGT Etappe 2 - Klärung der Notwendigkeit ergänzender geologischer Untersuchungen. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, NTB 10-01: 390 S.; Wetztingen/Schweiz.
- Nagra (2014a): SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage. Charakteristische Dosisintervalle und Unterlagen zur Bewertung der Barriersysteme. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, NTB 14-03; Wetztingen/Schweiz.
- Nagra (2014b): SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage. Geologische Grundlagen, Dossier I - VI. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, NTB 14-02; Wetztingen/Schweiz.
- Nagra (2014c): SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage. Sicherheitstechnischer Bericht zu SGT Etappe 2 - Sicherheitstechnischer Vergleich und Vorschlag der in Etappe 3 weiter zu untersuchenden geologischen Standortgebiete. Textband + Anhang. Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Nagra Technischer Bericht, NTB 14-01; Wetztingen/Schweiz.
- NEA (1977): Objectives, concepts and strategies for the management of radioactive waste arising from nuclear power programmes. Paris.
- NEA (2007): Regulating the Long-Term Safety of Geological Disposal. 81 S.; Paris, France (OECD NEA).
- NEA/OECD (2020): Management and Disposal of High-Level Radioactive Waste: Global Progress and Solutions. OECD Publishing. Radioactive Waste Management 2020, NEA No. 7532; Paris.

- NERAS (2018): Planentwurf - Vorentwurf des Königlichen Erlasses zur Festlegung des Verabschiedungsverfahrens der nationalen Politik bezüglich der langfristigen sicheren Entsorgung von konditionierten hochradioaktiven und/oder langlebigen Abfällen und zur Bestimmung der langfristigen Entsorgungslösung für diesen Abfall. Nationale Einrichtung für radioaktive Abfälle und angereicherte Spaltmaterialien (NIRAS); Brüssel. <https://www.niras.be/de/der-planentwurf>
- NERAS (2020a): Bericht über die Umweltauswirkungen (Strategische Umweltverträglichkeitsprüfung – SUP) für den Vorentwurf des Königlichen Erlasses zur Festlegung des Verabschiedungsverfahrens der nationalen Politik bezüglich der langfristigen sicheren Entsorgung von konditionierten hochradioaktiven und/oder langlebigen Abfällen und zur Bestimmung der langfristigen Entsorgungslösung für diesen Abfall. Nationale Einrichtung für radioaktive Abfälle und angereicherte Spaltmaterialien (NIRAS), NIROND-TR 2020-07 D: 122 S.; Brüssel.
- NERAS (2020b): Strategische Umweltverträglichkeitsprüfung (SUP) über eine Endbestimmung für hochradioaktive und/oder langlebige Abfälle in Belgien - Nicht-technische Zusammenfassung. Nationale Einrichtung für radioaktive Abfälle und angereicherte Spaltmaterialien (NIRAS), NIROND-TR 2020-08 D: 18 S.; Brüssel.
- NWMO (2010): Moving Forward Together: Process for Selecting a Site for Canada's Deep Geological Repository for Used Nuclear Fuel. Nuclear Waste Management Organization: 48 S.; Toronto, Canada.
- NWMO (2016): Deep Geological Repository Conceptual Design Report Crystalline / Sedimentary Rock Environment. Nuclear Waste Management Organization, APM-REP-00440-0015 R001: 169 S.; Toronto, Canada.
- NWMO (2019): Implementing Adaptive Phased Management 2019 to 2023 - MARCH 2019. The Nuclear Waste Management Organization: 33 S.; Toronto, Canada.
- Ohlsson, Y. & Neretnieks, I. (1997): Diffusion data in granite - Recommended value. Svensk Kärnbränslehantering AB, SKB Technical Report 97-20. Stockholm.
- ONDRAF/NIRAS (2011): Waste Plan for the long-term management of conditioned high-level and/or long-lived radioactive waste and overview of related issues. NIROND 2011-02 E: 224 S.; Brüssel.
- Papp, R. (1997): Geisha – Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten in Salz und Hartgestein. Forschungszentrum Karlsruhe, Technik und Umwelt, Wiss. Berichte FZKA-PTE Nr. 3: 200 S.; Karlsruhe.

- Piskač, J.Š., P.; Prachař, I.; Tucauerová, D.; Romportl, B.; Blažek, J. (2003): Výběr lokality a staveniště HÚ v ČR - Analýza území ČR Fáze regionálního mapování - Zpráva část A. ENERGOPRŮZKUM PRAHA, Technischer Bericht. 112 S.
- POSIVA (2019): General Time Schedule for Final Disposal. http://www.posiva.fi/en/final_disposal/general_time_schedule_for_final_disposal#.XdZibdUxlaQ
- POSIVA (2000): The site selection process for a spent fuel repository in Finland - Summary report. POSIVA OY: Report Posiva 2000-15: 224 S. Helsinki, Finland.
- Rappsilber, I. (2003): Struktur und Entwicklung des nördlichen Saale-Beckens (Sachsen-Anhalt): Geophysik und Geologie. Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg; Halle.
- Reinhardt, H.-G. (1968-1991): Gruppe Regionales Kartenwerk: Regionales Kartenwerk der Reflexionsseismik; Tiefenlinienpläne und Mächtigkeitkarten 1 : 100 000, 1 : 200 000, 1 : 500 000; Leipzig.
- Reinhold, K. & Hammer, J. (2016): Steinsalzlager in den salinaren Formationen Deutschlands. Z. Dt. Ges. Geowiss. (German J. Geol.), 167, 2/3: S.167-190.
- Reinhold, K., Jahn, S., Kühnlenz, T., Ptock, L. & Sönke, J. (2013): Methodenentwicklung und Anwendung eines Sicherheitsnachweiskonzeptes für einen generischen HAW-Endlagerstandort im Tonstein (AnSichT) : Endlagerstandortmodell Nord (AnSichT). Teil 1: Beschreibung des geologischen Endlagerstandortmodells. BGR, Zwischenbericht: 71 S.; Hannover.
- RWM (2016): Geological Disposal - National Geological Screening -Detailed Technical Instructions and Protocols. Radioactive Waste Management Limited (RWM), Technical Note no. 24600903: 36 S.; Oxfordshire.
- RWM (2018): Site Evaluation - How we will evaluate sites in England - A Public Consultation. Radioactive Waste Management Limited (RWM): 32 S..
- Scheibe, R., Seidel, K., Vormbaum, M. & Hoffmann, N. (2005): Magnetic and gravity modelling of the crystalline basement in the North German Basin. Z. dt. Ges. Geowiss.: S. 291 - 298; Stuttgart.

- Schramm, M. (2015): ERA Morsleben : Genetische Interpretation salinärer Lösungen aus dem Grubengebäude (ERAM). Zutrittsvolumina, geochemische Zusammensetzung, Herkunft und sicherheitliche Bewertung der Lösungszutritte in Lager H und in Abbau 1a im Zeitraum 01.01.2011 bis 31.12.2013. Bundesanst. f. Geowiss. u. Rohstoffe, Zwischenbericht: 79 S.; Hannover.
- SGD (Staatliche Geologische Dienste Deutschlands) (2016): Datengrundlagen für die geowissenschaftlichen Kriterien im Rahmen des Standortauswahlverfahrens – Sachstand. (In: 53a, K.-M. (Hrsg.). K-Mat 53a; Berlin (Bundestag).
- Siemann, M.G. & Ellendorf, B. (2001): The composition of gases in fluid inclusions of late Permian (Zechstein) marine evaporites in Northern Germany. Chemical Geology, 173 (1-3): S. 31-44; Amsterdam.
- SKB (1994): Treatment and final disposal of nuclear waste - supplement to the 1992 programme in response to the government decision of December 16, 1993. Svensk Kärnbränslehantering AB: 105 S.; Stockholm.
- SKB (2000a): What requirements does the KBS-3 repository make on the host rock? Geoscientific suitability indicators and criteria for siting and site evaluation. Svensk Kärnbränslehantering AB. Technical Report, TR-00-12: 148 S.; Stockholm.
- SKB (2000b): Integrated account of method, site selection and programme prior to the site investigation phase. Svensk Kärnbränslehantering AB. Technical Report, TR-01-03: 261 S.; Stockholm.
- SKB (2009): Final repository for spent fuel in Forsmark – basis for decision and reasons for site selection. Svensk Kärnbränslehantering AB, SKBdoc 1221293.
- SKB (2011): Site selection - siting of the final repository for spent nuclear fuel. Svensk Kärnbränslehantering AB, R-11-07: 108 S.; Stockholm.
- SKB (2016): Äspö Hard Rock Laboratory - A unique place for experiments and research. Svensk Kärnbränslehantering AB, Brochure: 8 S.; Stockholm.
- SKB (2019): RD&D Programme 2019 - Programme for research, development and demonstration of methods for the management and disposal of nuclear waste. Svensk Kärnbränslehantering AB, Technical Report, TR-19-24: 385 S.; Stockholm.
- SKB (2020): The Spent Fuel Repository. Svensk Kärnbränslehantering AB; Stockholm. 07.07.2020. <https://www.skb.com/future-projects/the-spent-fuel-repository/>

- Skiba, P. & Gabriel, G. (2010): Schwerekarte der Bundesrepublik Deutschland 1:1000000. Publisher; Hannover.
- SSMFS (2008): 21: The Swedish Radiation Safety Authority's regulations and general advice concerning safety in connection with the disposal of nuclear material and nuclear waste. Swedish Radiation Safety Authority, ISSN 2000-0987.
- StandAG (2017): 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. Deutscher Bundestag.
- SÚRAO (2017a): DGR DEVELOPMENT IN THE CZECH REPUBLIC - ACTION PLAN 2017-2025. Technical Report, Technical Report No.: 112/2017: 55 S.; Prague.
- SÚRAO (2017b): MP.22 - POŽADAVKY, INDIKÁTORY VHODNOSTI A KRITÉRIA VÝBĚRU LOKALIT PRO UMÍSTĚNÍ HLUBINNÉHO ÚLOŽIŠTĚ. Správy úložišť radioaktivních odpadů: 51 S..
- Theys, P. (1999): Log data acquisition and quality control. Editions Technip Aufl.; Paris.
- Uzdowski, E. & Herrmann, A.G. (2002): Die Hydrolyse von Kationen in Evaporit-Lösungen und bei der MgSO₄-Verarmung von Meerwasser. Kali und Steinsalz, 3: S. 24-31; Kassel.
- Uzdowski, E. & Herrmann, A.G. (2003): Eisen und Mangan in konzentrierten Evaporitlösungen. Kali und Steinsalz, Jhrg. 2003, 2: S.6-11; Kassel.
- U.S. Nuclear Waste Technical Review Board (2015): Designing a Process for Selecting a Site for a Deep-Mined, Geologic Repository for High-Level Radioactive Waste and Spent Nuclear Fuel - Overview and Summary - Report to the United States Congress and the Secretary of Energy. Report: 51 S..
- USNRC (2010a): Safety Evaluation Report Related to Disposal of High-Level RadioactiveWastes in a GeologicRepository at YuccaMountain, Nevada - Volume 1: General Information. United States Nuclear Regulatory Commission, NUREG-1949, Vol. 1.
- USNRC (2010b): Safety Evaluation Report Related to Disposal of High-Level RadioactiveWastes in a GeologicRepository at YuccaMountain, Nevada - Volume 2: Repository Safety Before Permanent Closure. United States Nuclear Regulatory Commission, NUREG-1949, Vol. 2

- UVEK (2018): Standortsuche für geologische Tiefenlager: Bundesrat startet dritte Etappe mit Jura Ost, Nördlich Lägern und Zürich Nordost. (In: UVEK (Hrsg.)). 22.11.2018.
- van den Kerkhof, K. & Simon (2014): Deciphering fluid inclusions in high-grade rocks. *Geoscience Frontiers*, 5: S. 683-695.
- VDI (2013): Tiefbohrverfahren - VDI 3210, Technische Regel. (Verein Deutscher Ingenieure, Beuth Verlag GmbH).
- v. Goerne, G., Bebiolka, A., Beushausen, M., Kuhlmann, G., Landsmann, B., Mrugalla, S. & Reinhold, K. (2018): Standortauswahl - Konzept zur generellen Vorgehensweise zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Abschlussbericht: 39 S.; Hannover.
- Wang, J. C., L.; Su, R.; Zhao, X. (2018): The Beishan underground research laboratory for geological disposal of high-level radioactive waste in China: Planning, site selection, site characterization and in situ tests. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*: 24 S..
- Woller, F. (2006): Provedení geologických a dalších prací pro hodnocení a zúžení lokalit pro umístění hlubinného úložiště - Zkrácená závěrečná zpráva sdružení GEOBARIÉRA. SÚRAO. Technischer Bericht: 142 S.; Prag.

Abkürzungsverzeichnis

Andra	Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Frankreich)
ALZ	Auflockerungszone
AkEnd	Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte
AP	Arbeitspaket
ASN	Autorité de sûreté nucléaire (Frankreich)
AWK	geowissenschaftliche Abwägungskriterien
BFE	Bundesamt für Energie (Schweiz)
BfE	Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit (BRD)
BGE	Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
BGE TEC	BGE Technology GmbH (vor 2017 DBE TEC)
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BGS	British Geological Survey (Großbritannien)
BRIUG	Beijing Research Institute of Uranium Geology
BT-DRS	Bundestagsdrucksache
CAEA	China Atomic Energy Authority
ČGU	Český geologický ústav/Geologischer Dienst Tschechien
CIGEO	Centre industriel de stockage réversible profond de déchets radioactifs Meuse/Haute-Marne (Frankreich)
DGGT	Deutsche Gesellschaft für Geotechnik
DOE	Department of Energy (USA)
EKRA	Entsorgungskonzepte für radioaktive Abfälle (Schweiz)
ENSI	Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (Schweiz)
EL-KOM	Endlagerkommission
ESCHT	Expertengruppe Schweizer Tiefenlager
ewG	Einschlußwirksamer Gebirgsbereich
GAO	U. S. Government Accountability Office

GDF	Geological Disposal Facility (Großbritannien)
GK25/50	Geologische Karte 1:25000/1:50000
GRS	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH
GÜK200	Geologische Übersichtskarte der BRD 1:200000
HAA	hochradioaktive und alphatoxische Abfälle
HAW	High Active Waste/hochradioaktive Abfälle
IAEA	International Atomic Energy Agency
ICRP	International Commission on Radiological Protection
ICP-MS	Massenspektrometrie
k_f [m/s]	Durchlässigkeitsbeiwert [m/s]
KKW	Kernkraftwerk
KTA	Kerntechnischer Ausschuss
KW	Kohlenwasserstoffe
MCDA	Multi Criteria Decision Analysis
MŽP	Ministerstvo životního prostředí/Umweltministerium (Tschechien)
Nagra	Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (Schweiz)
NEA	Nuclear Energy Agency
NERAS	Nationale Einrichtung für radioaktive Abfälle und angereicherte Spaltmaterialien
NGS	National Geological Screening (Großbritannien)
NN	Normal Null (Teufenbezug)
NTB	Nagra Technischer Bericht (Schweiz)
NWMO	Nuclear Waste Management Organization (Kanada)
OECD	Organization for Economic Cooperation and Development/Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung
ONDRAF/NIRAS	Organisme national des déchets radioactifs et des matières fissiles enrichies / Nationale instelling voor radioactief afval en verrijkte Splijtstoffen (Belgien)
QMS	Qualitätsmanagementsystem

RESUS	Grundlagenentwicklung für repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen und zur sicherheitsgerichteten Abwägung von Teilgebieten mit besonders günstigen geologischen Voraussetzungen für die sichere Endlagerung Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle
RFA	Röntgenfluoreszenzanalyse
RWM	Radioactive Waste Management (Großbritannien)
SIMS	Sekundärionen-Massenspektrometer
SGD	Staatliche Geologische Dienste (BRD)
SGT	Sachplan geologische Tiefenlager
SKB	Svensk Kärnbränslehantering Aktiefbolag/Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company (Schweden)
SMA	schwach- und mittelradioaktive Abfälle
SSMFS	Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter (Schweden)
StandAG	Standortauswahlgesetz
STUK	Säteilyturvakeskus/Strahlenschutzbehörde (Finnland)
SUJB	Státní úřad pro jadernou bezpečnost/Behörde für Nuklearsicherheit (Tschechien)
SÚRAO	Správa úložišť radioaktivních odpadů (Tschechien)
TDS	Total Dissolved Solids
URL	Underground Research Laboratory
USNRC	United States Nuclear Regulatory Commission
UVEK	Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (Schweiz)
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
WIPP	Waste Isolation Pilot Plant (USA)

Tabellenverzeichnis

Seite

Tab. 1:	Übersicht über übliche Bohrlochmessverfahren	38
Tab. 2:	Erfahrungsbereiche zur Barrierewirksamkeit der Wirtsgesteine (0 = keine Erfahrungen, 1 = Erfahrungen vorhanden)	47
Tab. 3:	Einstufung der Daten nach Qualitätskriterien nach dem Ampelsystem ..	55
Tab. 4:	Beispiele zur Einstufung der Datenqualität	58
Tab. 5:	Ergänzende Qualitätsmerkmale	61
Tab. 6:	Zielsetzung von Bohrungen als Qualitätsmerkmal	62
Tab. 7:	Qualitätsmerkmale von Bohrungen	63
Tab. 8:	Zusatzinformationen zu Bohrungen	64
Tab. 9:	Qualitätseinstufung von reflexionsseismischen Messungen	64
Tab. 1.1:	Bewertungsrelevante Eigenschaften, ihre Indikatoren und die Zuordnung zu den Wertungsgruppen in Anlage 1 des StandAG	118
Tab. 1.2:	Bewertungsrelevante Eigenschaften, ihre Indikatoren und die Zuordnung zu den Wertungsgruppen in Anlage 2 des StandAG	121
Tab. 1.3:	Bewertungsrelevante Eigenschaften, ihre Indikatoren und die Zuordnung zu den Wertungsgruppen in Anlage 3 des StandAG	123
Tab. 1.4:	Aufstellung der bewertungsrelevanten Eigenschaften, ihrer Indikatoren und Zuordnung zu den Wertungsgruppen in Anlage 6 StandAG	129
Tab. 1.5:	Bewertungsrelevante Eigenschaften, ihre Indikatoren und die Zuordnung zu den Wertungsgruppen in Anlage 7 des StandAG	132
Tab. 1.6:	Bewertungsrelevante Eigenschaften, ihre Indikatoren und die Zuordnung zu den Wertungsgruppen in Anlage 9 des StandAG	133
Tab. 1.7:	Bewertungsrelevante Eigenschaften, ihre Indikatoren und die Zuordnung zu den Wertungsgruppen in Anlage 11 des StandAG	137
Tab. 2.1:	Ermittlung der zur Anwendung der Abwägungskriterien erforderlichen geowissenschaftlichen Informationen/Daten – zu Anlage 1 StandAG ..	139
Tab. 2.2:	Ermittlung der zur Anwendung der Abwägungskriterien erforderlichen geowissenschaftlichen Informationen/Daten – zu Anlage 2 StandAG ..	141
Tab. 2.3:	Ermittlung der zur Anwendung der Abwägungskriterien erforderlichen geowissenschaftlichen Informationen/Daten – zu Anlage 3 StandAG ..	143
Tab. 2.4:	Ermittlung der zur Anwendung der Abwägungskriterien erforderlichen geowissenschaftlichen Informationen/Daten – zu Anlage 4 StandAG ..	146
Tab. 2.5:	Ermittlung der zur Anwendung der Abwägungskriterien erforderlichen geowissenschaftlichen Informationen/Daten – zu Anlage 5 StandAG ..	147
Tab. 2.6:	Ermittlung der zur Anwendung der Abwägungskriterien erforderlichen geowissenschaftlichen Informationen/Daten – zu Anlage 6 StandAG ..	148

Seite

Tab. 2.7:	Ermittlung der zur Anwendung der Abwägungskriterien erforderlichen geowissenschaftlichen Informationen/Daten – zu Anlage 7 StandAG ..	150
Tab. 2.8:	Ermittlung der zur Anwendung der Abwägungskriterien erforderlichen geowissenschaftlichen Informationen/Daten – zu Anlage 8 StandAG ..	151
Tab. 2.9:	Ermittlung der zur Anwendung der Abwägungskriterien erforderlichen geowissenschaftlichen Informationen/Daten – zu Anlage 9 StandAG ..	152
Tab. 2.10:	Ermittlung der zur Anwendung der Abwägungskriterien erforderlichen geowissenschaftlichen Informationen/Daten – zu Anlage 10 StandAG ..	153
Tab. 2.11:	Ermittlung der zur Anwendung der Abwägungskriterien erforderlichen geowissenschaftlichen Informationen/Daten – zu Anlage 11 StandAG ..	155
Tab. 3.1:	Verlauf des finnischen Standortauswahlverfahrens nach POSIVA (2000) ..	169
Tab. 3.2:	Auswahlverfahren in Etappe 2 (Bewertung der Standortgebiete) ..	173
Tab. 3.3:	Anforderungen an die Wirtsgesteine und Indikatoren (Lorenz & Lahodynsky 2013) nach (Piskač 2003) ..	175
Tab. 3.4:	Anforderungen und Indikatoren aus Tabelle 2 und der zugehörigen zulässigen Limits (Lorenz & Lahodynsky 2013) nach (Piskač 2003)	176
Tab. 3.5:	Anforderungen, Indikatoren aus Tabelle 2 und Limits (Auswahlkriterien) für eine weitergehende Standortgebietsauswahl (Lorenz & Lahodynsky 2013) nach (Piskač 2003) ..	177

Abbildungsverzeichnis	Seite
Abb. 1: Schematische Darstellung der Phasen des Auswahlverfahrens (BGE 2019)	7
Abb. 2: Kriteriengruppen und Kriterien zur Standortevaluation nach SGT 2011	73
Abb. 3: Zusammenhang zwischen Kriteriengruppe, Kriterium und zu beurteilende Aspekte am Beispiel des Kriteriums „Räumliche Ausdehnung“ (BFE 2011)	73
Abb. 4: Zusammenhang zwischen „Zu beurteilende Aspekte“ und „Relevanten Indikatoren“ am Beispiel des Kriteriums „Erosion“ (BFE 2011)	74
Abb. 5: Erarbeitung von Vorschlägen für geologische Standortgebiete für das SMA- bzw. das HAA-Lager: Schritte gem. Sachplan geologische Tiefenlager (SGT), Etappe 1 - aus (Nagra 2008b)	76
Abb. 6: Vereinfachtes Schema des schrittweises Vorgehen bei der Auswahl und Bewertung von geologische Standorten für ein HAW-Endlager in der Schweiz nach NTB 08-03	79
Abb. 7: Schema der Gesamtbewertung durch hierarchische arithmetische Mittelwertbildung (ESCHT 2010)	80
Abb. 8: Überblick über die Einengungsprozedur und die verwendeten Begriffe (Nagra 2008b)	81
Abb. 9: Bewertung des prioritären Bereichs mit dem Wirtsgestein Opalinuston (Nagra 2008b).	82
Abb. 10: Bewertung der bevorzugten Bereiche für das HAA-Lager auf den Hierarchiestufen Kriterien und Kriteriengruppe gemäß SGT (Nagra 2008b).	83
Abb. 11: Vorgaben des ENSI bezüglich der zu verwendenden sicherheitstechnischen Methodik für die Auswahl von geologischen Standortgebieten in Etappe 2, aus (Nagra 2014c)	86
Abb. 12: Entscheidrelevante Merkmale und Indikatoren für die Identifikation eindeutiger Nachteile der Wirtsgesteine (Nagra 2014c)	91
Abb. A-3.1: Abhängigkeiten zwischen Mindestanforderungen, Indikatoren und Kriterien	166

Anhangverzeichnis	Seite
Anhang 1:	114
Dokumentation der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien des StandAG sowie die entsprechenden Erläuterungen aus dem Projekt RESUS	
Anhang 2:	139
Tabellen: Ermittlung der zur Anwendung der Abwägungskriterien erforderlichen geowissenschaftlichen Informationen/Daten – zu Anlage 1 bis 11 StandAG	
Anhang 3:	156
Recherche zum Stand der internationalen Standortauswahlverfahren	

Anhang 1:

Dokumentation der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien des StandAG sowie die entsprechenden Erläuterungen aus dem Projekt RESUS

Inhaltsverzeichnis Anhang 1

1	Anlage 1: Kriterium zur Bewertung des Transportes radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen im ewG	117
1.1a	Indikator: Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers	118
1.2a	Indikator: Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit des Gesteinstyps	118
1.3a	Indikator: Charakteristischer effektiver Diffusionskoeffizient des Gesteinstyps für tritiiertes Wasser (HTO) bei 25 °C	119
1.4a	Indikator: Absolute Porosität (von Tonstein)	119
1.4b	Indikator: Verfestigungsgrad (von Tonstein)	120
2	Anlage 2: Kriterium zur Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper	120
2.1a	Indikator: Barrierenmächtigkeit	121
2.1b	Indikator: Grad der Umschließung des Einlagerungsbereichs durch einen ewG	122
2.2a	Indikator: Teufe der oberen Begrenzung des erforderlichen ewG	122
2.3a	Indikator: Flächenhafte Ausdehnung bei gegebener Mächtigkeit (Vielfaches des Mindestflächenbedarfs)	122
2.4a	Indikator: Gesteinsschichten mit Möglichkeit zur Induzierung beziehungsweise Verstärkung der Grundwasserbewegung im ewG (Tongestein)	122
3	Anlage 3: Kriterium zur Bewertung der räumlichen Charakterisierbarkeit	123
3.1a	Indikator: Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich	124
3.1b	Indikator: Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften	125
3.1c	Indikator: Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit	125
3.2a	Indikator: Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)	125
4	Anlage 4: Kriterium zur Bewertung der langfristigen Stabilität der günstigen Verhältnisse	126
4.1a	Indikator: Zeitspanne, über die sich die Mächtigkeit des ewG nicht wesentlich verändert hat,	126
4.1b	Indikator: Zeitspanne, über die sich die Ausdehnung des ewG nicht wesentlich verändert hat,	127

- Anhang 1 -

4.1c	Indikator: Zeitspanne, über die sich die Gebirgsdurchlässigkeit des ewG nicht wesentlich verändert hat.	127
5	Anlage 5: Kriterium zur Bewertung der günstigen gebirgsmechanischen Eigenschaften	127
5.1a	Indikator: Das Gebirge kann als geomechanisches Haupttragelement die Beanspruchung aus Auffahrung und Betrieb ohne planmäßigen tragenden Ausbau, abgesehen von einer Kontursicherung, bei verträglichen Deformationen aufnehmen;	128
5.1b	Indikator: Um Endlager Hohlräume sind keine mechanisch bedingten Sekundärpermeabilitäten außerhalb einer unvermeidbaren konturnah entfestigten Auflockerungszone zu erwarten.	128
6	Anlage 6: Kriterium zur Bewertung der Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten	128
6.1a	Indikator: Verhältnis repräsentative Gebirgsdurchlässigkeit / repräsentative Gesteinsdurchlässigkeit	130
6.1b	Indikator: Erfahrungen über die Barrierewirksamkeit der Gebirgsformationen	130
6.1c	Indikator: Duktilität des Gesteins	131
6.2a	Indikator: Rückbildung der Sekundärpermeabilität durch Risschließung	131
6.2b	Indikator: Rückbildung der mechanischen Eigenschaften durch Rissverheilung	131
6.3	Indikator: Zusammenfassende Beurteilung	131
7	Anlage 7: Kriterium zur Bewertung der Gasbildung	132
7.1a	Indikator: Wasserangebot im Einlagerungsbereich	132
8	Anlage 8: Kriterium zur Bewertung der Temperaturverträglichkeit	132
8.1a	Indikator: Neigung zur Bildung wärmeinduzierter Sekundärpermeabilitäten	133
8.1b	Indikator: Temperaturstabilität des Wirtsgesteins hinsichtlich Mineralumwandlungen	133
9	Anlage 9: Kriterium zur Bewertung des Rückhaltevermögens im ewG	133
9.1a	Indikator: Sorptionsfähigkeit der Gesteine des ewG	134
9.1b	Indikator: Mineralphasen mit großer reaktiver Oberfläche	134
9.1c	Indikator: Ionenstärke des Grundwassers in der geologischen Barriere	134
9.1d	Indikator: Öffnungsweiten der Gesteinsporen	134
10	Anlage 10: Kriterium zur Bewertung der hydrochemischen Verhältnisse	135

- Anhang 1 -

10.1a	Indikator: Ein chemisches Gleichgewicht zwischen dem Wirtsgestein im Bereich des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und dem darin enthaltenen tiefen Grundwasser	135
10.1b	Indikator: Neutrale bis leicht alkalische Bedingungen (pH-Wert 7 bis 8) im Bereich des Tiefenwassers	135
10.1.c	Indikator: Ein anoxisch-reduzierendes Milieu im Bereich des Tiefenwassers	136
10.1d	Indikator: Ein möglichst geringer Gehalt an Kolloiden und Komplexbildnern im Tiefenwasser	136
10.1e	Indikator: Eine geringe Karbonatkonzentration im Tiefenwasser	136
11	Anlage 11: Kriterium zur Bewertung des Schutzes des ewG durch das Deckgebirge	136
11.1a	Indikator: Überdeckung des ewG mit grundwasserhemmenden Gesteinen	138
11.1b	Indikator: Verbreitung und Mächtigkeit erosionshemmender Gesteine im Deckgebirge des ewG	138
11.1c	Indikator: Strukturelle Komplikationen im Deckgebirge	138

Dokumentation der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien des StandAG sowie die entsprechenden Erläuterungen aus dem Projekt RESUS

Das StandAG¹ benennt elf geowissenschaftliche Abwägungskriterien und zu diesen Kriterien zahlreiche Indikatoren. RESUS ist das Akronym für das laufende Projekt „Grundlagenentwicklung für repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen und zur sicherheitsgerichteten Abwägung von Teilgebieten mit besonders günstigen geologischen Voraussetzungen für die sichere Endlagerung Wärme entwickelnder hochradioaktiver Abfälle“.

Die Nachvollziehbarkeit von Analysen an generischen Standortmodellen erfordert ein für Endlagerfragen spezifisches Verständnis bezüglich der nach StandAG anzuwendenden Kriterien. Für die geowissenschaftlichen Abwägungskriterien des StandAG wurden bereits im F&E-Projekt RESUS die Bewertungsgrößen und Indikatoren erläutert und fachliche Vorschläge zum Verständnis der gesetzlichen Kriterien erarbeitet (GRS 2019).

Zur Vermeidung einer inkonsistenten Anwendung der Kriterien werden die vorgeschlagenen Definitionen der Indikatoren bzw. Bewertungsgrößen der Abwägungskriterien aus dem Vorhaben RESUS in das Arbeitspaket „Konzept zur generellen Vorgehensweise zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien – Schritt 2“ übernommen (im Folgenden kursiv gekennzeichnet). In Kapitel 2.2 „Handlungsoptionen zum Umgang mit unbestimmten Begriffen“ werden die Definitionen herangezogen und diskutiert. Zu den Definitionen „flächenhafte Ausdehnung“ sowie „Riss“ werden sprachliche Anpassungen empfohlen.

1 Anlage 1: Kriterium zur Bewertung des Transportes radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen im ewG

Der Transport radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen und Diffusion im einschlusswirksamen Gebirgsbereich soll so gering wie möglich sein. Bewertungsrelevante Eigenschaften dieses Kriteriums sind die im einschlusswirksamen Gebirgsbereich vorherrschende Grundwasserströmung, das Grundwasserangebot und die Diffusionsgeschwindigkeit entsprechend der untenstehenden Tabelle. Solange die entsprechenden Indikatoren nicht standortspezifisch erhoben sind, kann für die Abwägung das jeweilige Wirtsgestein als Indikator verwendet werden.

¹ StandAG: Standortauswahlgesetz vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), das zuletzt durch Artikel 3 des Gesetzes vom 12. Dezember 2019 (BGBl. I 2019, Nr. 48, S. 2510) geändert worden ist.

- Anhang 1 -

Tab. 1.1: Bewertungsrelevante Eigenschaften, ihre Indikatoren und die Zuordnung zu den Wertungsgruppen in Anlage 1 des StandAG

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße beziehungsweise Indikator des Kriteriums	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig
Grundwasserströmung	Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers [mm/a]	< 0,1	0,1 – 1	> 1
Grundwasserangebot	Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit des Gesteinstyps [m/s]	< 10 ⁻¹²	10 ⁻¹² – 10 ⁻¹⁰	> 10 ^{-10*}
Diffusionsgeschwindigkeit	Charakteristischer effektiver Diffusionskoeffizient des Gesteinstyps für tritiiertes Wasser (HTO) bei 25 °C [m ² /s]	< 10 ⁻¹¹	10 ⁻¹¹ – 10 ⁻¹⁰	> 10 ⁻¹⁰
Diffusionsgeschwindigkeit bei Tonstein	Absolute Porosität	< 20 %	20 % – 40 %	> 40 %
	Verfestigungsgrad	Tonstein	fester Ton	halbfester Ton

1.1a Indikator: Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers

Definition

Die Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers ist die Transportgeschwindigkeit des Wassers bzw. der darin gelösten konservativen Stoffe im Gestein. Sie definiert damit die im Gestein zurückgelegte geometrische Strecke eines konservativen Stoffes in einem bestimmten Zeitintervall. Entsprechend dem Darcy-Gesetz gilt:

$$v_a = (k_f \cdot i) / \eta_e$$

v_a = Abstandsgeschwindigkeit [m/s]
 k_f = Durchlässigkeitsbeiwert [m/s]
 i = hydraulischer Gradient [m/m]
 η_e = durchflusswirksame Porosität [-]

1.2a Indikator: Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit des Gesteinstyps

Definition

Die Gebirgsdurchlässigkeit ist die hydraulische Leitfähigkeit eines natürlichen Gesteinsverbandes. Sie setzt sich aus der Trennfugendurchlässigkeit und der Gesteinsdurchlässigkeit (Matrixdurchlässigkeit) zusammen.

Die charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit ist der räumlich gemittelte Durchlässigkeitsbeiwert k_f im Darcy-Gesetz. Sie gibt den Volumenstrom Q von Grundwasser durch die geometrische Querschnittsfläche A eines Grundwasserleiters unter einem bestimmten hydraulischen Gradienten i [m/m] an:

- Anhang 1 -

$$k_f = Q / (A \cdot i)$$

k_f = Gesteinsdurchlässigkeit [m/s]

Q = Volumenstrom in [m³/s]

A = durchströmte Fläche [m²]

i = hydraulischer Gradient [m/m]

1.3a Indikator: Charakteristischer effektiver Diffusionskoeffizient des Gesteinstyps für tritiiertes Wasser (HTO) bei 25 °C

Definition

Der charakteristische effektive Diffusionskoeffizient ist der räumlich gemittelte makroskopische Diffusionskoeffizient in einem Gestein. Der effektive Diffusionskoeffizient D_{eff} [m²/s] ist definiert durch

$$D_{\text{eff}} = D_0 \cdot n_{\text{diff}} \cdot G,$$

wobei D_0 der Diffusionskoeffizient in freiem Wasser, n_{diff} die diffusionswirksame Porosität des Gesteins und G ein gesteinspezifischer Faktor ≤ 1 ist.

Das Produkt aus dem gesteinspezifischen Faktor und dem Diffusionskoeffizienten im freien Wasser wird als Porendiffusionskoeffizient D_p bezeichnet: $D_p = D_0 \cdot G$.

Der Diffusionskoeffizient D_0 von tritiierten Wasser in freiem Wasser (Selbstdiffusion) bei 25°C beträgt $2,27 \cdot 10^{-9}$ m²/s.

1.4a Indikator: Absolute Porosität (von Tonstein)

Definition

Die absolute Porosität n_p ist das Verhältnis von Hohlraumvolumen zum Gesamtvolumen des Gesteins. Sie wird durch den Quotienten des Volumens aller Poren zu dem Gesamtvolumen beschrieben:

$$n_p = V_p / V_{\text{ges}}$$

1.4b Indikator: Verfestigungsgrad (von Tonstein)

Definition

Der Verfestigungsgrad ist eine qualitative Bewertung für die Festigkeit von Tongestein und ist abhängig vom Grad der Kompaktion sowie diversen chemisch-mineralogischen Wechselwirkungen (z. B. Zementation).

2 Anlage 2: Kriterium zur Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper

Die barrierewirksamen Gesteine eines einschlusswirksamen Gebirgsbereiches müssen mindestens über eine Mächtigkeit verfügen, die den sicheren Einschluss der Radionuklide über einen Zeitraum von einer Million Jahren bewirkt. Das voraussichtliche Einschlussvermögen soll möglichst hoch und zuverlässig prognostizierbar sein. Es ist unter Berücksichtigung der Barrierewirkung der unversehrten Barriere mittels Modellberechnungen abzuleiten, sobald die hierfür erforderlichen geowissenschaftlichen Daten vorliegen, spätestens für den Standortvorschlag nach § 18 Absatz 3 StandAG. Solange die für die rechnerische Ableitung notwendigen Daten noch nicht vorliegen, können die Lage, Ausdehnung und Mächtigkeit der barrierewirksamen Gesteinsformation, der Grad der Umschließung durch einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich sowie für das Wirtsgestein Tonstein deren Isolation von wasserleitenden Schichten und hydraulischen Potenzialbringern entsprechend der untenstehenden Tabelle als Indikatoren herangezogen werden.

Tab. 1.2: Bewertungsrelevante Eigenschaften, ihre Indikatoren und die Zuordnung zu den Wertungsgruppen in Anlage 2 des StandAG

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße beziehungsweise Indikator des Kriteriums	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig
Barrierewirksamkeit	Barrierenmächtigkeit [m]	> 150	100 – 150	50 – 100
	Grad der Umschließung des Einlagerungsbereichs durch einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich	vollständig	unvollständig, kleinere Fehlstellen in unkritischer Position	unvollständig; größere Fehlstellen, in kritischer Position
Robustheit und Sicherheitsreserven	Teufe der oberen Begrenzung des erforderlichen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs [m unter Geländeoberfläche]	> 500	300 – 500	
Volumen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs	flächenhafte Ausdehnung bei gegebener Mächtigkeit (Vielfaches des Mindestflächenbedarfs)	>> 2-fach	etwa 2-fach	<< 2-fach
Indikator „Potenzialbringer“ bei Tonstein Anschluss von wasserleitenden Schichten in unmittelbarer Nähe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs/ Wirtsgesteinkörpers an ein hohes hydraulisches Potenzial verursachendes Gebiet	Vorhandensein von Gesteinsschichten mit hydraulischen Eigenschaften und hydraulischem Potenzial, die die Induzierung beziehungsweise Verstärkung der Grundwasserbewegung im einschlusswirksamen Gebirgsbereich ermöglichen können.	keine Grundwasserleiter als mögliche Potenzialbringer in unmittelbarer Nachbarschaft zum Wirtsgestein/einchlusswirksamen Gebirgsbereich vorhanden		Grundwasserleiter in Nachbarschaft zum Wirtsgestein/einchlusswirksamen Gebirgsbereich vorhanden

Das Verständnis der in den folgenden Kapiteln dargelegten Definitionen der Indikatoren setzt über die in § 2 des StandAG gegebenen Begriffsbestimmungen hinaus eine Festlegung zum Begriff des Barrieregesteins voraus. Mit Barrieregestein werden in den folgenden Definitionen die Bereiche des Wirtsgesteins bzw. der überlagernden Gesteinsschichten bezeichnet, die die Mindestanforderungen nach § 23 des StandAG erfüllen.

2.1a Indikator: Barrierenmächtigkeit

Definition

Unter Barrierenmächtigkeit wird in den Fällen, in denen der Einlagerungsbereich innerhalb des Barrieregesteins liegt, der kleinste Abstand zwischen dem Einlagerungsbereich und dem Rand des Barrieregesteins verstanden, wobei diejenige Positionierung des Einlagerungsbereichs im Barrieregestein unterstellt wird, die diese Barrierenmächtigkeit maximiert. Der Einlagerungsbereich wird in seiner vertikalen Ausdehnung nicht berücksichtigt.

Für den Fall, dass der ewG den Einlagerungsbereich überlagert, wird die gesamte Mächtigkeit des Barrieregesteins im Hangenden des Einlagerungsbereichs betrachtet.

2.1b Indikator: Grad der Umschließung des Einlagerungsbereichs durch einen ewG

Definition

Der Grad der Umschließung des Einlagerungsbereichs durch den ewG ist eine Bewertung der geologischen Konfiguration dahingehend, ob entweder der Einlagerungsbereich Bestandteil des ewG ist, oder ob der Einlagerungsbereich außerhalb des ewG liegt.

2.2a Indikator: Tiefe der oberen Begrenzung des erforderlichen ewG

Definition

Die Tiefe der oberen Begrenzung des ewG ist der minimale Abstand des äußeren oberen Randes des ewG zur Geländeoberfläche.

2.3a Indikator: Flächenhafte Ausdehnung bei gegebener Mächtigkeit (Vielfaches des Mindestflächenbedarfs)

Definition

Die flächenhafte Ausdehnung ist das Verhältnis aus horizontaler Querschnittsfläche des Barrieregesteins und der Fläche des Endlagers.

Als Fläche des Endlagers ist analog zu dem in den Begründungen zum StandAG § 23 Absatz 5 Nummer 4 (Mindestanforderung „Fläche des Endlagers“) angegebene Flächenbedarf zu unterstellen: Für das Wirtsgestein Steinsalz ein Flächenbedarf von 3 km², für das Wirtsgestein Tongestein 10 km² und für das Wirtsgestein Kristallingestein 6 km².

2.4a Indikator: Gesteinsschichten mit Möglichkeit zur Induzierung beziehungsweise Verstärkung der Grundwasserbewegung im ewG (Tongestein)

Definition

Dieser Indikator ist eine qualitative Bewertung für Tongestein, ob grundwasserleitende Schichten in unmittelbarer Nähe des ewG bzw. des Wirtsgesteinskörpers existieren, die zum ewG eine hohe Potenzialdifferenz aufweisen oder aufbauen können.

3 Anlage 3: Kriterium zur Bewertung der räumlichen Charakterisierbarkeit

Die räumliche Charakterisierung der wesentlichen geologischen Barrieren, die direkt oder indirekt den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle gewährleisten, insbesondere des vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs oder des Einlagerungsbereichs, soll möglichst zuverlässig möglich sein. Bewertungsrelevante Eigenschaften hierfür sind die Ermittelbarkeit der relevanten Gesteinstypen und ihrer Eigenschaften sowie die Übertragbarkeit dieser Eigenschaften nach der untenstehenden Tabelle.

Tab. 1.3: Bewertungsrelevante Eigenschaften, ihre Indikatoren und die Zuordnung zu den Wertungsgruppen in Anlage 3 des StandAG

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße beziehungsweise Indikator des Kriteriums	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	ungünstig
Ermittelbarkeit der Gesteinstypen und ihrer charakteristischen Eigenschaften im vorgesehenen Endlagerbereich, insbesondere im vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereich	Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich	gering	deutlich, aber bekannt beziehungsweise zuverlässig erhebbar	erheblich und/oder nicht zuverlässig erhebbar
	Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften	gleichmäßig	kontinuierliche, bekannte räumliche Veränderungen	diskontinuierliche, nicht ausreichend genau vorhersagbare räumliche Veränderungen
	Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit	weitgehend ungestört (Störungen im Abstand > 3 km vom Rand des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs), flache Lagerung	wenig gestört (weitständige Störungen, Abstand 100 m bis 3 km vom Rand des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs), Flexuren	gestört (engständig zerblockt, Abstand < 100 m), gefaltet
Übertragbarkeit der Eigenschaften im vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereich	Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)	Fazies regional einheitlich	Fazies nach bekanntem Muster wechselnd	Fazies nach nicht bekanntem Muster wechselnd

Dem Abschlussbericht der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (EL-KOM 2016) (K-Drs. 268, Kap. 6.5.6.1.3) nach „beruht die räumliche Charakterisierbarkeit auf der Ermittelbarkeit der Gesteinstypen und ihrer Eigenschaften und der Übertragbarkeit dieser Eigenschaften durch Extrapolation beziehungsweise Interpolation. Beide hängen maßgeblich von Entstehungsbedingungen der Gesteinstypen oder/und ihrer späteren Überprägung ab“ und vom vorhandenen Kenntnisstand. Die Begriffe „Ermittelbarkeit“ und „Übertragbarkeit“ werden im Abschlussbericht der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe wie folgt näher definiert:

Ermittelbarkeit:

- „Die charakteristischen Eigenschaften der den einschlusswirksamen Gebirgsbereich beziehungsweise den Wirtsgesteinskörper aufbauenden Gesteinstypen sollten eine geringe Variationsbreite aufweisen und räumlich möglichst gleichmäßig verteilt sein.“
- „Bei tektonisch überprägten geologischen Einheiten sollte die Überprägung möglichst gering sein. Das Ausmaß der Überprägung wird abgeleitet aus den Lagerungsverhältnissen unter Berücksichtigung von Bruch- und Falten tektonik. Salzstrukturen sollten möglichst großräumige Verfaltungen von solchen Schichten aufweisen, die unterschiedliche mechanische und hydraulische Eigenschaften haben.“

Übertragbarkeit:

- „Günstige Verhältnisse sind dadurch gekennzeichnet, dass die Gesteine des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs beziehungsweise des Wirtsgesteinskörpers großräumig einheitlich oder sehr ähnlich ausgebildet sind.“
- „Im Hinblick auf die Einheitlichkeit der Gesteinsausbildung bestehen zwischen den verschiedenen genetischen Gesteinsgruppen (Sedimentgesteine, magmatische Gesteine und metamorphe Gesteine) deutliche Unterschiede. Zu ihrer genaueren Bewertung bedarf es daher unterschiedlicher Bewertungsmaßstäbe. Deren abschließende Spezifizierung ist erst nach Kenntnis des Gesteinstyps des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und gegebenenfalls des Wirtsgesteins möglich. Insofern ist die Festlegung der Wertungsgruppen für Sedimentgesteine und metamorphe Gesteine auf Basis des Fazies-Begriffs vorläufig.“

Die Indikatoren „Variationsbreite der Eigenschaften“, „Räumliche Verteilung der Gesteinstypen“ und „Ausmaß der tektonischen Überprägung“ sind insbesondere auf den ewG und darüber hinaus auf den Endlagerbereich anzuwenden. Der Indikator „Gesteinsausbildung“ gilt nur für den ewG.

3.1a Indikator: Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich

Definition

Die Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen ist eine Bewertung der Spannbreite bzw. Ermittelbarkeit der für die Abwägung relevanten Eigenschaften im vorgesehenen Endlagerbereich, insbesondere des vorgesehenen ewG oder des Einlagerungsbereiches.

3.1b Indikator: Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften

Definition

Der Indikator bewertet die räumliche Verteilung der Gesteinstypen und ihrer für die Abwägung relevanten Eigenschaften im vorgesehenen Endlagerbereich, insbesondere im vorgesehenen ewG oder im Einlagerungsbereich.

3.1c Indikator: Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit

Definition

Der Indikator bewertet das Vorhandensein von Störungen und deren Abstand zum ewG sowie das Vorhandensein von Flexuren und Falten.

3.2a Indikator: Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)

Definition

Dieser Indikator bewertet den Grad der Homogenität und die räumliche Charakterisierbarkeit der Gesteinsausbildung im vorgesehenen ewG. Als Gesteinsausbildung bzw. Gesteinsfazies werden alle Eigenschaften eines Gesteins verstanden.

Die Gesteinszusammensetzung, also die Gesteinskomponenten (qualitative und quantitative Zusammensetzung) und das Gesteinsgefüge (Größe, Gestalt und räumliche Anordnung der Gemengeteile) sowie die Matrix- und/ oder Zementausbildung werden als Lithofazies zusammengefasst. Hinzu kommen Aussagen zur Alteration und Diagenese des Gesteins sowie zu strukturellen Merkmalen.

4 Anlage 4: Kriterium zur Bewertung der langfristigen Stabilität der günstigen Verhältnisse

Die für die langfristige Stabilität der günstigen Verhältnisse wichtigen sicherheitsgerichteten geologischen Merkmale sollen sich in der Vergangenheit über möglichst lange Zeiträume nicht wesentlich verändert haben. Indikatoren hierfür sind insbesondere die Zeitspannen, über die sich die Betrachtungsmerkmale „Mächtigkeit“, flächenhafte beziehungsweise räumliche „Ausdehnung“ und „Gebirgsdurchlässigkeit“ des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht wesentlich verändert haben. Sie sind wie folgt zu bewerten:

1. Als günstig, wenn seit mehr als zehn Millionen Jahren keine wesentliche Änderung des betreffenden Merkmals aufgetreten ist,
2. als bedingt günstig, wenn seit mehr als einer Million, aber weniger als zehn Millionen Jahren keine solche Änderung aufgetreten ist, und
3. als ungünstig, wenn innerhalb der letzten eine Million Jahre eine solche Änderung aufgetreten ist.

Folglich ist das Kriterium durch eine bewertungsrelevante Eigenschaft (langfristige Stabilität der wichtigen sicherheitsgerichteten geologischen Merkmale) und deren entsprechende Indikatoren definiert:

1. Zeitspanne, über die sich die Mächtigkeit des ewG nicht wesentlich verändert hat,
2. Zeitspanne, über die sich die Ausdehnung des ewG nicht wesentlich verändert hat,
3. Zeitspanne, über die sich die Gebirgsdurchlässigkeit des ewG nicht wesentlich verändert hat.

4.1a Indikator: Zeitspanne, über die sich die Mächtigkeit des ewG nicht wesentlich verändert hat,

Definition

Der Indikator bewertet die Zeitspanne, über die sich die Mächtigkeit des ewG nicht wesentlich verändert hat.

4.1b Indikator: Zeitspanne, über die sich die Ausdehnung des ewG nicht wesentlich verändert hat,

Definition

Der Indikator bewertet die Zeitspanne, über die sich die flächenhafte bzw. räumliche Ausdehnung des ewG nicht wesentlich verändert hat.

4.1c Indikator: Zeitspanne, über die sich die Gebirgsdurchlässigkeit des ewG nicht wesentlich verändert hat.

Definition

Der Indikator bewertet die Zeitspanne, über die sich die Gebirgsdurchlässigkeit des ewG nicht wesentlich verändert hat.

5 Anlage 5: Kriterium zur Bewertung der günstigen gebirgsmechanischen Eigenschaften

Die Neigung zur Ausbildung mechanisch induzierter Sekundärpermeabilitäten im einschlusswirksamen Gebirgsbereich soll außerhalb einer konturnahen entfestigten Auflockerungszone um die Endlagerhohlräume möglichst gering sein. Indikatoren hierfür sind:

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

5.1a Indikator: Das Gebirge kann als geomechanisches Haupttragelement die Beanspruchung aus Auffahrung und Betrieb ohne planmäßigen tragenden Ausbau, abgesehen von einer Kontursicherung, bei verträglichen Deformationen aufnehmen;

Definition

Mit dem Indikator wird die Festigkeit des Wirtsgesteins in Relation zu den durch die Auffahrung verursachten Spannungen und damit zur Teufe bewertet.

5.1b Indikator: Um Endlager Hohlräume sind keine mechanisch bedingten Sekundärpermeabilitäten außerhalb einer unvermeidbaren konturnah entfestigten Auflockerungszone zu erwarten.

Definition

Mit dem Indikator werden die Dilatanzfestigkeiten (Zug- und Scherfestigkeit) des Wirtsgesteins als Maß für die Neigung zur Bildung von Wegsamkeiten im ewG bewertet.

Während konturnahe Gebirgsauflockerungen generell zu erwarten sind, können konturfernere Gebirgsauflockerungen/ Rissbildungen nicht grundsätzlich ausgeschlossen werden. Eine konturnahe und vertretbare Entfestigungs-/Auflockerungszone ist gegeben, wenn diese grundsätzlich auf einige wenige Meter Stoßtiefe begrenzt bleibt. Sekundärpermeabilitäten außerhalb dieser konturnahen Saumzone sind bei entsprechenden ungünstigen Bedingungen (z. B. Geometrie Grubengebäude, Materialeigenschaften, Lasten) zu erwarten.

6 Anlage 6: Kriterium zur Bewertung der Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten

Die Neigung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs zur Ausbildung von Wegsamkeiten soll möglichst gering sein. Bewertungsrelevante Eigenschaften hierfür sind die Veränderbarkeit der Gebirgsdurchlässigkeit, Erfahrungen über die Barrierewirksamkeit der Gebirgsformationen, die Rückbildbarkeit von Rissen und für den Vergleich von Gebieten die Duktilität des Gesteins.

- Anhang 1 -

Tab. 1.4: Aufstellung der bewertungsrelevanten Eigenschaften, ihrer Indikatoren und Zuordnung zu den Wertungsgruppen in Anlage 6 StandAG

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße beziehungsweise Indikator des Kriteriums	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig
Veränderbarkeit der vorhandenen Gebirgsdurchlässigkeit	Verhältnis repräsentative Gebirgsdurchlässigkeit/repräsentative Gesteinsdurchlässigkeit	< 10	10 – 100	> 100
	Erfahrungen über die Barriere-wirksamkeit der Gebirgsformatio-nen in folgenden Erfahrungsbe-reichen – rezente Existenz als wasserlösliches Gestein – fossile Fluideinschlüsse – unterlagernde wasserlösliche Gesteine – unterlagernde Vorkommen flüssiger oder gasförmiger Kohlenwasserstoffe – Heranziehung als hydro-geologische Schutzschicht bei Gewinnungsbergwerken – Aufrechterhaltung der Abdichtungsfunktion auch bei dynamischer Bean-spruchung – Nutzung von Hohlräumen zur behälterlosen Speicherung von gasförmigen und flüssigen Medien	Die Gebirgs-formation/der Gesteinstyp wird unmittelbar oder mittelbar anhand eines oder mehrerer Erfahrungs-bereiche als gering durch-lässig bis geo-logisch dicht identifiziert, auch unter geogener oder technogener Beanspruchung.	Die Gebirgs-formation/der Gesteinstyp ist mangels Erfahrung nicht unmittelbar/ mittelbar als gering durch-lässig bis geo-logisch dicht zu charakterisieren.	Die Gebirgs-formation/der Gesteinstyp wird unmittelbar oder mittelbar anhand eines Erfahrungsbe-reichs als nicht hinreichend gering durchlässig identifiziert.
	Duktilität des Gesteins (da es keine festgelegten Grenzen gibt, ab welcher Bruchverformung ein Gestein duktil oder spröde ist, soll dieses Kriterium nur bei einem Vergleich von Standorten angewandt werden)	Duktil/plastisch-viskos ausgeprägt	Spröde-duktil bis elastovisko-plastisch wenig ausgeprägt	Spröde, linear-elastisch
Rückbildbarkeit von Rissen	Rückbildung der Sekundär-permeabilität durch Riss-schließung	Die Riss-schließung erfolgt aufgrund duktilen Materialverhaltens unter Ausgleich von Oberflächen-rauhigkeiten im Grundsatz voll-ständig.	Die Riss-schließung erfolgt durch mechani-sche Risswei-tenverminderung in Verbindung mit sekundären Mechanismen, zum Beispiel Quelldeforma-tionen.	Die Riss-schließung erfolgt nur in beschränktem Maße (zum Beispiel bei sprödem Materialverhalten, Oberflächen-rauhigkeiten, Brücken-bildung).
	Rückbildung der mechanischen Eigenschaften durch Rissverheilung	Rissverheilung durch geo-chemisch geprägte Prozesse mit erneuter Aktivierung atomarer Bin-dungskräfte im Rissflächenbe-reich		Rissverheilung nur durch geo-gene Zufüh-rung und Aus-kristallisation von Sekundär-mineralen (mineralisierte Poren- und Kluftwasser, Sekundär-mineralisation)
Zusammenfassende Beurteilung der Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten aufgrund der Bewertung der einzelnen Indikatoren		Bewertung überwiegend „günstig“: Keine bis marginale Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten	Bewertung überwiegend „bedingt günstig“: Geringe Neigung zur Bildung von dauerhaften Fluidwegsamkeiten	Bewertung überwiegend „weniger günstig“: Bildung von dauerhaften sekundären Fluidwegsamkeiten zu erwarten

6.1a Indikator: Verhältnis repräsentative Gebirgsdurchlässigkeit/repräsentative Gesteinsdurchlässigkeit

Definition

Der Indikator wird gebildet aus dem Quotienten aus der Gebirgsdurchlässigkeit, also der hydraulischen Leitfähigkeit des natürlichen Gesteinsverbandes, die sich aus der Trennfugendurchlässigkeit und der Gesteinsmatrixdurchlässigkeit zusammensetzt, und der Durchlässigkeit der Gesteinsmatrix, wobei repräsentative Werte für den Gesteinstyp anzusetzen sind ohne Beschränkung auf die spezifischen Verhältnisse im ewG.

6.1b Indikator: Erfahrungen über die Barrierewirksamkeit der Gebirgsformationen

Definition

Mit dem Indikator wird bewertet, ob durch die existierenden geowissenschaftlichen Informationen über das Wirtsgestein und seine Inhaltsstoffe (wie z. B. Fluide) Aussagen über seine langfristige niedrige Gebirgsdurchlässigkeit getroffen werden können.

Für diesen Indikator zählt das StandAG eine Reihe von Erfahrungsbereichen auf, auf deren Basis auf die Barrierewirksamkeit der entsprechenden Gebirgsformation geschlossen werden kann, und zwar:

- 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.*

6.1c Indikator: Duktilität des Gesteins

Definition

Der Indikator gibt an, auf welche Weise das Gestein auf mechanische Belastungen reagiert.

6.2a Indikator: Rückbildung der Sekundärpermeabilität durch Riss-schließung

Definition

Dieser Indikator bewertet, durch welche Prozesse sich die Sekundärpermeabilität zurückbildet, indem sich Risse im Wirtsgestein wieder schließen.

Dabei werden unter Rissen infolge technogener Einwirkungen entstandene Trennflächen verstanden, im Gegensatz zu durch geogene Einwirkungen entstandenen Klüften (Lux 2002).

6.2b Indikator: Rückbildung der mechanischen Eigenschaften durch Rissverheilung

Definition

Dieser Indikator bewertet, in wie weit und durch welche Prozesse Risse im Wirtsgestein verheilen und dadurch die ursprünglichen mechanischen Eigenschaften wiederhergestellt werden.

6.3 Indikator: Zusammenfassende Beurteilung

Das „Kriterium zur Bewertung der Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten“ unterscheidet sich insofern von den anderen geowissenschaftlichen Abwägungskriterien, als für dieses Kriterium explizit eine zusammenfassende Beurteilung aufgrund der Bewertung der einzelnen Indikatoren in Anlage 6 im Gesetz gefordert wird.

7 Anlage 7: Kriterium zur Bewertung der Gasbildung

Die Gasbildung soll unter Endlagerbedingungen möglichst gering sein. Indikator hierfür ist das Wasserangebot im Einlagerungsbereich nach der untenstehenden Tabelle.

Tab. 1.5: Bewertungsrelevante Eigenschaften, ihre Indikatoren und die Zuordnung zu den Wertungsgruppen in Anlage 7 des StandAG

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße beziehungsweise Indikator des Kriteriums	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig
Gasbildung	Wasserangebot im Einlagerungsbereich	trocken	feucht und dicht (Gebirgsdurchlässigkeit < 10 ⁻¹¹ m/s)	feucht

7.1a Indikator: Wasserangebot im Einlagerungsbereich

Definition

Der Begriff „Wasserangebot im Einlagerungsbereich“ fasst die Menge des in einem Einlagerungsbereich vorhandenen und aus dem Wirtsgestein stammenden Wassers und die Rate, mit der Wasser aus dem Wirtsgestein in einen Einlagerungsbereich zutreten könnte, zusammen.

8 Anlage 8: Kriterium zur Bewertung der Temperaturverträglichkeit

Die von Temperaturänderungen infolge der Einlagerung der radioaktiven Abfälle betroffenen Gesteinsformationen sollen so beschaffen sein, dass dadurch bedingte Änderungen der Gesteinseigenschaften sowie thermomechanische Gebirgsspannungen nicht zu einem Festigkeitsverlust und der Bildung von Sekundärpermeabilitäten im Endlagerbereich führen. Indikatoren hierfür sind die Neigung zur Bildung wärmeinduzierter Sekundärpermeabilitäten und ihre Ausdehnung sowie die Temperaturstabilität des Wirtsgesteins hinsichtlich Mineralumwandlungen.

8.1a Indikator: Neigung zur Bildung wärmeinduzierter Sekundärpermeabilitäten

Definition

Der Indikator bewertet die mechanische Festigkeit der Gesteine im Endlagerbereich gegenüber auftretenden thermomechanischen Spannungen.

8.1b Indikator: Temperaturstabilität des Wirtsgesteins hinsichtlich Mineralumwandlungen

Definition

Der Indikator bewertet die thermische Stabilität der Minerale des Wirtsgesteins gegenüber Mineralumwandlungen.

9 Anlage 9: Kriterium zur Bewertung des Rückhaltevermögens im ewG

Die barrierewirksamen Gesteine eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs sollen ein möglichst hohes Rückhaltevermögen gegenüber den langzeitrelevanten Radionukliden besitzen. Indikatoren hierfür sind die Sorptionsfähigkeit der Gesteine beziehungsweise die Sorptionskoeffizienten für die betreffenden Radionuklide nach der untenstehenden Tabelle, ein möglichst hoher Gehalt an Mineralphasen mit großer reaktiver Oberfläche wie Tonminerale sowie Eisen- und Mangan-Hydroxide und -Oxihydrate, eine möglichst hohe Ionenstärke des Grundwassers in der geologischen Barriere sowie Öffnungsweiten der Gesteinsporen im Nanometerbereich.

Tab. 1.6: Bewertungsrelevante Eigenschaften, ihre Indikatoren und die Zuordnung zu den Wertungsgruppen in Anlage 9 des StandAG

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße beziehungsweise Indikator des Kriteriums	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig
Sorptionsfähigkeit der Gesteine des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs	K_d -Wert für folgende langzeitrelevante Radionuklide $\geq 0,001 \text{ m}^3/\text{kg}$	Uran, Protactinium, Thorium, Plutonium, Neptunium, Zirkonium, Technetium, Palladium, Jod, Cäsium, Chlor	Uran, Plutonium, Neptunium, Zirkonium, Technetium, Cäsium	-

9.1a Indikator: Sorptionsfähigkeit der Gesteine des ewG

Definition

Der Indikator bewertet die Rückhaltefähigkeit der barrierewirksamen Gesteine des ewG anhand ausgewählter langzeitrelevanter Radionuklide, deren Gleichgewichts-Sorptionskoeffizient nach der Henry-Isotherme einen Schwellenwert von $10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$ überschreitet.

9.1b Indikator: Mineralphasen mit großer reaktiver Oberfläche

Definition

Der Indikator bewertet den Gehalt der Gesteine des ewG an Mineralphasen mit großer reaktiver Oberfläche wie Tonminerale sowie Eisen- und Mangan-Hydroxide und -Oxihydrate.

9.1c Indikator: Ionenstärke des Grundwassers in der geologischen Barriere

Definition

Der Indikator bewertet die Stoffmengenkonzentration gelöster Ionen im Grundwasser in der geologischen Barriere.

Gemäß Kommissionsbericht bezieht sich dieser Indikator auf die Einschränkung der Migration von Kolloiden. Diese Einschränkung wird im StandAG nicht wiedergegeben.

9.1d Indikator: Öffnungsweiten der Gesteinsporen

Definition

Der Indikator bewertet die Öffnungsweite der Poren der Gesteine im ewG.

Gemäß Kommissionsbericht bezieht sich dieser Indikator auf die Filtration von Kolloiden im Grundwasser. Dieser Bezug wird im StandAG nicht wiedergegeben.

10 Anlage 10: Kriterium zur Bewertung der hydrochemischen Verhältnisse

Die chemische Zusammensetzung der Tiefenwässer und die festen Mineralphasen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs sollen sich auch nach dem Einbringen von Behälter- und Ausbaumaterial positiv auf die Rückhaltung der Radionuklide auswirken und das Material technischer und geotechnischer Barrieren chemisch möglichst nicht angreifen. Indikatoren hierfür sind:

1. Ein chemisches Gleichgewicht zwischen dem Wirtsgestein im Bereich des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und dem darin enthaltenen tiefen Grundwasser,
2. neutrale bis leicht alkalische Bedingungen (pH-Wert 7 bis 8) im Bereich des Tiefenwassers,
3. ein anoxisch-reduzierendes Milieu im Bereich des Tiefenwassers,
4. ein möglichst geringer Gehalt an Kolloiden und Komplexbildnern im Tiefenwasser und
5. eine geringe Karbonatkonzentration im Tiefenwasser.

10.1a Indikator: Ein chemisches Gleichgewicht zwischen dem Wirtsgestein im Bereich des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und dem darin enthaltenen tiefen Grundwasser

Definition

Der Indikator bewertet die vorliegenden natürlichen hydrochemischen Verhältnisse im Wirtsgestein im Bereich des ewG.

10.1b Indikator: Neutrale bis leicht alkalische Bedingungen (pH-Wert 7 bis 8) im Bereich des Tiefenwassers

Definition

Der Indikator bewertet den pH-Wert in den im Wirtsgestein vorkommenden Lösungen im ewG.

10.1.c Indikator: Ein anoxisch-reduzierendes Milieu im Bereich des Tiefenwassers

Definition

Der Indikator bewertet das Redoxpotenzial des Grundwassers im ewG.

Das Redoxpotenzial E_h beschreibt das Konzentrationsverhältnis von oxidierten und reduzierten Stoffen und somit die elektrochemischen Bedingungen im Grundwasser.

10.1d Indikator: Ein möglichst geringer Gehalt an Kolloiden und Komplexbildnern im Tiefenwasser

Definition

Der Indikator bewertet den Gehalt an Kolloiden und Komplexbildnern im Tiefenwasser des ewG.

10.1e Indikator: Eine geringe Karbonatkonzentration im Tiefenwasser

Definition

Der Indikator bewertet den Gehalt an Karbonat im Grundwasser im ewG.

11 Anlage 11: Kriterium zur Bewertung des Schutzes des ewG durch das Deckgebirge

Das Deckgebirge soll durch seine Mächtigkeit sowie seinen strukturellen Aufbau und seine Zusammensetzung möglichst langfristig zum Schutz des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs gegen direkte oder indirekte Auswirkungen exogener Vorgänge beitragen. Indikatoren hierfür sind die Überdeckung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs mit grundwasser- und erosionshemmenden Gesteinen und deren Verbreitung und Mächtigkeit im Deckgebirge sowie das Fehlen von strukturellen Komplikationen im Deckgebirge, aus denen sich Beeinträchtigungen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs ergeben können, nach der untenstehenden Tabelle.

- Anhang 1 -

Tab. 1.7: Bewertungsrelevante Eigenschaften, ihre Indikatoren und die Zuordnung zu den Wertungsgruppen in Anlage 11 des StandAG

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriterium	Bewertungsgröße des Kriteriums beziehungsweise Indikatoren	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	ungünstig
Schutz des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durch günstigen Aufbau des Deckgebirges gegen Erosion und Subrosion sowie ihre Folgen (insbesondere Dekompaktion)	Überdeckung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs mit grundwasserhemmenden Gesteinen, Verbreitung und Mächtigkeit grundwasserhemmender Gesteine im Deckgebirge	mächtige vollständige Überdeckung, geschlossene Verbreitung grundwasserhemmender Gesteine im Deckgebirge	flächenhafte, aber lückenhafte beziehungsweise unvollständige Überdeckung, flächenhafte, aber lückenhafte beziehungsweise unvollständige Verbreitung grundwasserhemmender Gesteine im Deckgebirge	fehlende Überdeckung, Fehlen grundwasserhemmender Gesteine im Deckgebirge
	Verbreitung und Mächtigkeit erosionshemmender Gesteine im Deckgebirge des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs	mächtige vollständige Überdeckung, weiträumige geschlossene Verbreitung besonders erosionshemmender Gesteine im Deckgebirge	flächenhafte, aber lückenhafte beziehungsweise unvollständige Verbreitung erosionshemmender Gesteine im Deckgebirge	fehlende Überdeckung, Fehlen erosionshemmender Gesteine im Deckgebirge
	keine Ausprägung struktureller Komplikationen (zum Beispiel Störungen, Scheitelgräben, Karststrukturen) im Deckgebirge, aus denen sich subrosive, hydraulische oder mechanische Beeinträchtigungen für den einschlusswirksamen Gebirgsbereich ergeben könnten	Deckgebirge mit ungestörtem Aufbau	strukturelle Komplikationen, aber ohne erkennbare hydraulische Wirksamkeit (zum Beispiel verheilte Klüfte/Störungen)	strukturelle Komplikationen mit potenzieller hydraulischer Wirksamkeit

Die in den Indikatoren zur Bewertung der hydrochemischen Verhältnisse verwendeten Begriffe „tiefes Grundwasser“ und „Tiefenwasser“ beziehen sich auf das im ewG vorkommende Grundwasser.

Gemäß den Ausführungen im StandAG bezieht sich das Kriterium auf die Rückhaltung der Radionuklide und die chemische Stabilität der technischen und geotechnischen Barrieren. Auf die für die anderen Kriterien durchgeführte Analyse des Einflusses der Indikatoren auf die Wirksamkeit der geologischen Barriere wird daher für dieses Kriterium verzichtet.

11.1a Indikator: Überdeckung des ewG mit grundwasserhemmenden Gesteinen

Definition

Der Indikator bewertet qualitativ die Mächtigkeit und die räumliche Verbreitung grundwasserhemmender Gesteine im Deckgebirge.

Der Begriff grundwasserhemmend wird im Folgenden mit dem Begriff geringleitend gleichgesetzt.

11.1b Indikator: Verbreitung und Mächtigkeit erosionshemmender Gesteine im Deckgebirge des ewG

Definition

Der Indikator bewertet qualitativ den Grad der Überdeckung des ewG durch Festgestein im Deckgebirge und die Mächtigkeit des Festgesteins.

11.1c Indikator: Strukturelle Komplikationen im Deckgebirge

Definition

Der Indikator bewertet das Ausmaß der Veränderungen der ursprünglichen Struktur der Gesteinstypen im Deckgebirge.

Anhang 2:

Tabellen: Ermittlung der zur Anwendung der Abwägungskriterien erforderlichen geowissenschaftlichen Informationen/Daten – zu Anlage 1 bis 11 StandAG

Tab. 2.1: Ermittlung der zur Anwendung der Abwägungskriterien erforderlichen geowissenschaftlichen Informationen/Daten – zu Anlage 1 StandAG

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße Indikator	Wertungsgruppe			A 8.1 – Ermittlung der zur Anwendung der Abwägungskriterien erforderlichen geowissenschaftlichen Informationen/Daten	A 8.2 – Ist zu erwarten, dass die aus 8.1 ermittelten erforderlichen Daten durch die von der BGE durchgeführten Datenabfragen zu den Ausschlusskriterien und den Mindestanforderungen bereits vorliegen?	A 8.3 – Aufzeigen alternativer Möglichkeiten für die Bestimmung von Indikatoren / Bewertungsgrößen Umgang mit der Bewertungsgröße / dem Indikator
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig			
Transport radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen im ewG (Anlage 1 StandAG)							
1.1 Grundwasserströmung	1.1a Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers [mm/a]	< 0,1	10 ⁻¹² – 10 ⁻¹⁰	> 1	Berechnete Abstandsgeschwindigkeiten des Grundwassers [mm/a], Daten zur Ableitung der Bewertungsgröße / des Indikators: Durchlässigkeitsbeiwerte [m/s] effektive Porositäten [-] hydraulischer Gradient [-] aus Potenzialmessungen und ggf. Gleichenplänen, soweit vorhanden Transmissivität [m ² /s], (bei hydraulischen Tests: Angaben zu den Messintervallen).	Nein 1. Bereits erhobene Daten, die zur Herleitung des Indikators / der Bewertungsgröße beitragen sind charakteristische Gebirgsdurchlässigkeiten. 2. Zu den Mindestanforderungen wurden bezogen auf die Gesteinstypen Steinsalz, Tongestein, Plutonite und hoch regionalmetamorphe Gesteine Gebirgsdurchlässigkeiten abgefragt. Sofern Informationen zur Gebirgsdurchlässigkeit nicht vorliegen, wurden Informationen zur Matrixdurchlässigkeit sowie Informationen bzw. Einschätzungen zur Gebirgsdurchlässigkeit für die relevanten Gesteinsvorkommen abgefragt.	Die Abstandsgeschwindigkeit muss bestimmt / berechnet werden; Eingangsdaten für die relevanten Gesteinskörper im vorgegebenen Teufenbereich liegen aller Voraussicht nach nicht, oder nur in Einzelfällen, vor. Angabe der Gebirgsdurchlässigkeiten sind durch die Abfrage zu den Mindestanforderungen abgedeckt. Evt. auf Erfahrungswerte zugreifen. Beachte: Skalenabhängigkeit einzelner Daten. StandAG Anlage 1 zu § 24 Absatz 3: „Solange die entsprechenden Indikatoren nicht standortspezifisch erhoben sind, kann für die Abwägung das jeweilige Wirtsgestein als Indikator verwendet werden.“
1.2 Grundwasserangebot	1.2a Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit des Gesteinstyps [m/s]	< 10 ⁻¹²	10 ⁻¹¹ – 10 ⁻¹⁰	> 10 ⁻¹⁰	Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeiten [m/s] Daten zur Ableitung der Bewertungsgröße / des Indikators: Durchlässigkeitsbeiwert (Gesteinsdurchlässigkeit / Gebirgsdurchlässigkeit) k _r [m/s] Volumenstrom [m ³ /s] Hydraulischer Gradient [-] Durchströmte Fläche [m ²]	Ja Siehe 2. zu Indikator 1.1 a	Informationen mit regionalen und petrographischen Zuordnungen sind durch die Abfrage zu den Mindestanforderungen bzw. Einschätzungen der Gebirgsdurchlässigkeiten abgedeckt. Zur Bewertung des Indikators sind charakteristische Gebirgsdurchlässigkeiten gefragt. Die gelieferten Daten zu den Gebirgsdurchlässigkeiten müssen hinsichtlich der Skalen, die sie abdecken, bewertet und ggf. in charakteristische Gebirgsdurchlässigkeiten übertragen werden. Beachte: Anisotropie von Gebirgsdurchlässigkeiten. Alternativ kann das Wirtsgestein gemäß StandAG Anlage 1 zu § 24 Absatz 3 als Indikator verwendet werden, solange standortspezifische Daten nicht vorliegen.
1.3 Diffusionsgeschwindigkeit	1.3a Charakteristischer effektiver Diffusionskoeffizient des Gesteinstyps für tritiiertes Wasser (HTO) bei 25 °C [m ² /s]	< 10 ⁻¹¹	10 ⁻¹¹ – 10 ⁻¹⁰	> 10 ⁻¹⁰		Nein	Es ist zu erwarten, dass wenige bis keine Daten (Messwerte) für die relevanten Gesteinskörper vorliegen. Spezielle Messwerte aus den relevanten Gesteinsvorkommen liegen sehr wahrscheinlich nur in Einzelfällen vor. Gemäß StandAG sind charakteristische effektive Diffusionskoeffizienten gefragt, die durch Laborversuche ermittelt werden. Falls Einzelwerte vorliegen und Verwendung finden sollen, ist deren Übertragbarkeit und Repräsentativität zu prüfen. Alternativ kann das Wirtsgestein gemäß StandAG Anlage 1 zu § 24 Absatz 3 als Indikator verwendet werden, solange standortspezifische Daten nicht vorliegen.

- Anhang 2 -

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße Indikator	Wertungsgruppe			A 8.1 – Ermittlung der zur Anwendung der Abwägungskriterien erforderlichen geowissenschaftlichen Informationen/Daten	A 8.2 – Ist zu erwarten, dass die aus 8.1 ermittelten erforderlichen Daten durch die von der BGE durchgeführten Datenabfragen zu den Ausschlusskriterien und den Mindestanforderungen bereits vorliegen?	A 8.3 – Aufzeigen alternativer Möglichkeiten für die Bestimmung von Indikatoren / Bewertungsgrößen Umgang mit der Bewertungsgröße / dem Indikator
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig			
Transport radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen im ewG (Anlage 1 StandAG)							
1.4 Diffusionsgeschwindigkeit	1.4a Für Tonstein: Absolute Porosität	< 20 %	20 % – 40 %	> 40 %	Absolute Porosität [-]	Nein	<p>Die absolute Porosität wird im Labor gemessen. Geophysikalische Bohrlochmessungen können Hinweise auf Porositäten liefern. Das Neutron-Log beispielsweise misst den Energieverlust der Neutronen oder die Anzahl dabei emittierten Gamma-Quanten und ist somit hauptsächlich eine Funktion des Formationswassergehalts. Kernmagnetische Resonanzmessungen erlauben die Ermittlung von totaler und effektiver fluidgefüllter Porosität. Daten zur absoluten Porosität sind Studien (z. B. Felslabor Mont Terri, Sondierungsbohrung Benken (NAGRA 2001)) zu entnehmen und deren Übertragbarkeit auf entsprechende Gesteinsvorkommen in der Bundesrepublik Deutschland zu überprüfen.</p> <p>Alternativ kann das Wirtsgestein gemäß StandAG Anlage 1 zu § 24 Absatz 3 als Indikator verwendet werden, solange standortspezifische Daten nicht vorliegen. Sofern Tonstein, als Wirtsgestein in Betracht gezogen wird, kann dieses Vorgehen bei der bewertungsrelevanten Eigenschaft 1.4 „Diffusionsgeschwindigkeit bei Tonstein“ nicht zu einer Differenzierung in günstig, bedingt günstig oder weniger günstig führen.</p> <p>EL-KOM (2016, Fußnote 912): „Die für die absolute Porosität festgelegten Grenzen zwischen den Wertungsgruppen sind als näherungsweise gültige Angaben zu verstehen, in strengem quantitativen Sinn treffen sie aber nicht für alle Tonsteininformationen zu.“</p>
	1.4b Für Tonstein: Verfestigungsgrad	Tonstein	fester Ton	halbfester Ton	Relative / vergleichende Angaben zur Differenzierung zwischen Tonstein, festem Ton und halbfestem Ton. Messbare Größen: - Zugfestigkeit - Versenkungstiefe - Diageneseegrad (z. B. Illitkristallinität)	Nein Für Tonsteininformationen wurden zur Bewertung der Mindestanforderungen lithologische Gliederungen des Teufenbereichs von 300 m bis 2000 m abgefragt bzw., sofern Angaben zur lithologischen Gliederung nicht möglich sind, stratigraphische Gliederungen. U. U. können die Verfestigungsgrade aus Gesteinsbeschreibungen abgeleitet werden.	Auswertung der lithologischen und / oder stratigraphischen Angaben zur überschlägigen Einschätzung der Wertungsgruppen. Alternativ kann das Wirtsgestein gemäß StandAG Anlage 1 zu § 24 Absatz 3 als Indikator verwendet werden, solange standortspezifische Daten nicht vorliegen. Sofern Tonstein, als Wirtsgestein in Betracht gezogen wird, kann dieses Vorgehen bei der bewertungsrelevanten Eigenschaft 1.4 „Diffusionsgeschwindigkeit bei Tonstein“ nicht zu einer Differenzierung in günstig, bedingt günstig oder weniger günstig führen. Geophysikalische Daten: – Seismik (spezielles Processing erforderlich)

Tab. 2.2: Ermittlung der zur Anwendung der Abwägungskriterien erforderlichen geowissenschaftlichen Informationen/Daten – zu Anlage 2 StandAG

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße Indikator	Wertungsgruppe			A 8.1 – Ermittlung der zur Anwendung der Abwägungskriterien erforderlichen geowissenschaftlichen Informationen/Daten	A 8.2 – Ist zu erwarten, dass die aus 8.1 ermittelten erforderlichen Daten durch die von der BGE durchgeführten Datenabfragen zu den Ausschlusskriterien und den Mindestanforderungen bereits vorliegen?	A 8.3 – Aufzeigen alternativer Möglichkeiten für die Bestimmung von Indikatoren / Bewertungsgrößen Umgang mit der Bewertungsgröße / dem Indikator
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig			
Konfiguration der Gesteinskörper (Anlage 2 StandAG)							
2.1 Barrierewirksamkeit	2.1a Barrierenmächtigkeit [m]	> 150	100 – 150	50 – 100	Teufenabhängige Angaben zu lithologischen Abfolgen wie geologische Daten: – Schichtenverzeichnisse – Bohrkernaufnahmen – geologische 3D-Modelle – Laboruntersuchungen zu verschiedenen Barriere-eigenschaften – Geologische Kartenwerke und Schnitte geophysikalische Daten: – Seismik – BLM (z. B. Gamma, Gamma-Gamma, Akustiklog)	Bedingt Für die zu betrachtenden Gesteinsformationen wurden lithologische Gliederungen des Teufenbereichs von 300 m bis 2000 m abgefragt bzw., sofern lithologische Gliederungen nicht vorhanden sind, stratigraphische Gliederungen.	Für die Suchräume ist vorab durch den Vorhabenträger der Begriff „barrierewirksame Gesteine von einschlusswirksamen Gebirgsbereichen“ zu definieren. Die Interpretationen / Auswertungen vorhandener Daten sind idealerweise in einem großräumigen geologischen 3D-Modell darzustellen. Anhand des geologischen 3D-Modells lassen sich die Bewertungsgrößen / Indikatoren visualisieren. Es sind nicht sämtliche angeführten Datenarten zwingend für die Bewertung des Indikators erforderlich. Je vielseitiger die zusammengestellten Informationen sind, desto zuverlässiger ist das Ergebnis der Bewertung.
	2.1b Grad der Umschließung des Einlagerungsbereichs durch einen ewG	vollständig	unvollst., kleinere Fehlstellen in unkritischer Position	unvollst., größere Fehlstellen in kritischer Position	Teufenabhängige Angaben zu lithologischen Abfolgen wie: geologische Daten: – Schichtenverzeichnisse – Bohrkernaufnahmen – Geologische 3D-Modelle geophysikalische Daten: – Seismik – BLM (z. B. Gamma, Gamma-Gamma, Akustiklog)	Bedingt Für die zu betrachtenden Gesteinsformationen wurden lithologische Gliederungen des Teufenbereichs von 300 m bis 2000 m abgefragt bzw., sofern lithologische Gliederungen nicht vorhanden sind, stratigraphische Gliederungen.	s. o.
2.2 Robustheit und Sicherheitsreserven	2.2a Teufe der oberen Begrenzung des erforderlichen ewG [m u. GOK]	> 500	300 – 500	Keine Angabe	Teufenabhängige Angaben zu lithologischen Abfolgen wie Geologische Daten: – Schichtenverzeichnisse – Bohrkernaufnahmen – Geologische 3D-Modelle Geophysikalische Daten: – Seismik – BLM (z. B. Gamma, Gamma-Gamma, Akustiklog)	Bedingt Für die zu betrachtenden Gesteinsformationen wurden lithologische Gliederungen des Teufenbereichs von 300 m bis 2000 m abgefragt bzw., sofern lithologische Gliederungen nicht vorhanden sind, stratigraphische Gliederungen.	s. o.
2.3 Volumen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs	2.3a flächenhafte Ausdehnung bei gegebener Mächtigkeit (Vielfaches des Mindestflächenbedarfs)	>> 2-fach	etwa 2-fach	<< 2-fach	Teufenabhängige Angaben über lithologische Abfolgen wie Geologische Daten: – Kartenwerke (einschließlich Profilschnitte) – Schichtenverzeichnisse – Bohrkernaufnahmen – Geologische 3D-Modelle Geophysikalische Daten: – Seismik – Bohrlochmessungen (z. B. Gamma, Gamma-Gamma, Akustiklog)	Bedingt Für die zu betrachtenden Gesteinsformationen wurden lithologische Gliederungen des Teufenbereichs von 300 m bis 2000 m abgefragt bzw., sofern lithologische Gliederungen nicht vorhanden, stratigraphische Gliederungen.	s. o.

- Anhang 2 -

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße Indikator	Wertungsgruppe			A 8.1 – Ermittlung der zur Anwendung der Abwägungskriterien erforderlichen geo-wissenschaftlichen Informationen/Daten	A 8.2 – Ist zu erwarten, dass die aus 8.1 ermittelten erforderlichen Daten durch die von der BGE durchgeführten Datenabfragen zu den Ausschlusskriterien und den Mindestanforderungen bereits vorliegen?	A 8.3 – Aufzeigen alternativer Möglichkeiten für die Bestimmung von Indikatoren / Bewertungsgrößen Umgang mit der Bewertungsgröße / dem Indikator
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig			
Konfiguration der Gesteinskörper (Anlage 2 StandAG)							
2.4 Indikator „Potenzialbringer“ bei Tonstein Anschluss von wasserleitenden Schichten in unmittelbarer Nähe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs/ Wirtsgesteinskörpers an ein hohes hydraulisches Potenzial verursachendes Gebiet	2.4a Vorhandensein von Gesteinsschichten mit hydraulischen Eigenschaften und hydraulischem Potenzial, die die Induzierung bzw. Verstärkung der Grundwasserbewegung im ewG ermöglichen können	keine Grundwasserleiter als mögliche Potenzialbringer in unmittelbarer Nachbarschaft zum Wirtsgestein/ ewG vorhanden	Keine Angabe	Grundwasserleiter in Nachbarschaft zum Wirtsgestein/ ewG vorhanden	Idealerweise hydrogeologische 3D-Modelle, 2D-Informationen (möglichst hydrogeologisch gegliedert), Angaben über lithostratigraphische Abfolgen, Angaben über Ausbisse von relevanten Grundwasserleitern. Gegebenenfalls: Seismik in Verbindung mit Bohrungen und VSP-Messungen zur Zuordnung von Reflektoren; Tiefbohrungen mit geophysikalischen Bohrlochmessungen und möglichst gekernt; Erfahrungen zur hydrogeologischen Gesamtsituation; Erforderliche Expertise: erkennen und abgrenzen von Gesteinskörpern, die als Potenzialbringer in Frage kommen (Grundwasserleiter und hydraulische Potenziale), sowie deren räumliche Verteilung.	Bedingt Für die zu betrachtenden Gesteinsformationen wurden lithologische Gliederungen des Teufenbereichs von 300 m bis 2000 m abgefragt bzw., sofern lithologische Gliederungen nicht vorhanden, stratigraphische Gliederungen.	s. o. Ggf. auf Regionalkenntnisse zur Hydrogeologie (Expertenwissen) zurückgreifen, sofern keine Daten verfügbar.

Tab. 2.3: Ermittlung der zur Anwendung der Abwägungskriterien erforderlichen geowissenschaftlichen Informationen/Daten – zu Anlage 3 StandAG

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße Indikator	Wertungsgruppe			A 8.1 – Ermittlung der zur Anwendung der Abwägungskriterien erforderlichen geowissenschaftlichen Informationen/Daten	A 8.2 – Ist zu erwarten, dass die aus 8.1 ermittelten erforderlichen Daten durch die von der BGE durchgeführten Datenabfragen zu den Ausschlusskriterien und den Mindestanforderungen bereits vorliegen?	A 8.3 – Aufzeigen alternativer Möglichkeiten für die Bestimmung von Indikatoren / Bewertungsgrößen Umgang mit der Bewertungsgröße / dem Indikator
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig			
Räumliche Charakterisierbarkeit (Anlage 3 StandAG)							
3.1 Ermittelbarkeit der Gesteinstypen und ihrer charakteristischen Eigenschaften im vorgesehene Endlagerbereich, insbesondere im vorgesehene einschlusswirksamen Gebirgsbereich	3.1a Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich	gering	deutlich, aber bekannt bzw. zuverlässig erhebbbar	erheblich und/oder nicht zuverlässig erhebbbar	<p>In Anlehnung an die Mindestanforderungen:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Gebirgsdurchlässigkeit – Mächtigkeit des Gesteinstyps – Teufenlage des Gesteinstyps <p>Bewertungsrelevante Eigenschaften der Anlage 1:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Grundwasserströmung – Grundwasserangebot – Diffusionsgeschwindigkeit <p>Bewertungsrelevante Eigenschaften der Anlage 2:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Barrierewirksamkeit – Robustheit und Sicherheitsreserven – Volumen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs – Indikator „Potenzialbringer“ bei Tonstein <p>Bewertungsrelevante Eigenschaft in Anlage 5:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Neigung zur Ausbildung mechanisch induzierter Sekundärpermeabilitäten <p>Bewertungsrelevante Eigenschaften in Anlage 6:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Veränderbarkeit der vorhandenen Gebirgsdurchlässigkeit – Rückbildbarkeit von Rissen <p>Bewertungsrelevante Eigenschaft in Anlage 7:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Gasbildung <p>Bewertungsrelevante Eigenschaft in Anlage 8:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Temperaturverträglichkeit (Neigung zu temperaturinduzierten Sekundärpermeabilitäten sowie Mineralumwandlungen) <p>Bewertungsrelevante Eigenschaft in Anlage 9:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Sorptionsfähigkeit der Gesteine des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs <p>Bewertungsrelevante Eigenschaft in Anlage 10:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Auswirkungen der chemischen Zusammensetzung der Tiefenwässer und der festen Mineralphasen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs auf die Radio nuklidrückhaltung und technisches / geotechnisches Barrierenmaterial <p>Bewertungsrelevante Eigenschaft in Anlage 11:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Schutz des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durch günstigen Aufbau des Deckgebirges gegen Erosion und Subrosion sowie ihre Folgen <p>Die erforderlichen Informationen zur Abschätzung der Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen sind den Beschreibungen der jeweiligen Indikatoren dieser Tabelle zu entnehmen.</p>	<p>Bedingt</p> <p>Daten zu Mindestanforderungen wurden abgefragt: grundsätzliches Vorkommen von Steinsalzvorkommen in steiler und stratiformer Lagerung, Tonsteinformationen und Kristallgesteinsformationen, sowie geometrische Angaben, Gebirgsdurchlässigkeiten und, sofern diese nicht vorliegen, Informationen bzw. Abschätzungen der Gebirgsdurchlässigkeiten zu den genannten Gesteinsformationen;</p> <p>Abgefragte Daten zu den verschiedenen Anlagen siehe ebenda.</p>	<p>Der Gesetzgeber lässt offen, welche Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich gefragt sind. Davon ausgehend, dass sämtliche relevante Eigenschaften im StandAG erfasst sind, ist davon auszugehen, dass die zu bewertenden Eigenschaften in den Mindestanforderungen und Abwägungskriterien vollständig abgebildet und zu berücksichtigen sind. Die relevanten Mindestanforderungen Gebirgsdurchlässigkeit, Mächtigkeit und Teufenlage sind durch die Abwägungskriterien abgedeckt.</p> <p>Erst mit dem Vorliegen von standortspezifischen Informationen können für diesen Indikator Variationsbreiten von Eigenschaften belastbar abgeleitet werden. Bis dahin können auf Grundlage vorhandener Daten für ein Suchraum, ein Teilgebiet oder Standortregion lediglich Abschätzungen vorgenommen werden. Dabei soll bewertet werden, inwieweit die Gesteinstypen großräumig einheitlich oder sehr ähnlich hinsichtlich ihrer Eigenschaften ausgebildet sind. Die Auswertungen der Informationen zielen auch darauf ab, die Skalen, auf denen Veränderungen der relevanten Eigenschaften der Gesteinstypen in den Suchräumen auftreten, abzuleiten.</p> <p>Mit dem Begriff Variationsbreite soll hier nicht die Spannweite einer Verteilung (Differenz von größtem und kleinstem Wert) verstanden werden, da diese bei sehr kleinen Werten (z. B. Diffusionskoeffizienten) konsequenterweise sehr klein ist. Eine Bewertung der Variationsbreite erfordert somit eine Normierung auf die physikalisch mögliche Spannweite der betrachteten Eigenschaft (im Sinne eines Variationskoeffizienten).</p> <p>Im Ergebnis der Bewertung können Gesteinskörper mit einheitlichen Eigenschaften vorliegen, die sich innerhalb definierter Bandbreiten befinden. Diese gegenständliche Auswertung stellt die Grundlage für die Bewertung des Indikators „Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich“ dar.</p>

- Anhang 2 -

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße Indikator	Wertungsgruppe			A 8.1 – Ermittlung der zur Anwendung der Abwägungskriterien erforderlichen geowissenschaftlichen Informationen/Daten	A 8.2 – Ist zu erwarten, dass die aus 8.1 ermittelten erforderlichen Daten durch die von der BGE durchgeführten Datenabfragen zu den Ausschlusskriterien und den Mindestanforderungen bereits vorliegen?	A 8.3 – Aufzeigen alternativer Möglichkeiten für die Bestimmung von Indikatoren / Bewertungsgrößen Umgang mit der Bewertungsgröße / dem Indikator
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig			
Räumliche Charakterisierbarkeit (Anlage 3 StandAG)							
3.1 Ermittelbarkeit der Gesteinstypen und ihrer charakteristischen Eigenschaften im vorgesehenen Endlagerbereich, insbesondere im vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereich	3.1b Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften	gleichmäßig	kontinuierliche, bekannte räumliche Veränderungen	diskontinuierliche, nicht ausreichend genau vorhersagbare räumliche Veränderungen	Variante 1: Zu jedem Gesteinstyp sind die Angaben Mächtigkeit, Teufe und Verbreitung bzw. Ausdehnung sowie die Verteilung ihrer Eigenschaften erforderlich. Variante 2: Alternativ kann auf das Ergebnis der Bearbeitung des Indikators „Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich“ (s. o.) aufgesetzt werden. Demnach wären lediglich die Verteilung und die Ausdehnungen von Homogenbereiche auszuwerten.	Variante 1: Ja Die erforderlichen Daten sind durch die Lieferungen der zuständigen Behörden der Länder und des Bundes durch die Anfragen zu den Mindestanforderungen bereits abgefragt. Variante 2: Bedingt Daten zu Mindestanforderungen wurden abgefragt; abgefragte Daten zu den verschiedenen Anlagen siehe ebenda.	Die identifizierten Gesteinskörper sind idealerweise in einem geologischen 3D-Modell darzustellen.
	3.1c Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit	weitgehend ungestört (Störungen im Abstand > 3 km vom Rand des ewG), flache Lagerung	wenig gestört (weitständige Störungen, Abstand 100 m bis 3 km vom Rand des ewG), Flexuren	gestört (engständig zerblockt, Abstand < 100 m), gefaltet	Lage von Störungen und ihrer Geometrie (auch älter als Rupelium) Lagerungsverhältnisse (Schichtstreichen und –fallen, Faltenachsengeometrie) seismische Messungen tektonische Abhandlungen geologische 3D-Modelle Trennflächengefüge, Kartenwerke (geologische, tektonische Karten) Geologische Schnitte.	Bedingt Räumliche Lage und Erstreckung neotektonischer Störungen wurden abgefragt.	Die Dimensionen der zu betrachtenden Störungen / Störungszonen müssen vor der Abfrage bzw. Bearbeitung festgelegt werden, z. B. Definition von „regionalen Störungszonen“. Der Teufenbereich 300 – 2000 m, der in der Datenabfrage der BGE zu den Mindestanforderungen bei den zuständigen Behörden der Länder und des Bundes als Teufenfenster vorgegeben wurde, muss betroffen sein, wobei die Störungen / Störungszonen nicht den gesamten Teufenbereich durchdringen müssen. Nicht nur die Neotektonik, sondern auch ältere tektonische Merkmale (Bruch- und Falten tektonik) sind zu berücksichtigen. EL-KOM (2016): „Bei tektonisch überprägten geologischen Einheiten sollte die Überprägung möglichst gering sein. Das Ausmaß der Überprägung wird abgeleitet aus den Lagerungsverhältnissen unter Berücksichtigung von Bruch- und Falten tektonik.“ Salzstrukturen sollten möglichst großräumige Verfaltungen von solchen Schichten aufweisen, die unterschiedliche mechanische und hydraulische Eigenschaften haben“.

- Anhang 2 -

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße Indikator	Wertungsgruppe			A 8.1 – Ermittlung der zur Anwendung der Abwägungskriterien erforderlichen geowissenschaftlichen Informationen/Daten	A 8.2 – Ist zu erwarten, dass die aus 8.1 ermittelten erforderlichen Daten durch die von der BGE durchgeführten Datenabfragen zu den Ausschlusskriterien und den Mindestanforderungen bereits vorliegen?	A 8.3 – Aufzeigen alternativer Möglichkeiten für die Bestimmung von Indikatoren / Bewertungsgrößen Umgang mit der Bewertungsgröße / dem Indikator
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig			
Räumliche Charakterisierbarkeit (Anlage 3 StandAG)							
3.2 Übertragbarkeit der Eigenschaften im vorgesehenen einschlusswirksamen Gebirgsbereich	3.2a Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)	Fazies regional einheitlich	Fazies nach bekanntem Muster wechselnd	Fazies nach nicht bekanntem Muster wechselnd	<p>Grundsätzlich sind Informationen über lithologische Ausprägungen der Gesteinstypen und deren Veränderungen im Raum sowie räumliche Informationen über Faziesbereiche im regionalen Maßstab, das heißt über den Suchraum hinaus, erforderlich. Wesentliche Grunddaten sind lithologische Informationen wie z. B.</p> <ul style="list-style-type: none"> – Fazieskarten, – Schichtenverzeichnisse, – Bohrlochlogs, – regionale geologische Profile, – geologische Karten <p>Zugang zu strukturellen Informationen liefern seismische Profile, Potenzialfeldmessungen, tektonische Karten und zugehörige Erläuterungen</p>	<p>Bedingt</p> <p>Es wurden Informationen über lithologische bzw. stratigraphische Gliederungen des Teufensbereichs von 300 m bis 2000 m abgefragt.</p>	<p>Es sind Daten und Informationen erforderlich, die den lithologischen und strukturellen Aufbau der Gesteinstypen im vorgesehenen eWG beschreiben und einen Rückschluss auf die Variationsbreite des Aufbaus dieser Gesteinstypen erlauben, die bewertungsrelevante Eigenschaften beeinflussen könnten. Diese Informationen sind u. a. geowissenschaftlichen Abhandlungen zu entnehmen (z. B. Rohstoffkarten, Beihefte zu GK25).</p> <p>EL-KOM (2016): „Günstige Verhältnisse sind dadurch gekennzeichnet, dass die Gesteine des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs beziehungsweise des Wirtsgesteinskörpers großräumig einheitlich oder sehr ähnlich ausgebildet sind. Im Hinblick auf die Einheitlichkeit der Gesteinsausbildung bestehen zwischen den verschiedenen genetischen Gesteinsgruppen (Sedimentgesteine, magmatische Gesteine und metamorphe Gesteine) deutliche Unterschiede. Zu ihrer genaueren Bewertung bedarf es daher unterschiedlicher Bewertungsmaßstäbe. Deren abschließende Spezifizierung ist erst nach Kenntnis des Gesteinstyps des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und gegebenenfalls des Wirtsgesteins möglich. Insofern ist die Festlegung der Wertungsgruppen für Sedimentgesteine und metamorphe Gesteine auf Basis des Fazies-Begriffs vorläufig.“</p>

Tab. 2.4: Ermittlung der zur Anwendung der Abwägungskriterien erforderlichen geowissenschaftlichen Informationen/Daten – zu Anlage 4 StandAG

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße Indikator	Wertungsgruppe			A 8.1 – Ermittlung der zur Anwendung der Abwägungskriterien erforderlichen geowissenschaftlichen Informationen/Daten	A 8.2 – Ist zu erwarten, dass die aus 8.1 ermittelten erforderlichen Daten durch die von der BGE durchgeführten Datenabfragen zu den Ausschlusskriterien und den Mindestanforderungen bereits vorliegen?	A 8.3 – Aufzeigen alternativer Möglichkeiten für die Bestimmung von Indikatoren / Bewertungsgrößen Umgang mit der Bewertungsgröße / dem Indikator
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig			
Langfristige Stabilität der günstigen Verhältnisse (Anlage 4 StandAG)							
4.1 langfristige Stabilität der wichtigen sicherheitsgerichteten geologischen Merkmale	4.1a Zeitspanne, über die sich die Mächtigkeit des ewG nicht wesentlich verändert hat	Wenn seit mehr als zehn Millionen Jahren keine wesentliche Änderung des betreffenden Merkmals aufgetreten ist	Wenn seit mehr als einer Million, aber weniger als zehn Millionen Jahren keine solche Änderung aufgetreten ist	Wenn innerhalb der letzten eine Million Jahre eine solche Änderung aufgetreten ist	Informationen über – Tiefenerosion (z. B. quartärzeitliche Rinnen) – Transgression – Denudation – Angaben von Hebungsbeiträgen oder –raten für die zu bewertenden Zeiträume – Angaben über Senkungs- bzw. Sedimentationsbeiträgen oder –raten für die letzten 10 Millionen Jahre – Subrosionsraten an Steinsalzvorkommen – Mächtigkeitsveränderungen an Salzstrukturen und ihren Randsenken (auch Salzkissen)	Bedingt Hebungsdaten, Quartärbasis	Betrachtet wird ausschließlich die dauerhafte Beständigkeit der sicherheitsgerichteten geologischen Merkmale Mächtigkeit, Ausdehnung und Gebirgsdurchlässigkeit des ewG. Es erfolgt keine Differenzierung der Veränderungen hinsichtlich positiver oder negativer Beeinflussung der Barriereeigenschaft.
	4.1b Zeitspanne, über die sich die Ausdehnung des ewG nicht wesentlich verändert hat				Informationen über – Störungen (Lage und Ausprägung) Tektonische Karten (z. B. geotektonischer Atlas), geologische Karten – Halokinese (Aufstiegsbewegungen), geowissenschaftliche Abhandlungen – Tiefenerosion (Rinnen); Informationen zur Quartärbasis	Bedingt Neotektonik; Quartärbasis	s. o.
	4.1c Zeitspanne, über die sich die Gebirgsdurchlässigkeit des ewG nicht wesentlich verändert hat				Informationen zu – tektonischen Aktivitäten (Neotektonik) – Entlastung durch Hebung, Erosion, – salztektonischer Überprägung	Bedingt Neotektonik, Quartärbasis	s. o.

Tab. 2.5: Ermittlung der zur Anwendung der Abwägungskriterien erforderlichen geowissenschaftlichen Informationen/Daten – zu Anlage 5 StandAG

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße Indikator	Wertungsgruppe			A 8.1 – Ermittlung der zur Anwendung der Abwägungskriterien erforderlichen geowissenschaftlichen Informationen/Daten	A 8.2 – Ist zu erwarten, dass die aus 8.1 ermittelten erforderlichen Daten durch die von der BGE durchgeführten Datenabfragen zu den Ausschlusskriterien und den Mindestanforderungen bereits vorliegen?	A 8.3 – Aufzeigen alternativer Möglichkeiten für die Bestimmung von Indikatoren / Bewertungsgrößen Umgang mit der Bewertungsgröße / dem Indikator
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig			
Günstige gebirgsmechanische Eigenschaften (Anlage 5 StandAG)							
5.1 Die Neigung zur Ausbildung mechanisch induzierter Sekundärpermeabilitäten im einschlusswirksamen Gebirgsbereich soll außerhalb einer konturnahen entfestigten Auflockerungszone um die Endlager Hohlräume möglichst gering sein.	5.1a Aufnahme der Beanspruchung des Gebirges aus der Auffahrung ohne planmäßigen tragenden Ausbau	Keine Wertungsgruppen.			Zur Anwendung des Diagramms aus AkEnd (2002): Teufenlage sowie die repräsentativen Gebirgsdruckfestigkeiten (Zug- und Scherfestigkeiten) der relevanten Gesteinstypen im Suchraum.	Bedingt Für die zu betrachtenden Gesteinsformationen wurden lithologische Gliederungen des Teufenbereichs von 300 m bis 2000 m abgefragt bzw., sofern lithologische Gliederung nicht vorhanden, stratigraphische Gliederungen; Verbreitung der Gesteinstypen Kristallingestein, Tonstein und Steinsalz.	In Abhängigkeit von der Teufenlage und der repräsentativen Gebirgsdruckfestigkeit können, gesteinstypspezifisch, Bewertungen des Indikators aus den Abbildungen 4.9 und 4.10 aus AkEnd (2002) vorgenommen werden.
	5.1b Um Endlager Hohlräume sind keine mechanisch bedingten Sekundärpermeabilitäten außerhalb einer unvermeidbaren konturnah entfestigten Auflockerungszone zu erwarten.				Zur Anwendung des Diagramms aus AkEnd (2002): Teufenlage sowie die repräsentativen Gebirgsdruckfestigkeiten (Zug- und Scherfestigkeiten) der relevanten Gesteinstypen im Suchraum.	Bedingt Für die zu betrachtenden Gesteinsformationen wurden lithologische Gliederungen des Teufenbereichs von 300 m bis 2000 m abgefragt bzw., sofern lithologische Gliederung nicht vorhanden, stratigraphische Gliederungen. Verbreitung der Gesteinstypen Kristallingestein, Tonstein und Steinsalz.	In Abhängigkeit von der Teufenlage und der repräsentativen Gebirgsdruckfestigkeit können, gesteinstypspezifisch, Bewertungen des Indikators aus den Abbildungen 4.9 und 4.10 aus AkEnd (2002) vorgenommen werden.

Tab. 2.6: Ermittlung der zur Anwendung der Abwägungskriterien erforderlichen geowissenschaftlichen Informationen/Daten – zu Anlage 6 StandAG

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße Indikator	Wertungsgruppe			A 8.1 – Ermittlung der zur Anwendung der Abwägungskriterien erforderlichen geowissenschaftlichen Informationen/Daten	A 8.2 – Ist zu erwarten, dass die aus 8.1 ermittelten erforderlichen Daten durch die von der BGE durchgeführten Datenabfragen zu den Abschlusskriterien und den Mindestanforderungen bereits vorliegen?	A 8.3 – Aufzeigen alternativer Möglichkeiten für die Bestimmung von Indikatoren / Bewertungsgrößen Umgang mit der Bewertungsgröße / dem Indikator
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig			
Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten (Anlage 6 StandAG)							
6.1 Veränderbarkeit der vorhandenen Gebirgsdurchlässigkeit	6.1a Verhältnis repräsentative Gebirgsdurchlässigkeit/ repräsentative Gesteinsdurchlässigkeit	< 10	10 – 100	> 100	Hydraulische Durchlässigkeiten auf verschiedenen Skalen zur Abbildung repräsentativer Gebirgs- und Gesteinsdurchlässigkeiten.	Gebirgsdurchlässigkeiten in [m/s] Zu den Mindestanforderungen bezogen auf die Gesteine Steinsalz, Tongestein, Plutonite und hoch regionalmetamorphe Gesteine wurden Gebirgsdurchlässigkeiten abgefragt. Sofern Informationen zur Gebirgsdurchlässigkeit nicht vorliegen, wurden Informationen zur Matrixdurchlässigkeit abgefragt. Sofern keine Daten zur Gebirgsdurchlässigkeit vorliegen, wurden Informationen bzw. Einschätzungen zur Gebirgsdurchlässigkeit für die relevanten Gesteinsvorkommen abgefragt.	Ergänzung der gelieferten Gebirgsdurchlässigkeiten durch Experteneinschätzungen zur Gebirgsdurchlässigkeit regionaler relevanter Gesteinsvorkommen; bei der Verwendung von Messwerten ist über die Zuordnung zu Gebirgsdurchlässigkeiten bzw. Gesteinsdurchlässigkeiten zu entscheiden.
	6.1b Erfahrungen über die Barrierewirksamkeit der Gebirgsformationen in folgenden Erfahrungsbereichen: 1. rezente Existenz als wasserlösliches Gestein 2. fossile Fluideinschlüsse 3. unterlagernde wasserlösliche Gesteine 4. unterlagernde Vorkommen flüssiger oder gasförmiger Kohlenwasserstoffe 5. Heranziehung als hydrogeologische Schutzschicht bei Gewinnungsbergwerken 6. Aufrechterhaltung der Abdichtungsfunktion auch bei dynamischer Beanspruchung 7. Nutzung von Hohlräumen zur behälterlosen Speicherung von gasförmigen und flüssigen Medien	Die Gebirgsformation/ der Gesteinstyp wird unmittelbar oder mittelbar anhand eines oder mehrerer Erfahrungsbereiche als gering durchlässig bis geologisch dicht identifiziert, auch unter geogener oder technogener Beanspruchung.	Die Gebirgsformation/ der Gesteinstyp ist mangels Erfahrung nicht unmittelbar/mittelbar als gering durchlässig bis geologisch dicht zu charakterisieren.	Die Gebirgsformation/ der Gesteinstyp wird unmittelbar oder mittelbar anhand eines Erfahrungsbereichs als nicht hinreichend gering durchlässig identifiziert.	Erfahrungen über grundsätzliche Barrierewirksamkeiten mit den relevanten Gebirgsformationen hinsichtlich der unter 1 bis 7 genannten Erfahrungsbereiche. Quellen sind geowissenschaftliche Abhandlungen; möglichst mit Bezug zu regionalen Verhältnissen (z. B. Studien der BGR zur Untersuchung und Bewertung von Salzformationen, Veröffentlichungen des Bundesverband Erdgas, Erdöl und Geoenergie e.V. und der DERA. – Steinsalzvorkommen – Vorkommen von Fluid Inclusions – Vorkommen wasserlöslicher Gesteine, welche die Gebirgsformation unterlagern – Ausweisung von Kohlenwasserstoffvorkommen (flüssig und gasförmig) unterhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs – Ausweisung von Gewinnungsbergwerken bei denen der als einschlusswirksamer Gebirgsbereich ausgewiesene Gesteinstyp als hydrogeologische Schutzschicht herangezogen wird – Beispiele für die Aufrechterhaltung der Abdichtungsfunktion auch bei dynamischer Beanspruchung – Nutzung von Hohlräumen zur behälterlosen Speicherung von gasförmigen und flüssigen Medien	Nein	Zu 6: Es wird davon ausgegangen, dass sich der Begriff „dynamische Beanspruchung“ auf Auffahrungen, Vortrieb, Wärmeeintrag und ähnliche Prozesse bezieht; natürliche Effekte wie z. B. Erdbeben sind an dieser Stelle nicht zu berücksichtigen;
6.1 Veränderbarkeit der vorhandenen Gebirgsdurchlässigkeit	6.1c Duktilität des Gesteins (da es keine festgelegten Grenzen gibt, ab welcher Bruchverformung ein Gestein duktil oder spröde ist, soll dieses Kriterium nur bei einem Vergleich von Standorten angewandt werden)	duktil/ plastisch-viskos ausgeprägt	spröde-duktil bis elastovisko-plastisch wenig ausgeprägt	spröde, linear-elastisch	Informationen zur Duktilität bzw. zur Sprödigkeit des Gesteins (Spannungs-Dehnungs-Verhalten).	Nein	Unter der Prämisse, dass der vorliegende Bericht auf die Ermittlung und Bewertung von Teilgebieten ausgerichtet ist und die Bewertungsgröße / der Indikator nur beim Standortvergleich zum Tragen kommt, ist die Bewertung der Duktilität des Gesteins aktuell nicht relevant.

- Anhang 2 -

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße Indikator	Wertungsgruppe			A 8.1 – Ermittlung der zur Anwendung der Abwägungskriterien erforderlichen geowissenschaftlichen Informationen/Daten	A 8.2 – Ist zu erwarten, dass die aus 8.1 ermittelten erforderlichen Daten durch die von der BGE durchgeführten Datenabfragen zu den Ausschlusskriterien und den Mindestanforderungen bereits vorliegen?	A 8.3 – Aufzeigen alternativer Möglichkeiten für die Bestimmung von Indikatoren / Bewertungsgrößen Umgang mit der Bewertungsgröße / dem Indikator
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig			
Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten (Anlage 6 StandAG)							
6.2 Rückbildbarkeit von Rissen	6.2a Rückbildung der Sekundärpermeabilität durch Risssschließung	Die Riss-schließung erfolgt aufgrund duktilen Materialverhaltens unter Ausgleich von Oberflächenrauigkeiten im Grundsatz vollständig.	Die Riss-schließung erfolgt durch mechanische Rissweitenverringern in Verbindung mit sekundären Mechanismen, zum Beispiel Quelldeformationen.	Die Riss-schließung erfolgt nur in beschränktem Maße (zum Beispiel bei sprödem Materialverhalten, Oberflächenrauigkeiten, Brückenbildung).	Informationen zur Duktilität bzw. zur Sprödigkeit des Gesteins (Spannungs-Dehnungs-Verhalten; Untersuchungen zum Kriechen des Gesteins); bei Tonstein: Verfestigungsgrad, Quellfähigkeit, Art der Zementation	Nein	Zum jetzigen Zeitpunkt ist zu erwarten, dass nur sporadische und unregelmäßig verteilte Untersuchungsergebnisse vorliegen. Die Übertragbarkeit von vorliegenden Untersuchungsergebnissen ist zu überprüfen. Evt. könnte bei bestehenden Datenlücken in einer frühen Phase des Standortauswahlverfahrens der Gesteinstyp als Indikator verwendet werden. Grundsätzlich kann Steinsalz duktilen und Kristallingestein sprödes Materialverhalten zugeordnet werden. Tongestein hingegen kann zwar in vielen Fällen mechanische Rissweitenverringern in Verbindung mit Quelldeformationen zugeordnet werden, je nach Ausprägung ist auch leicht duktilen Verhalten einerseits oder beschränkte Riss-schließung andererseits möglich.
	6.2b Rückbildung der mechanischen Eigenschaften durch Rissverheilung	Rissverheilung durch geochemisch geprägte Prozesse mit erneuter Aktivierung atomarer Bindungskräfte im Rissflächenbereich		Rissverheilung nur durch geogene Zuführung und Auskristallisation von Sekundärmineralen (mineralisierte Poren- und Kluftwässer, Sekundärmineralisation)	Kenntnisse zur geochemischen Zusammensetzung der Fluide und Gesteine im ewG (Lösungszusammensetzungen und Gesteinszusammensetzungen) Gebirgstemperaturen (Messungen in Bohrlöchern) geothermischer Tiefengradient im interessierenden Bereich. Dichte, pH- und Eh-Werte von Lösungen	Nein	Daten sind zurzeit nicht bekannt, maximal in Einzelfällen. Empfehlung: hilfsweise könnte Gesteinstyp als Indikator verwendet werden. Mechanische Schließung: Druck ± Temperatur Heilung: Hierzu sind grundsätzlich Lösungen erforderlich ± Temperatur
6.3 Zusammenfassende Beurteilung der Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten aufgrund der Bewertung der einzelnen Indikatoren		Bewertung überwiegend „günstig“: Keine bis marginale Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten	Bewertung überwiegend „bedingt günstig“: Geringe Neigung zur Bildung von dauerhaften Fluidwegsamkeiten	Bewertung überwiegend „weniger günstig“: Bildung von dauerhaften sekundären Fluidwegsamkeiten zu erwarten	Datenabfrage für diesen Indikator nicht erforderlich, weil es sich um eine zusammenfassende Beurteilung der bewertungsrelevanten Eigenschaften des Kriteriums handelt.	Grundsätzlich nein Bedingt zu 6.1 a	Siehe Angaben zu 6.1 und 6.2

Tab. 2.7: Ermittlung der zur Anwendung der Abwägungskriterien erforderlichen geowissenschaftlichen Informationen/Daten – zu Anlage 7 StandAG

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße Indikator	Wertungsgruppe			A 8.1 – Ermittlung der zur Anwendung der Abwägungskriterien erforderlichen geowissenschaftlichen Informationen/Daten	A 8.2 – Ist zu erwarten, dass die aus 8.1 ermittelten erforderlichen Daten durch die von der BGE durchgeführten Datenabfragen zu den Ausschlusskriterien und den Mindestanforderungen bereits vorliegen?	A 8.3 – Aufzeigen alternativer Möglichkeiten für die Bestimmung von Indikatoren / Bewertungsgrößen Umgang mit der Bewertungsgröße / dem Indikator
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig			
Gasbildung (Anlage 7 StandAG)							
7.1 Gasbildung	7.1a Wasserangebot im Einlagerungsbereich	trocken	feucht und dicht (Gebirgsdurchlässigkeit < 10 ⁻¹¹ m/s)	feucht	Gebirgsdurchlässigkeit, Wassergehalte der Wirtsgesteine im Einlagerungsbereich (Gesteinsfeuchte), gegebenenfalls Informationen über Vorkommen von Lösungsreservoirs.	Bedingt Gebirgsdurchlässigkeiten wurden mit der Datenabfrage der BGE zu den Mindestanforderungen für die in der Abfrage genannten Gesteinsformationen bei den zuständigen Stellen angefragt.	Gemäß AkEnd ist das Gestein als „ <i>feucht</i> “ einzustufen, wenn „ <i>die zur Korrosion erforderliche Feuchtigkeit ansteht</i> “, im anderen Fall als „ <i>trocken</i> “.

Tab. 2.8: Ermittlung der zur Anwendung der Abwägungskriterien erforderlichen geowissenschaftlichen Informationen/Daten – zu Anlage 8 StandAG

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße Indikator	Wertungsgruppe			A 8.1 – Ermittlung der zur Anwendung der Abwägungskriterien erforderlichen geowissenschaftlichen Informationen/Daten	A 8.2 – Ist zu erwarten, dass die aus 8.1 ermittelten erforderlichen Daten durch die von der BGE durchgeführten Datenabfragen zu den Abschlusskriterien und den Mindestanforderungen bereits vorliegen?	A 8.3 – Aufzeigen alternativer Möglichkeiten für die Bestimmung von Indikatoren / Bewertungsgrößen Umgang mit der Bewertungsgröße / dem Indikator
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig			
Temperaturverträglichkeit (Anlage 8 StandAG)							
8.1 Die von Temperaturänderungen infolge der Einlagerung der radioaktiven Abfälle betroffenen Gesteinsformationen sollen so beschaffen sein, dass dadurch bedingte Änderungen der Gesteinseigenschaften sowie thermomechanische Gebirgsspannungen nicht zu einem Festigkeitsverlust und der Bildung von Sekundärpermeabilitäten im Endlagerbereich führen.	8.1a Neigung zur Bildung wärmeinduzierter Sekundärpermeabilitäten und ihre Ausdehnung	Keine Wertungsgruppen			Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität, Dichte und Wärmeausdehnungskoeffizienten sowie Zugfestigkeit der Gesteinstypen.	Nein	Der Indikator bewertet die (mechanische) Festigkeit der Gesteine im Endlagerbereich gegenüber auftretenden thermomechanischen Spannungen. Zu betrachten ist das Wirtsgestein soweit es von der Änderung des Temperaturfeldes aufgrund der Wärmeentwicklung radioaktiver Abfälle betroffen ist. Eine der Voraussetzungen der Bewertung ist deshalb eine Abschätzung der Ausdehnung der thermomechanisch gestörten Umgebung um Einlagerungshohlräume. Die zur quantitativen Beschreibung und Beurteilung der Temperaturverträglichkeit von Gesteinskörpern (in situ) einzusetzenden Messgrößen sind nur mit erheblichem technischen Aufwand zu bestimmen. Üblicherweise stützen sich daher die vorläufigen Beurteilungen der Temperaturverträglichkeit nicht auf Messergebnisse, sondern auf die erfahrungsbasierte Einschätzung anhand des Gesteinstyps. Die thermische Leitfähigkeit im Tonstein ist u. a. vom Sättigungsgrad abhängig. Je höher die Sättigung, desto höher die Wärmeleitfähigkeit.
	8.1b Temperaturstabilität des Wirtsgesteins hinsichtlich Mineralumwandlungen				Mineralogische Zusammensetzungen des von der Temperaturveränderung infolge der Einlagerung radioaktiver Abfälle betroffenen Wirtsgesteins. Als „Leitminerale“ kommen die folgenden in Frage: bei Tongestein der Smektitgehalt, bei Steinsalz der Gehalt an Salzhydraten (im Steinsalz vorkommende Hydratsalze sind Kieserit, Polyhalit, Kainit, Carnallit und sehr selten Bischofit)	Nein	Zu betrachten ist das Wirtsgestein, soweit es von der Änderung des Temperaturfeldes aufgrund der Wärmeentwicklung radioaktiver Abfälle betroffen ist. Eine der Voraussetzungen für die Bewertung ist deshalb eine Abschätzung der Ausdehnung der thermomechanisch gestörten Umgebung um Einlagerungshohlräume. Mineralumwandlungen können Auswirkungen auf die Barriereigenschaften haben, wenn dadurch das Feststoffvolumen verringert wird und sich dementsprechend der für Fluidbewegungen verfügbare Raum vergrößert. Dies könnte bei Salzhydraten bei einer Erwärmung über die Temperatur, bei der es zur Kristallwasserabgabe kommt, der Fall sein. Durch die Illitisierung von Smektit kann auch das Sorptionsvermögen des Wirtsgesteins Ton ungünstig beeinflusst werden. Die temperaturbedingte Beeinträchtigung des Sorptionsvermögens ist umso größer, je höher der Smektitgehalt im Ton ist. Solange keine standortspezifischen Daten vorliegen, sind ggf. Typlokalationen auszuwählen und repräsentative Mineralzusammensetzungen daraus abzuleiten. Die meisten Umwandlungen finden statt, wenn Lösungen präsent sind. Metamorphe Umwandlungen finden auch ohne Lösungsbeteiligung statt. (geschieht bei Variation von P und T sowie bei Mineralen, die H ₂ O im Gitter eingebaut haben. Hinweis: in einem potenziellen Endlager im Salz wird darauf geachtet, einen Einlagerungsbereich zu wählen, der hauptsächlich aus Halit besteht (z. B. z2HS).

Tab. 2.9: Ermittlung der zur Anwendung der Abwägungskriterien erforderlichen geowissenschaftlichen Informationen/Daten – zu Anlage 9 StandAG

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße Indikator	Wertungsgruppe			A 8.1 – Ermittlung der zur Anwendung der Abwägungskriterien erforderlichen geowissenschaftlichen Informationen/Daten	A 8.2 – Ist zu erwarten, dass die aus 8.1 ermittelten erforderlichen Daten durch die von der BGE durchgeführten Datenabfragen zu den Ausschlusskriterien und den Mindestanforderungen bereits vorliegen?	A 8.3 – Aufzeigen alternativer Möglichkeiten für die Bestimmung von Indikatoren / Bewertungsgrößen Umgang mit der Bewertungsgröße / dem Indikator
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig			
Rückhaltevermögen im ewG (Anlage 9 StandAG)							
9.1 Sorptionfähigkeit der Gesteine des ewG	9.1a Kd-Wert für folgende langzeitrelevante Radionuklide, deren Gleichgewichts-Sorptionskoeffizient nach der Henry-Isotherme einen Schwellenwert von 10 ⁻³ m ³ /kg überschreitet	U, Pa, Th, Pu, Np, Zr, Tc, Pd, I, Cs, Cl	U, Pu, Np, Zr, Tc, Cs	Keine Angabe	Benötigt werden die Kd-Werte für Radionuklide der Elemente U, Pa, Th, Pu, Np, Zr, Tc, Pd, I, Cs, Cl deren Gleichgewichts-Sorptionskoeffizient nach der Henry-Isotherme einen Schwellenwert von 10 ⁻³ m ³ /kg überschreitet.	Nein	In Phase 1 Schritt 2 des Standortauswahlverfahrens werden nur vereinzelt standortspezifische Informationen zu den Indikatoren vorliegen. Es sollten deshalb Literaturwerte oder Expertenschätzungen zur Bewertung der genannten Indikatoren des Kriteriums herangezogen werden.
	9.1b Möglichst hoher Gehalt der Gesteine des ewG an Mineralphasen mit großer reaktiver Oberfläche wie Tonminerale sowie Eisen- und Mangan-Hydroxide und -Oxihydrate	Keine Wertungsgruppen			Gehalt der Gesteine des ewG an Mineralphasen mit großer reaktiver Oberfläche wie Tonminerale sowie Eisen- und Mangan-Hydroxide und -Oxihydrate	Nein	
	9.1c Möglichst hohe Ionenstärke des Grundwassers im ewG	Keine Wertungsgruppen			Ionenstärke des Grundwassers im ewG	Nein	
	9.1d Öffnungsweiten der Gesteinsporen im Nanometerbereich	Keine Wertungsgruppen			Öffnungsweiten der Gesteinsporen im Nanometerbereich	Nein	

Tab. 2.10: Ermittlung der zur Anwendung der Abwägungskriterien erforderlichen geowissenschaftlichen Informationen/Daten – zu Anlage 10 StandAG

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße Indikator	Wertungsgruppe			A 8.1 – Ermittlung der zur Anwendung der Abwägungskriterien erforderlichen geowissenschaftlichen Informationen/Daten	A 8.2 – Ist zu erwarten, dass die aus 8.1 ermittelten erforderlichen Daten durch die von der BGE durchgeführten Datenabfragen zu den Ausschlusskriterien und den Mindestanforderungen bereits vorliegen?	A 8.3 – Aufzeigen alternativer Möglichkeiten für die Bestimmung von Indikatoren / Bewertungsgrößen Umgang mit der Bewertungsgröße / dem Indikator
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig			
Hydrochemische Verhältnisse (Anlage 10 StandAG)							
10.1 Die chemische Zusammensetzung der Tiefenwässer und die festen Mineralphasen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs sollen sich auch nach dem Einbringen von Behälter- und Ausbaumaterial positiv auf die Rückhaltung der Radionuklide auswirken und das Material technischer und geotechnischer Barrieren chemisch möglichst nicht angreifen.	10.1a Chemisches Gleichgewicht zwischen dem Wirtsgestein im Bereich des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und dem darin enthaltenen tiefen Grundwasser	Keine Wertungsgruppen			Angaben über die hydro-/ geochemischen Verhältnisse in den Wirtsgesteinen bzw. den Chemismus der Tiefenwässer, ergänzend Altersbestimmungen. Die Ermittlung des chemischen Gleichgewichts erfolgt über den Sättigungsindex. Angaben über Konzentrationen stabiler Isotope sowie Spurenelemente im Porenwasser liefern zusätzliche Informationen.	Nein	Eine fundierte Bewertung der (geo)chemischen Verhältnisse zwischen Tiefenwässern und den Mineralphasen eines ewG kann erst nach detaillierter Untersuchung potenzieller Endlagerstandorte erfolgen. Ein Vergleich hydrochemischer Verhältnisse an verschiedenen Standorten ist auch abhängig vom Endlagerkonzept (Behälter- und Ausbaumaterial). Aussagen zum Einfluss auf die geotechnischen Barrieren sind ebenso an die Endlagerkonzepte geknüpft. Soweit keine einschlägigen Daten vorliegen, könnte eine Bewertung des Indikators durch die Übertragung von chemischen Analysen an Tiefenwässern aus Bohrungen und evt. aus Bergwerken sowie über Analogieschlüsse über die Verweildauer von Tiefenwässern im Untergrund erfolgen. Grundlage für chemisches Gleichgewicht ist eine hinreichend lange Reaktionszeit, in offenen Systemen stellt sich eher kein Gleichgewicht ein. Isotopensignaturen von Tiefenwässern im einschlusswirksamen Gebirgsbereich mit Hinweisen auf einen Austausch der Wässer zwischen einschlusswirksamem Gebirgsbereich und Deckgebirge sollten ausgeschlossen sein. Thermodynamisch- geochemische Modelle geben Auskunft über die Gleichgewichtszustände. Abgleich mit chemischen Analysen tiefer „Grundwässer“. Stabile Isotope stehen in Wechselwirkung mit der Matrix, ebenso Spurenelemente. Eine Interpretation der Wechselwirkung von Matrix und Spurenelementen ist nur bedingt aussagefähig. Erforderlich sind demzufolge auch Kenntnisse über den Chemismus / die Zusammensetzung der Gesteinsmatrix. Soweit vorliegend, können Altersbestimmungen indirekte Hinweise auf einen Gleichgewichtszustand zwischen Wirtsgestein und tiefem Grundwasser geben.
	10.1b Neutrale bis leicht alkalische Bedingungen (pH-Wert 7 bis 8) im Bereich des Tiefenwassers	Keine Wertungsgruppen			Angaben über die hydro-/ geochemischen Verhältnisse in den Wirtsgesteinen bzw. den Chemismus der Tiefenwässer über Analogieschlüsse sowie Expertenschätzungen: – Über pH-Wertbestimmung an Tiefenwässern aus Bohrungen und Bergwerken – Literaturangaben: Auswertungen vergleichbarer Untersuchungen (BGR, NAGRA usw.)	Nein	Stand RESUS Januar 2019: „Steinsalz: <i>Im Steinsalz sind geringe Mengen von NaCl-CaSO₄-gesättigten Lösungen zu erwarten, die einen neutralen bis leicht sauren pH-Wert aufweisen. Bei fortschreitendem Eindunstungsgrad und in Abhängigkeit von der Lithologie der salinaren Gesteine erreichen die dann in den Gesteinen dominierenden MgCl₂-MgSO₄-KCl-führenden Lösungen leicht saure pH-Werte. Angaben zu den pH-Werten von Lösungsvorkommen in Salinargesteinen befinden sich z. B. in von Borstel (1993), Usdowski & Hermann (2002) sowie in Schramm (2015).</i> <u>Tongestein:</u> <i>Angaben von zu erwartenden pH-Werten in Grundwässern von Tongesteinen liegen flächendeckend nicht vor. Die NAGRA (2002) nutzte für Modellberechnungen ein Referenz-Bentonitwasser (pH = 7,25), ein Bentonitwasser mit „tiefem pH“ (pH = 6,90) und eines mit „hohem pH“ (pH = 7,89). Die pH-Werte des In-situ-Porenwassers im Opalinuston liegen nach Messungen von Bossart et al. (2008) zwischen 7 und 8.</i> <u>Kristallgestein:</u> <i>Papp (1997) gibt für Grundwässer aus Kristallingebieten der Schweiz, Skandinaviens, des Kanadischen Schildes und Deutschlands (KTB-Bohrung) an, dass die pH-Werte meist zwischen 6 und 8 liegen.</i> <i>AkEnd (2002): „Das vorliegende Datenmaterial zum Chemismus von Tiefenwässern in Deutschland und die heterogene Verbreitung verschiedener Wassertypen auf engem Raum lässt keine flächendeckenden Aussagen zur Identifizierung von Gebieten, Regionen und Standorten auf der Basis hydrochemischer Kriterien zu. Bei tiefen Grundwässern ist das Wissen über deren Zusammensetzung derzeit zu lückenhaft, um eine Charakterisierung vornehmen zu können. Es fehlen in der Regel wichtige Daten, z. B. zum Redox-Potenzial und zur Konzentration von gelösten redoxsensitiven Komponenten. Angaben zu pH-Werten sind ebenfalls lückenhaft. Zuverlässige Aussagen sind daher erst nach genauere regionaler bzw. standortspezifischer Betrachtung möglich.“</i>

- Anhang 2 -

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße Indikator	Wertungsgruppe			A 8.1 – Ermittlung der zur Anwendung der Abwägungskriterien erforderlichen geowissenschaftlichen Informationen/Daten	A 8.2 – Ist zu erwarten, dass die aus 8.1 ermittelten erforderlichen Daten durch die von der BGE durchgeführten Datenabfragen zu den Ausschlusskriterien und den Mindestanforderungen bereits vorliegen?	A 8.3 – Aufzeigen alternativer Möglichkeiten für die Bestimmung von Indikatoren / Bewertungsgrößen Umgang mit der Bewertungsgröße / dem Indikator
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig			
Hydrochemische Verhältnisse (Anlage 10 StandAG)							
10.1 Die chemische Zusammensetzung der Tiefenwässer und die festen Mineralphasen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs sollen sich auch nach dem Einbringen von Behälter- und Ausbaumaterial positiv auf die Rückhaltung der Radionuklide auswirken und das Material technischer und geotechnischer Barrieren chemisch möglichst nicht angreifen.	10.1c Anoxisch-reduzierendes Milieu im Bereich des Tiefenwassers	Keine Wertungsgruppen			Angaben über die hydro-/ geochemischen Verhältnisse in den Wirtsgesteinen bzw. den Chemismus der Tiefenwässer über Analogieschlüsse: – Über das Redoxpotenzial der Tiefenwässer aus Bohrungen und Bergwerken – Literaturangaben: Auswertungen vergleichbarer Untersuchungen (BGR, Nagra usw.)	Nein	Stand RESUS Januar 2019: Steinsalz: <i>Die in Steinsalz in-situ vorkommenden Lösungen weisen reduzierende Eh-Verhältnisse auf (Herrmann & Usdowski, 2003), die erst beim Zutritt in das Grubengebäude zu oxidierenden Eh-Werten wechseln. Das Redoxpotenziale kann bei Anwesenheit von CH₄ und H₂S, die in stark schwankenden Gehalten im Steinsalz eingeschlossen sein können (Gerling et al., 1991), variieren (Kienzler et al., 2001).</i> Tongestein: <i>Variationen der Ausprägung des Indikators können durch Verteilung von Kohlenwasserstoffen im Porenwasser des Wirtsgesteins auftreten (Reinhold et al., 2013a). Die mineralogische Zusammensetzung des Gesteins (einzelne sandige oder karbonatische Einschaltungen) hat unter anoxischen Bedingungen in tonigen und tonmergeligen Gesteinen keinen signifikanten Einfluss auf den Chemismus der Lösungen im Wirtsgestein.</i> Kristallingestein: <i>Die Mehrheit der Grundwässer in magmatischen Gesteinen verfügt über negative Redoxpotenziale. Variationen des Indikators durch wechselnde Anteile an natürlichen Mineralen mit hohem Fe(II)- oder Sulfidgehalten sind möglich. Diese wirken reduzierend.</i>
	10.1d Ein möglichst geringer Gehalt an Kolloiden und Komplexbildnern im Tiefenwasser	Keine Wertungsgruppen			Angaben über die hydro-/ geochemischen Verhältnisse in den Wirtsgesteinen bzw. den Chemismus der Tiefenwässer über Analogieschlüsse: – Über den Gehalt an Kolloiden und Komplexbildnern in Tiefenwässern aus Bohrungen und Bergwerken – Literaturangaben – Auswertungen vergleichbarer Untersuchungen (BGR, NAGRA usw.)	Nein	Stand RESUS Januar 2019: Steinsalz: <i>In Lösungseinschlüssen im Steinsalz können geringe Mengen an natürlichen kolloidalen Partikeln vorhanden sein. Auch wenn diese Lösungsmengen in das spätere Grubengebäude zutreten würden, ist aufgrund der niedrigen Konzentrationen kein Beitrag zum Radionuklidtransport zu erwarten. Der Gehalt an Komplexbildnern ist abhängig von vorhandenen Karbonatquellen (Karbonate, CO₂-reiche Gaseinschlüsse). Die Mengen an Komplexbildnern in den Lösungseinschlüssen in Steinsalz sind generell sehr gering.</i> Tongestein: <i>Für den Opalinuston wurden als mögliche Kolloide Tonminerale, Quarz, Calcit, Eisenoxide und organisches Material benannt (NAGRA, 2002). Die Kolloidkonzentrationen in Mont Terri, die bei Durchflussraten von 20 ml/d gemessen wurden (Degueldre et al., 2002), bewegen sich nach Angaben der NAGRA (2002) im Bereich von 1 bis 2 · 10⁻⁵ g pro Liter Porenwasser.</i> <i>Es gibt keine Aussagen zu möglichen Kolloiden in Tongesteinen in Norddeutschland. Auf Grund der hohen Salinitäten der Grundwässer in diesen Gesteinen wird erwartet, dass die Stabilität der Kolloide gering ist.</i> <i>Es gibt keine Aussagen zu möglichen Komplexbildnern in Tongesteinen. Es wird erwartet, dass die Gehalte an Komplexbildnern in Tongesteinslösungen generell nicht gering sind.</i> Kristallingestein: <i>Im ungestörten Kristallingestein sind keine Kolloidgehalte und Komplexbildner zu erwarten. Im gestörten Kristallingestein können Gehalte an Kolloiden durch Zufluss aus den Deckschichten vorliegen. Der Gehalt an Komplexbildnern ist abhängig vom Zufluss karbonathaltiger Wässer, z. B. in einem geklüfteten Granit in Karstregionen.</i>
	10.1e Geringe Karbonatkonzentration im Tiefenwasser	Keine Wertungsgruppen			Angaben über die hydro-/ geochemischen Verhältnisse in den Wirtsgesteinen bzw. den Chemismus der Tiefenwässer über Analogieschlüsse: – Über die Karbonatkonzentrationen in Tiefenwässern aus Bohrungen und Bergwerken – Literaturdaten	Nein	Stand RESUS Januar 2019: Steinsalz: <i>Die CO₂-Gehalte in intrasalinaren Lösungen schwanken in Abhängigkeit von der Lithologie und Genese der Salinargesteine stark (Siemann & Ellendorf 2001), liegen aber in der Regel im Promillebereich. Erhöhte Gehalte an CO₂-reichen Gaseinschlüssen wurden in der Nähe einzelner eingeschalteter Karbonatgestein-Lagen und von Basaltgängen, die das Salz durchschlagen, bestimmt.</i> Tongestein: <i>Variationen in den Lithologien durch Beimischungen von Karbonat in der tonigen Gesteinsmatrix und durch Einschaltung karbonatischer Lagen sind möglich. Lösungszutritte stark karbonathaltiger Wässer im geklüfteten Tongestein sind in Karstregionen möglich.</i> Kristallingestein: <i>Lithologische Variationen durch das Auftreten karbonatischer Gangminerale oder durch Lösungszutritte stark karbonathaltiger Wässer im geklüfteten Granit in Karstregionen sind möglich.</i>

Tab. 2.11: Ermittlung der zur Anwendung der Abwägungskriterien erforderlichen geowissenschaftlichen Informationen/Daten – zu Anlage 11 StandAG

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße Indikator	Wertungsgruppe			A 8.1 – Ermittlung der zur Anwendung der Abwägungskriterien erforderlichen geowissenschaftlichen Informationen/Daten	A 8.2 – Ist zu erwarten, dass die aus 8.1 ermittelten erforderlichen Daten durch die von der BGE durchgeführten Datenabfragen zu den Ausschlusskriterien und den Mindestanforderungen bereits vorliegen?	A 8.3 – Aufzeigen alternativer Möglichkeiten für die Bestimmung von Indikatoren / Bewertungsgrößen Umgang mit der Bewertungsgröße / dem Indikator
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig			
Schutz des ewG durch das Deckgebirge (Anlage 11 StandAG)							
11.1 Schutz des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durch günstigen Aufbau des Deckgebirges gegen Erosion und Subrosion sowie ihre Folgen (insbesondere Dekompaktion)	11.1a Überdeckung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs mit grundwasserhemmenden Gesteinen, Verbreitung und Mächtigkeit grundwasserhemmender Gesteine im Deckgebirge	mächtige vollständige Überdeckung, geschlossene Verbreitung grundwasserhemmender Gesteine im Deckgebirge	Flächenhafte, aber lückenhafte beziehungsweise unvollständige Überdeckung, flächenhafte, aber lückenhafte beziehungsweise unvollständige Verbreitung grundwasserhemmender Gesteine im Deckgebirge	fehlende Überdeckung, Fehlen grundwasserhemmender Gesteine im Deckgebirge	Angaben über die räumliche Verbreitung lithologischer Abfolgen mit grundwasserhemmenden Eigenschaften. Geologische Daten: – Kartenwerke, hydrogeologische und geologische Kartierungen, geologische Profilschnitte – Schichtenverzeichnisse inkl. hydrogeologischer Gliederung – Angaben über hydraulische Fenster – Hydraulische Kennwerte anstehender Formationen – Bohrkernaufnahmen – Geologische und hydrogeologische 3D-Modelle Geophysikalische Daten: – Seismik – BLM (z. B. Gamma, Gamma-Gamma, Resistivitylog, Porosit log, Akustiklog)	Bedingt Lithologische und stratigraphische Gliederung im Teufenbereich 300 bis 2000 m in Gebieten, in denen Wirtsgesteinsformationen zu erwarten sind.	Eine Definition des Begriffs grundwasserhemmende Gesteine wird in Aufgabe 7 des Berichts gegeben. Demnach sind grundwasserhemmende Gesteine als Grundwassergeringleiter zu verstehen. Die Abgrenzung zwischen Grundwassergeringleitern bzw. Grundwasserhemmern zu Grundwasserleitern liegt bei einem k_f -Wert $> 1 \cdot 10^{-6}$ m/s.
	11.1b Verbreitung und Mächtigkeit erosionshemmender Gesteine im Deckgebirge des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs	mächtige vollständige Überdeckung, weiträumige geschlossene Verbreitung besonders erosionshemmender Gesteine im Deckgebirge	Flächenhafte, aber lückenhafte beziehungsweise unvollständige Überdeckung, flächenhafte, aber lückenhafte beziehungsweise unvollständige Verbreitung erosionshemmender Gesteine im Deckgebirge	fehlende Überdeckung, Fehlen erosionshemmender Gesteine im Deckgebirge	Angaben über die räumliche Verbreitung lithologischer Abfolgen mit erosionshemmenden Eigenschaften. Geologische Daten: – Kartenwerke, geologische Kartierungen – Schichtenverzeichnisse – Tektonische Aufnahmen – Bohrkernaufnahmen – Geologische 3D-Modelle – Bohrparameter (z. B. ROP, Meißelbelastung) – Gesteinsphysikalische und geotechnische Parameter anstehen der Formationen Geophysikalische Daten: – Seismik – BLM (z. B. Gamma, Gamma-Gamma, Akustiklog)	Bedingt Lithologische und stratigraphische Gliederung im Teufenbereich 300 bis 2000 m in Gebieten, in denen Wirtsgesteinsformationen zu erwarten sind.	Eine Definition durch BGE ist erforderlich, welche Gesteine als erosionshemmend einzustufen sind. Zugang über Verwitterungsprofile möglich, in denen die relative Verwitterungsbeständigkeit als ein Maß für erosionshemmende Wirkung gezeigt wird. Stand RESUS Januar 2019: „Erläuterungen zu erosionshemmenden lithologischen Eigenschaften der Gesteine des Deckgebirges finden sich im StandAG nicht. Lediglich im Abschlussbericht der Kommission Lagerung hochradioaktiver Abfallstoffe werden in einer Fußnote zum hier beschriebenen Indikator lithologische Eigenschaften kurz erwähnt (EL-KOM 2016, S.333). Darin werden beispielhaft massige bis dickbankige, feste Sedimentgesteinskörper bzw. massive Kristallgesteinskörper, die jeweils eine weitständige Klüftung aufweisen, als erosionshemmend genannt.“
11.1 Schutz des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durch günstigen Aufbau des Deckgebirges gegen Erosion und Subrosion sowie ihre Folgen (insbesondere Dekompaktion)	11.1c keine Ausprägung struktureller Komplikationen (zum Beispiel Störungen, Scheitelgräben, Karststrukturen) im Deckgebirge, aus denen sich subrosive, hydraulische oder mechanische Beeinträchtigungen für den einschlusswirksamen Gebirgsbereich ergeben könnten	Deckgebirge mit ungestörtem Aufbau	strukturelle Komplikationen, aber ohne erkennbare hydraulische Wirksamkeit (zum Beispiel verheilte Klüfte/ Störungen)	strukturelle Komplikationen mit potenzieller hydraulischer Wirksamkeit	Flächenhafte Verbreitung und teufenabhängige Angaben über strukturelle Komplikationen innerhalb lithologischer Abfolgen: Geologische Daten: – Kartenwerke, tektonische Kartierungen – Schichtenverzeichnisse – Bohrkernaufnahmen – Geologische und hydrogeologische 3D-Modelle – Aufschlüsse (ober- und untertägig) – Kenntnisse über die Verteilung und hydraulische Wirksamkeit von Störungen und Klüften in den anstehenden Formationen – Literatur und regionalgeologische Daten Geophysikalische Daten: – Seismik – BLM (z. B. Gamma, Gamma-Gamma, Resistivitylog, Porositylog, Akustiklog)	Lithologische und stratigraphische Gliederung im Teufenbereich 300 bis 2000 m in Gebieten, in denen Wirtsgesteinsformationen zu erwarten sind.	Neben der Ausweisung relevanter struktureller Komplikationen muss eine Charakterisierung der erfassten Strukturen bzgl. deren hydraulischer Wirksamkeit erfolgen. Relevante Fragestellungen sind, inwieweit eine oberflächennahe Ausbildung einer Struktur bzw. deren Eigenschaften (räumliche Lage, hydraulische Eigenschaften) in die Tiefe projiziert werden kann. Insbesondere ist dabei die hydraulische Wirksamkeit und die Intensität tektonischer Überprägungen zu bewerten. Auftreten von Karststrukturen unter Bedeckungen (z. B. Malmkarst über Opalinuston). S. auch Potenzialbringer.

Einschlusswirksamer Gebirgsbereich ersetzt durch ewG

[m unter Geländeoberfläche] ersetzt durch [m u. GOK]

Grundwasserleiter ersetzt durch GWL

Anhang 3:

Recherche zum Stand der internationalen Standortauswahlverfahren

Inhaltsverzeichnis Anhang 3

1. Einleitung.....	157
2. Identifizieren vorhandener Abwägungsmethoden.....	158
2.1 Frankreich.....	158
2.2 Belgien.....	159
2.3 Schweden.....	160
2.4 Finnland.....	167
2.5 Tschechien.....	172
2.6 Großbritannien.....	179
2.7 USA.....	180
2.8 China.....	181
2.9 Russland.....	183

1. Einleitung

Im Zuge der Arbeiten wurde eine Literaturrecherche zum jeweiligen Stand und den Verfahrensabläufen verschiedener internationaler Standortauswahlverfahren zur Entsorgung radioaktiver Abfälle durchgeführt (s. a. BGR 2015). Die Recherche konzentrierte sich auf Staaten mit Entsorgungsprogrammen, die weit fortgeschritten sind oder bereits konkrete Verfahrensregeln für die Standortauswahl aufweisen und mit dem Auswahlprozess begonnen haben oder sich kurz vor dem Beginn befinden. Bei der Auswahl der Staaten wurde darauf geachtet, dass die in Deutschland gemäß StandAG grundsätzlich für die Endlagerung in Frage kommenden drei Wirtsgesteine Steinsalz, Tongestein und Kristallingestein durch Beispiele abgedeckt sind. Im Folgenden ist eine Übersicht über die Verfahren in Frankreich (Tongestein), Belgien (Tongestein), Schweden (Kristallingestein), Finnland (Kristallingestein), Tschechien (Kristallingestein), Großbritannien (Wirtsgestein noch nicht festgelegt, potenzielle Wirtsgesteine Tongestein, Kristallingestein und Salzgestein), USA (Salzgestein, Tuff), China (Kristallingestein) und Russland (Kristallingestein) aufgeführt.

Der Stand der Standortauswahlverfahren in den einzelnen Ländern ist unterschiedlich weit fortgeschritten (NEA/OECD 2020). Abgeschlossene Standortauswahlverfahren weisen Finnland und Schweden auf. Die Endlager in diesen Ländern befinden sich in der Genehmigungsphase. In Frankreich wird zurzeit von der Andra das Genehmigungsverfahren für das Endlager „CIGEO“ (Centre industriel de stockage réversible profond de déchets radioactifs en Meuse/Haute-Marne) vorbereitet (ANDRA 2019, 2020). In Tschechien stehen zurzeit sechs potenzielle Standortgebiete zur Wahl (SÚRAO 2017a), während China und Russland Standorte für die Errichtung von Untertagelabors (URL) festgelegt haben, die gleichzeitig als zukünftige Standorte der Endlager in Frage kommen. In anderen Ländern mit Entsorgungsprogrammen wurden, nach ersten Studien und Erfahrungen auch hinsichtlich der Akzeptanz von Standortauswahlverfahren, neue Auswahlverfahren unter verstärkter Beteiligung der Öffentlichkeit, ähnlich wie in der Schweiz und auch in Deutschland, begonnen, z.B. in Großbritannien. Auch in Kanada soll in einem schrittweisen Verfahren ein Endlagerstandort unter Beteiligung der Öffentlichkeit gefunden werden (NWMO 2010, 2016, 2019).

Die Standortauswahl in den betrachteten Fällen basiert im Grundsatz auf zwei Alternativen. Im ersten Fall beruht die Auswahl auf dem Freiwilligkeitsprinzip, d. h. Gebietskörperschaften in potenziellen Standortregionen können ihr Interesse bekunden, als möglicher Standort zu fungieren (z. B. Frankreich). Der Standort muss jedoch immer den vorgegebenen gesetzlichen und geowissenschaftlich/technischen Anforderungen genügen. Die Eignung muss in der Folge durch Analysen zur Langzeitsicherheit, auch auf der Grundlage standortspezifischer Untersuchungen, nachgewiesen werden. Letztendlich ist die Standortentscheidung sicherheitsbasiert.

Im zweiten Fall erfolgt eine ausschließlich kriteriengestützte Suche nach einem Standort. Es gilt auch hier das Primat der Sicherheit, wobei die Freiwilligkeit betroffener Gebietskörperschaften nicht erforderlich ist. Die Belange Betroffener werden durch ein umfangreiches Beteiligungsverfahren berücksichtigt. In einem solchen Suchverfahren können zwei prinzipielle Ansätze verfolgt werden. Im ersten Ansatz wird ein Auswahlverfahren angewendet, in welchem Standorte an den sicherheitlichen Anforderungen gemessen werden. Ein Standort kann ausgewählt werden, wenn er genehmigungsfähig ist. Im zweiten Ansatz wird ein Standort gesucht, der das größtmögliche Sicherheitspotenzial unter den im Vergleich stehenden potenziellen Standorten aufweist (z. B. Schweiz und Deutschland). Dabei werden in einem mehrstufigen Einengungsverfahren zunächst geowissenschaftliche Ausschlusskriterien und daran anschließend Mindestanforderungen angewendet. Die identifizierten Gebiete werden in einem anschließenden Abwägungsprozess anhand von geowissenschaftlichen Abwägungskriterien bzw. Indikatoren miteinander verglichen. Als Beispiel für ein komplexes mehrstufiges Auswahlverfahren mit einem Abwägungsprozess gilt der Schweizer Sachplan Geologische Tiefenlager.

Die Auswahl des Wirts- bzw. Barrieregesteins wird häufig durch den geologischen Bau eines Landes eingeschränkt. In manchen Ländern ist lediglich ein potenzielles Wirtsgestein vorhanden (z. B. Kristallin in Skandinavien) und/oder Wirtsgesteine werden durch Nutzungskonflikte ausgeschlossen (z. B. Evaporite in Frankreich). Abwägungen zwischen potenziellen Standortregionen bzw. Standorten in unterschiedlichen Wirtsgesteinen erschweren einen nachvollziehbaren sicherheitstechnischen Vergleich, weil beispielsweise für die verschiedenen Wirtsgesteine unterschiedliche Sicherheits- und Nachweiskonzepte zu Grunde zu legen sind.

2. Identifizieren vorhandener Abwägungsmethoden

2.1 Frankreich

In Frankreich ist die Andra (Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs) für die Entsorgung und die Endlagerung der radioaktiven Abfälle zuständig. Das Konzept der Andra sieht eine Endlagerung in Tonsteinen des Callovo-Oxfordium in ca. 500 m Tiefe vor. In der Region Meuse/Haute-Marne wurde von der Andra nach umfangreichen Untersuchungen in der Region und im Unterlagelabor Meuse/Haute-Marne ein Standort vorgeschlagen, in dem das Endlager „CIGEO“ errichtet werden soll (Andra 2019). Die Entscheidung beruht auf den gesetzlichen Grundlagen zur Endlagerung radioaktiver Abfälle (Legifrance 1991, 2016, 2019) und den gesetzlichen Sicherheitsanforderungen (ASN 1991).

Das Standortauswahlverfahren wurde in BGR (2015) zusammengefasst:

Danach wurde für die Standortentscheidung ein Mediationsverfahren unter Beteiligung mehrerer Departements durchgeführt (BGR 2015). Aus ca. 30 Kandidaten wurden zunächst vier Standortregionen ausgewählt. Nach geowissenschaftlichen Untersuchungen wurde 1998 die Region Meuse/Haute-Marne für weitere Untersuchungen festgelegt. Die gesetzlichen Anforderungen sahen auch die Errichtung eines Untertagelabors vor (Andra 2013, 2020). Im Untertagelabor Meuse/Haute-Marne werden die Tonsteine des Callovo-Oxfordium untersucht, um die wissenschaftlichen und technischen Grundlagen für den Machbarkeitsnachweis zu erarbeiten. Im Jahr 2006 hat das französische Parlament auf Basis der wissenschaftlichen Untersuchungen der Andra, deren Prüfung durch die ASN und einer öffentlichen Debatte die Auswahl der Andra bestätigt und die Andra beauftragt in der Region Meuse/Haute-Marne ein Endlager zu errichten. Nach weiteren Untersuchungen hat die Andra einen Standort für das Endlager vorgeschlagen (CIGEO). Die Standortauswahl berücksichtigte geowissenschaftliche und gesetzliche Vorgaben, die auf festgelegten Sicherheitskriterien beruhten (ASN 1991, 2009). Im Jahr 2016 wurde die Rückholbarkeit der radioaktiven Abfälle gesetzlich geregelt (Legifrance 2016). Eine Standortauswahl bzw. ein Vergleich verschiedener Standorte unter Berücksichtigung von darüber hinaus gehenden Abwägungskriterien erfolgte nicht.

2019 wurde das Genehmigungsverfahren für das Endlager „CIGEO“ eingeleitet. Nach der Planung soll dieses 2022 abgeschlossen werden und mit dem Bau des Endlagers begonnen werden (Andra 2020).

2.2 Belgien

In Belgien sind die halbverfestigten Tonsteine des Boom Clay und des Ypresian Clay die geologischen Formationen, die die wesentlichen Eigenschaften für eine natürliche geologische Barriere aufweisen, um die Langzeitsicherheit in einem Endlagersystem zu gewährleisten. Für ein Endlager in der Boom-Clay-Formation wurden die erforderlichen Eigenschaften in einer Machbarkeitsstudie (ONDRAF/NIRAS 2011) nachgewiesen. Die Studie berücksichtigt internationale Standards zu Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen (IAEA 2011).

Die festgestellten Eigenschaften des Boom Clay gelten als Anforderungen für eine zukünftige Standortwahl. Eine weitere Eingrenzung oder Ergänzung der Anforderungen oder Kriterien erfolgte in Belgien bisher nicht, da der Fokus der F&E-Untersuchungen zunächst auf dem Nachweis der Machbarkeit eines Endlagers im Boom Clay liegt. Aus dem vorliegenden Entsorgungskonzept geht hervor, dass in einem zukünftigen Standortauswahlverfahren eine

Vorgehensweise mit vorgegebenen Schritten geplant ist. Die Adaption der Vorgehensweise an EU-Vorgaben oder an das Verfahren in anderen Ländern (z. B. Schweiz) deutet darauf hin, dass in Belgien ein daran angelehntes Verfahren zur Anwendung kommen soll. In Belgien wird zurzeit kein Standortsuchverfahren durchgeführt. Aktuell wurde in Belgien ein strategischer Planentwurf für die Endlagerung radioaktiver Abfälle vorgelegt (NERAS 2018). Dazu gehört eine Umweltverträglichkeitsprüfung, die schrittweise dem Genehmigungsverfahren angepasst wird (NERAS 2020a, 2020b). Die Entscheidung wo, wie und wann ein geologisches Endlagersystem realisiert werden soll, ist mit einem Entscheidungsprozess verbunden, der mehrere Jahrzehnte dauern kann.

Aus den bisher in Belgien durchgeführten Untersuchungsprogrammen, insbesondere im Untertagelabor „HADES“, lassen sich aus den wissenschaftlichen Untersuchungen an den Eigenschaften des Boom Clay weitere Anforderungen an Parameter ableiten, die für einen Langzeitsicherheitsnachweis relevant sind. Insbesondere sind dies die folgenden Fragestellungen:

- Identifizierung und Charakterisierung von Störungszonen und der lithologischen Heterogenität des Boom Clay sowie Untersuchungen zur Migration von Radionukliden,
- thermo-hydraulisch-mechanisches Verhalten des Boom Clay,
- hydrogeologische Untersuchungen der regionalen und lokalen Hydrogeologie im Boom Clay und Modellberechnungen,
- seismische Aktivität,
- radiochemische Charakterisierung des Wirtsgesteins.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden in einem zukünftigen Auswahlverfahren und der Festlegung von Kriterien berücksichtigt.

2.3 Schweden

In Schweden ist die Standortsuche mit der Festlegung des Standortes Forsmark seit 2009 beendet. Aktuell läuft das Genehmigungsverfahren. Der Baubeginn ist für 2022 geplant (SKB 2019, 2020).

Im Unterschied zum deutschen Auswahlverfahren fiel in Schweden in Ermangelung adäquater Alternativen schon in der frühesten Phase der Standortauswahl (Mitte der 1970er Jahre) die Entscheidung für ein Endlagerkonzept im präkambrischen Kristallin.

Für Untersuchungen zur Geologie und Strukturgeologie des geklüfteten Kristallin, der hydrogeologischen Bedingungen und zur Einlagerungstechnik wurde schon in dieser frühen Phase das Untertagelabor „Stripa“ durch die private, von den schwedischen Kraftwerksbetreibern gegründete SKB (Svensk Kärnbränslehantering Aktieföretag/Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company) in einem ehemaligen Eisenerzbergwerk angelegt (Fairhurst et al. 1993). Bis 1985 wurden, überwiegend anhand vorhandener Daten, landesweit Übersichtsstudien erstellt, mit dem Ergebnis, dass weite Bereiche der Kristallinvorkommen Schwedens geeignet seien, ein HAW-Endlager aufzunehmen. Erste grobe Standortuntersuchungen (Tiefbohrungen) an zehn Orten wurden durchgeführt, um Erkenntnisse zu Erzführung, Störungszonen, Klüftigkeit oder zur Grundwasserhydraulik zu gewinnen. Eine Zusammenfassung des Auswahlverfahrens findet sich in Hammer et al. (2009). Im Jahre 1995 wurde in der Nähe des KKW Oskarshamn das Untertagelabor Äspö für weitere Untersuchungen im Kristallin in Betrieb genommen (Bäckblom et al. 1997, SKB 2016).

Auf Grundlage des vorhandenen Datenmaterials erfolgte 1984 die Genehmigung des „KBS-3-Konzeptes“ zur untertägigen Endlagerung wärmeentwickelnder hochradioaktiver Abfälle in tiefliegendem kristallinen Wirtsgestein. Ebenso fiel aufgrund der bislang gewonnenen Untersuchungsergebnisse eine Standortentscheidung für ein Endlager für schwach- bis mittelradioaktive Abfälle in Nähe des KKW Forsmark, das 1988 in Betrieb ging.

In „Allgemeinen Studien zur Standortauswahl“ erfolgte eine Diskussion auf Grundlage vorhandener Daten zur Gesteinszusammensetzung, zu eventueller Erzführung und zu Vorkommen von Deformationszonen, die die Möglichkeit der Endlagerung in Gemeinden, in denen schon nukleare Einrichtungen vorhanden sind, beleuchten sollten (SKB 2011).

Machbarkeitsstudien, die zwischen 1992 und 2000 durchgeführt wurden, zeigten eine Reihe untersuchungswürdiger alternativer Standorte, unter gleichzeitiger Berücksichtigung der Interessen der betroffenen Gemeinden und ihrer Bewohner auf. Laut Regierungsbeschluss sollten anhand der von der SKB entwickelten Standortanforderungen und Kriterien fünf bis zehn Gemeinden als mögliche Standorte identifiziert werden, um aus diesem Pool schließlich zwei Gemeinden für Standortuntersuchungen auszuwählen. Während der Phase der Machbarkeitsstudien wurde ein aktiver Dialog seitens SKB mit Bürgern und Gemeinden geführt und es sollte der Bevölkerung die Gelegenheit gegeben werden, ihr Interesse an einem zukünftigen möglichen Standort auf dem Gebiet ihrer Gemeinde zu bekunden. Die Studien sollten anhand der vorhandenen geologischen Daten (ohne Generierung neuer Daten durch Tiefbohrungen) die Aussichten auf die Errichtung eines Endlagers in erster Linie unter Berücksichtigung der geologischen und gesellschaftlichen Verhältnisse aufzeigen und die möglichen positiven als auch die negativen Konsequenzen für Umwelt, Wirtschaft, aber auch den Tourismus beleuchten (SKB 2011).

Im Zuge des Standortauswahlverfahrens wurden allgemeine geowissenschaftliche Anforderungen an einen potenziellen Standort, Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen formuliert. Während der Phase der Ausfertigung der Übersichtsstudien als auch in den Machbarkeitsstudien erfolgte der Vergleich- und Auswahlprozess auf Grundlage von geowissenschaftlichen als auch sozioökonomischen „Abwägungskriterien“ (preferences), um einen möglichst gut geeigneten Standort zu identifizieren (BGR 2015) nach (SKB 1994, 2000a, 2000b, 2011). Die Eignung eines Standortes war jedoch nicht an die Erfüllung sämtlicher Präferenzen gebunden. Vielmehr sollte die Einhaltung und Erfüllung der Kriterien bzw. Präferenzen einen Standort durch beispielsweise höhere Sicherheitsreserven, bessere infrastrukturelle Bedingungen oder geringere Erschließungskosten hervorheben.

Allgemeine Anforderungen an einen Standort (BGR 2015):

- Aufrechterhaltung langfristig stabiler thermischer, hydrologischer, gebirgsmechanischer, seismischer und chemischer Bedingungen, um die Funktion der technischen Barrieren zum Einschluss des Abfalls zu gewährleisten (BGR 2015) nach (SSMFS 2008; SKB 1994),
- Gewährleistung eines hohen Rückhaltevermögens des Wirtsgesteins, um im Fall der Beschädigung der technischen Barrieren den Radionuklidtransport zu verzögern (BGR 2015) nach (SKB 1994),
- Einhaltung eines ausreichenden Abstandes zu abbauwürdigen natürlichen Rohstoffvorkommen, um das Risiko unbeabsichtigten menschlichen Eindringens zu reduzieren (BGR 2015) nach (SSMFS 2008; SKB 1994),
- Gebirgseigenschaften, die den Bau von Schächten, Tunneln und Felskavernen unter den gegebenen Sicherheitsanforderungen ermöglichen (BGR 2015) nach (SKB 1994),
- gute Bedingungen für die Infrastruktur über- und untertage“ (BGR 2015) nach (SKB 1994).

Ausschlusskriterien (BGR 2015) nach (SKB 1994, 2000b):

- Für schwedische Verhältnisse abnorme Grundwasserchemie,
- stark heterogenes und schwer zu interpretierendes Gebirge,
- bekannte Deformationszonen und postglaziale Verwerfungen,
- ausgeprägte Austrittsbereiche des Grundwassers,
- mehrere engständige wasserführende Kluftzonen,

- Anhang 3 -

- hohes topographisches Gefälle (größer 1%),
- Vorkommen regionaler und lokaler plastischer Scherzonen, die eine sinnvolle Anordnung des Endlagers unter Berücksichtigung des erforderlichen Mindestabstandes zu diesen Scherzonen ausschließen,
- Ergebnisse gebirgsmechanischer Analysen, die darauf schließen lassen, dass es zu weitreichenden Stabilitätsproblemen kommen wird, die mit angemessener Anpassung des Endlagerdesigns nicht zu vermeiden sind.

Gebiete, die sich durch eine günstige geologische Gesamtsituation auszeichnen, wurden anhand geowissenschaftlicher Mindestanforderungen ausgewiesen (requirements). Die Einhaltung aller Mindestanforderungen ist für die Ausweisung eines geeigneten Standortes nötig.

Mindestanforderungen (BGR 2015) nach (SKB 1994, 2000a, 2000b):

- Abstand zu regionalen plastischen Scherzonen, wenn deren Eigenschaften vom umgebenden Gestein abweichen. Als Ausnahmen werden tektonische Linsen genannt, die homogene und weitgehend unbeeinflusste Eigenschaften aufweisen.
- Es muss die Möglichkeit bestehen, Einlagerungsbereiche mit einem Mindestabstand zu regionalen und lokalen Großklüften zu positionieren. Die Einlagerungsbohrungen sollten identifizierte kleinere Klüftzonen nicht durchqueren.
- Die Festigkeit und Primärspannungen des Gebirges sowie die Geometrie der Klüftsysteme müssen derart beschaffen sein, dass keine größeren Zonen der mechanischen Überbeanspruchungen im Einlagerungsbereich entstehen.
- Das im Endlagerhorizont anstehende unbeeinflusste Grundwasser darf keinen gelösten Sauerstoff enthalten, um die Korrosion der Behälter zu verhindern.
- Der Gesamtsalzgehalt (Total Dissolved Solids (TDS)) des Grundwassers im Endlagerhorizont muss einen Wert von 100 g/l unterschreiten, da ein erhöhter Salzgehalt die Langzeitintegrität der Bentonitbarriere beeinträchtigen kann.

Abwägungskriterien bzw. Präferenzen (preferences) dienen der Ausweisung eines möglichst gut geeigneten Standortes. Eine Erfüllung aller Präferenzen ist für die Standorteignung im Gegensatz zu den Mindestanforderungen jedoch nicht nötig.

Abwägungskriterien (BGR 2015) nach (SKB 1994, 2000a, 2000b):

- Formation mit großer geometrischer Ausdehnung und wenigen größeren Klüftzonen,
- häufig vorkommende Gesteinsarten, um zukünftige Nutzungskonflikte zu minimieren,
- primäre Gebirgstemperatur im Endlagerhorizont kleiner als 25 °C, um Nutzungskonflikte mit geothermaler Energiegewinnung zu vermeiden,
- geringe Häufigkeit lokaler, kleiner Klüftzonen,
- geomechanische Eigenschaften (Primärspannungen, Deformationseigenschaften, Festigkeit), die im schwedischen Kristallin als normal angesehen werden können,
- Temperaturexpansionskoeffizient im für schwedische Verhältnisse üblichen Bereich (zwischen 10^{-6} und 10^{-5} K⁻¹) und der im Einlagerungsbereich nicht markant variiert,
- Wärmeleitfähigkeit des Wirtsgesteins höher als 2,5 W/(mK),
- hydraulische Konduktivität des Wirtsgesteins in großen Bereichen unter 10^{-8} m/s,
- geringe Wasserdurchlässigkeit von Klüftzonen, die während des Baues durchörtert werden müssen (Transmissivität $<10^{-5}$ m²/s),
- hydraulischer Gradient unter 1% im Endlagerhorizont,
- Grundwasser im Endlagerhorizont sollte einen pH-Wert zwischen 6⁻¹⁰, eine geringe Konzentration organischer Bestandteile, geringe Kolloid- und Ammoniumkonzentration sowie einen Mindestgehalt an Mg und Ca aufweisen,
- geringer Radon- und Radiumgehalt im Grundwasser und geringer uranhaltiger Minerale im Wirtsgestein,
- in großen Bereichen des Einlagerungsbereiches sollten Bohrlöcher und Einlagerungsnischen mit einer Darcy-Fließrate unter 0,01 m/a lokalisierbar sein,
- Transportwiderstand möglicher Fließwege größer als 10^4 a/m,
- Matrixdiffusivität und –porosität des Wirtsgesteins, die nicht viel geringer sind als die in der Sicherheitsanalyse SR97 betrachteten Werte (Porosität 0.5%, Diffusivität s. Ohlsson & Neretnieks (1997)). Zugängliche Diffusionstiefe min. 1 cm.

Für den systematischen Vergleich zwischen den Standortalternativen Forsmark und Laxemar wurden folgende sicherheitsrelevante Vergleichsfaktoren berücksichtigt (BGR 2015) nach (SKB 2009):

- Zusammensetzung und Struktur des Wirtsgesteins:
 - Abstand zu größeren Deformationszonen.
- Zukünftige klimatische Verhältnisse:
 - Auswirkungen zukünftiger Eiszeiten (Inlandeis, Permafrost).
- Gebirgsmechanische Verhältnisse:
 - Gebirgsspannungen und geomechanische Eigenschaften des Wirtsgesteins (Primärspannungen, Festigkeiten).
- Risiko und Konsequenzen möglicher Erdbeben.
- Grundwasserströmung:
 - Verteilung und Permeabilität wasserführender Klüfte.
- Grundwasserzusammensetzung:
 - Derzeitige und zukünftige Zusammensetzung (Salzgehalt, gelöster Sauerstoff).
- Rückhaltevermögen:
 - Matrixdiffusion und Sorption von Radionukliden.
- Biosphäre.
- Allgemeiner Kenntnisstand bzgl. des Standortes:
 - Menge der durchgeführten Untersuchungen und daraus gewonnener Daten,
 - Eindeutigkeit der Interpretationen.

Darüber hinaus wurden im Vergleich zwischen den Standortalternativen technische und gesellschaftliche Faktoren, sowie die zu erwartenden Auswirkungen auf Umwelt und Gesundheit berücksichtigt.

In Abb. A-3.1 werden Beispiele für die Abhängigkeiten im schwedischen Verfahren zwischen unbedingt zu erfüllenden Mindestanforderungen an den Standort (requirement), den zugehörigen Indikatoren (suitability indicators) und möglicher Kriterien (possible criteria), die sich aus den Anforderungen und Indikatoren ergeben, aufgelistet. Die Anforderungen werden unabhängig vom Stand des Verfahrens der Standortsuche gestellt (1. Stufe:

- Anhang 3 -

General siting studies, 2. Stufe: Feasibility studies, 3. Stufe: Standorterkundung usw.). Kriterien können dagegen z.T. erst im Verlauf des Verfahrens entwickelt und angewendet werden (SKB 2000a).

	General siting studies	Feasibility studies	Site investigation	Detailed characterization	Operation
Requirement: No dissolved oxygen in groundwater at repository level					
Knowledge	Generic	Generic	Site specific information from deep boreholes, which is sufficient to characterize the repository area.	May contribute new knowledge in the low-permeable rock, but also entails a risk of disturbances.	May ontribute new knowledge in the low-permeable rock, but also entails a risk of disturbances.
Suitability indicators	-	-	Eh, [Fe ²⁺] and [HS ⁻] as indicators of the absence of dissolved oxygen.	-	-
Examples of possible criteria	No criteria	No criteria	At least one of the indicators low Eh, occurrence of Fe ²⁺ or occurrence of HS ⁻ must be satisfied. Otherwise the site must be abandoned.	-	-
Requirement: Deposition holes may not be intersected by fracture zones					
Knowledge	Location of regional zones at surface can be judged	Location of regional zones at surface can be judged	Reasonable precision for regional and local major fracture zones. Stochastic information on local minor fracture zones and fractures (frequency, orientation, size)	High precision for regional and local major fracture zones in the repository area. Fair for local, small ones. Stochastic information on fractures. Knowledge of location of fracture zones and fractures at tunnels.	Knowledge of location of all fracture zones at deposition holes.
Suitability indicators	Location, orientation, length and width of regional fracture zones.	Location, orientation, length and width of regional fracture zones and local, major fracture zones.	Location, orientation, length and width of fracture zones and fractures.	Location, orientation, length and width of fracture zones and fractures.	Length, orientation, length and width of fracture zones and fractures.
Examples of possible criteria	Large homogeneous areas with large distance between regional fracture zones are of interest for further studies.	Further studies suitable in areas with such large distances between interpreted regional fracture zones that they accommodate a repository.	Revise layout based on new knowledge. If the repository does not fit (is split into a number of parts), another site should be chosen.	Unsuitable location for deposition tunnels can be avoided.	Direct verification of requirement impossible. Un-suitable positions for deposition holes can be avoided.

Abb. A-3.1: Abhängigkeiten zwischen Mindestanforderungen, Indikatoren und Kriterien

Im Unterschied zum deutschen Standortauswahlverfahren fiel in Schweden frühzeitig die Entscheidung auf ein Wirtsgestein. Zudem erlaubte ein Regierungsbeschluss, sich auf eine überschaubare Anzahl potenzieller Standorte zu beschränken und schließlich nur an zwei gut geeigneten Standorten Standortuntersuchungen durchzuführen.

2.4 Finnland

Die Errichtung des Endlagers für hochradioaktive Abfälle in 400-450 m Tiefe auf der Olkiluoto-Halbinsel im Kristallingestein des fenno-skandischen Schildes im Westen Finnlands befindet sich zur Zeit in der Genehmigungsphase (NERAS 2018, 2020a, 2020b). Das Endlagerkonzept der finnischen Endlagerorganisation Posiva Oy entspricht dem schwedischen KBS-3 Konzept (NERAS 2020a, POSIVA 2019). Mit dem Beginn der Einlagerung wird in den frühen 2020er Jahren gerechnet (POSIVA 2019). Das finnische Auswahlverfahren für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle wird in POSIVA (2000) wie folgt zusammengefasst:

In den späten 1970er Jahren starteten erste wissenschaftliche Untersuchungen zur Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen (speziell in hoch-metamorphen und magmatischen Gesteinen) in Finnland. 1980 bis 1982 wurden die generellen Möglichkeiten der Endlagerung im finnischen Grundgebirge bewertet. 1983 erfolgte ein Regierungsbeschluss, der die Errichtung eines Endlagers im Kristallin in mehreren hundert Meter Tiefe vorsah. Dem ungeklüfteten kristallinen Grundgebirge wurde zudem eine positive Sicherheitsbewertung zugewiesen. Im folgenden „Areal screening“ (Übersichtsstudien, 1983 bis 1986) wurden durch Auswertung u. a. von Satellitenbildern und gravimetrischen Messungen großräumige Störungs- und Verwerfungsmuster im finnischen Grundgebirge ausgehalten. Die Analysen bildeten die Basis für die Ausweisung potenzieller Standortgebiete („target areas“), die weiter anhand von Luftbildern, geologischen Kartierungen und regionalen geophysikalischen Messungen untersucht wurden. Auf Grundlage der Auswertung und Beurteilung der struktur- und hydrogeologischen Daten wurden 327 „Blöcke“ im Grundgebirge („regional blocks“) von jeweils 100-200 km² Flächengröße als potenzielle Standortgebiete ausgewiesen, die sich durch tektonische Stabilität auszeichnen sollten und durch Hauptstörungszonen begrenzt wurden.

Durch diverse Auswahlprozesse wurde die Zahl und Größe der infrage kommenden Standortgebiete schrittweise reduziert. Herangezogen wurden geowissenschaftliche und sozioökonomische Kriterien (Bevölkerungsdichte, Infrastruktur, Grundwasser- und Landschaftsnutzung, Bodenbesitzverhältnisse, öffentliche Akzeptanz), anhand derer schließlich fünf potenziell geeignete Gebiete ausgewiesen wurden. Hier wurden 1987 bis 1992 geologisch-geophysikalische Erkundungsarbeiten inkl. Tiefbohrungen durchgeführt sowie vorläufige Sicherheitsbewertungen im Rahmen von Machbarkeitsstudien erstellt.

Als Ergebnis der vorhergehenden Untersuchungen wurden zwischen 1993 und 1999 intensiviertere Standortuntersuchungen an den drei im Zuge der Auswahlprozesse festgelegten Standorten Romuvaara, Kivetty und Olkiluoto und am zusätzlich aufgenommenen Standort Loviisa (Hästholmen), der sich wie Olkiluoto durch die nahe Lage zum KKW auszeichnet,

durchgeführt. Alle vier Standorte erhielten hinsichtlich der geowissenschaftlichen Kriterien eine positive Bewertung, jedoch wurde Olkiluoto 1999 als potenziell günstigster Standort für ein Endlager vorgeschlagen. Ausschlaggebend für die Wahl des Standortes waren, trotz komplexer strukturgeologischer Gegebenheiten wie mächtige subhorizontal verlaufende Störungszonen und deutlicher Anisotropie der Wirtsgesteine, die besten Infrastrukturbedingungen vor Ort und die unmittelbare Nähe zum KKW.

Olkiluoto wurde durch die lokale Politik, mit mehrheitlicher Zustimmung der Bevölkerung (60%) und der Genehmigungsbehörde Finnish Radiation and Nuclear Safety Authority (STUK) durch das finnische Parlament 2001 als Standort für ein URL bestätigt. 2004 begann die Auffahrung des Erkundungsbergwerkes ONKALO (als Teil des zukünftigen Endlagers) und parallel wurde mit geowissenschaftlichen Forschungen sowie Forschungen zum Endlagerkonzept im Kristallin begonnen. Durch die im Felslabor gewonnenen Erkenntnisse wurde 2015 die Genehmigung zur Errichtung des Endlagers in 400-450 m Tiefe erteilt.

Im Unterschied zum deutschen Standortauswahlverfahren ist Finnland auf ein Wirtsgestein beschränkt. Viele international angesetzte Kriterien (IAEA 1977; NEA 1977), die bspw. auch im deutschen Standortauswahlverfahren betrachtet werden (z.B. Erosion, seismische Aktivität), sind für die finnische Standortsuche von nur geringer Relevanz. Bei der Vorauswahl der Standorte wurden jedoch bewusst verschiedene geologische Einheiten bzw. kristalline Gesteinstypen auf ihre Wirtsgesteinseignung hin untersucht. Die Untersuchungen zeigten jedoch schon frühzeitig eine etwa gleich gute Eignung der potenziellen Standorte bezüglich der betrachteten geowissenschaftlichen Kriterien, so dass in den weiteren Auswahlprozessen verstärkt die soziopolitischen und ökonomischen Bedingungen betrachtet und die Weiterentwicklung des Endlagerkonzeptes vorangetrieben werden konnten.

Die finnische Standortauswahl erfolgte durch ein mehrstufiges Verfahren unter Anwendung von Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen sowie von mehrfach im Verfahren angewandten Abwägungsprozessen. Die potenziellen Standortgebiete bzw. Standorte wurden hierbei klassifiziert und bewertet. Neben Klassifizierungen nach geowissenschaftlichen Kriterien wurden die Standorte anhand sozioökonomischer Kriterien klassifiziert. Im Vergleich zum deutschen Verfahren wurde in Finnland keine strikte, im Vorfeld festgelegte Vorgehensweise im Verfahrensprozess aufgestellt. Abwägungsprozesse zur Eingrenzung der Anzahl potenzieller Standortgebiete entwickelten sich im Laufe des Verfahrens. Die nachfolgende tabellarische Zusammenstellung der Verfahrensschritte (Tab. 3.1) gibt einen Überblick über Anwendung von Kriterien und den daraus abgeleiteten Ergebnissen. Aus dem finnischen Verfahren lassen sich keine Schlussfolgerungen zum Umgang mit Abwägungskriterien im deutschen Standortauswahlverfahren ableiten.

Tab. 3.1: Verlauf des finnischen Standortauswahlverfahrens nach POSIVA (2000)

Verfahrensschritt	Datenauswertung, Ziel	Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen, Klassifizierung/Abwägung	Ergebnis
1: 1978-1982	<p>Machbarkeitsstudien zur Möglichkeit der tiefen Endlagerung hochradioaktiven Mülls im finnischen Grundgebirge (Aikas 2000), Machbarkeitsstudien zum Endlagersystem im Hinblick auf Multibarrierensysteme und Langzeitsicherheit.</p> <p>Übersicht der Hauptgesteinstypen des Grundgebirges.</p>	<p>Geologische Faktoren für die Standortauswahl (POSIVA 2000):</p> <ul style="list-style-type: none"> Topographie Stabilität des Grundgebirges Endlagerteufe Erstreckung des Endlagers Homogenität des Wirtsgesteins Wirtsgesteinstyp Strukturgeologie (Störungen, Klüftung und Faltung) Diapirstrukturen (Granitdome) Porosität Sorptionsvermögen Natürliche Ressourcen / Bodenschätze Erosion 	<p>Möglichkeit zur Ausweisung potenzieller Endlagerstandorte im finnischen Grundgebirge auf Grundlage geologischer Kriterien ist gegeben (Aikas & Mc Ewen 2000).</p>
2: 1983 („initial screening“)	<p>Identifikation geologischer Charakteristika und Strukturen durch Analyse von Satellitenaufnahmen, aeromagnetischen und gravimetrischen Karten, Luftbildern, regionalen geophysikalischen Messungen, großmaßstäblichen geologischen Kartierungen zur Ausweisung potenzieller Standortgebiete („target areas“).</p>	<p>Klassifizierung von Störungszonen (Klassen 1 bis 4) nach Breite und Länge.</p> <p>Klasse 1: Störungszonen von ca. 1 km Weite und 10er bis 100er km Länge.</p> <p>Klasse 2: Weiten von >100 m und Längen >5 km bis mehrere 10er km. Störungen bzw. Störungszonen begrenzen oftmals die Blöcke der „target areas“.</p> <p>Klasse 3: Ruschelzonen („crush lineaments“) liegen innerhalb der „target areas“ und begrenzen die auszuweisenden Untersuchungsgebiete („investigation areas“, Flächen von 5-10 km²).</p> <p>Klasse 4: beinhaltet Klüfte und Klüftzonen innerhalb der Untersuchungsgebiete.</p> <p>Relevanteste Anforderungen an das Wirtsgestein: Hohe mechanische Widerstandsfähigkeit, hohe Dichte, geringer Wassergehalt, gute Sorptionsfähigkeit (Salmi et al. 1985).</p> <p>Internationale Empfehlungen und Kriterien zu Endlagerstandorten in tiefen geologischen Schichten (NEA 1977, IAEA 1977) fanden nur in geringerem Umfang Betrachtung, da sie zumeist nicht auf die geologischen Verhältnisse Finnlands angewandt werden mussten (Topographie, Erosion usw.).</p>	<p>327 polygonale, tektonisch stabile und von Hauptstörungszonen (Klasse 1 und 2) begrenzte Blöcke („regional blocks“) mit Flächengrößen von ca. 100-200 km².</p> <p>Einstufung großer Anteile des finnischen Grundgebirges bzgl. Anforderungen als potenziell geeignet (Einstufung auf Grundlage der zum Zeitpunkt vorhandenen Daten).</p>

- Anhang 3 -

Verfahrensschritt	Datenauswertung, Ziel	Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen, Klassifizierung/Abwägung	Ergebnis
3: 1983-1984	<p>Betrachtung von Umweltfaktoren („environmental factors“):</p> <p>Bevölkerungsdichte</p> <p>Infrastruktur-bezogene Faktoren</p> <p>Restriktionen bzgl. Landnutzung</p> <p>Schutzgebiete und wichtige Grundwasser-Ressourcen</p> <p>Infrastrukturfaktoren (Straßen, Eisenbahnen, Wasserwege, Landwirtschaft, Bebauungen usw.)</p> <p>Reduktion von Anzahl und Ausmaß der zuvor ausgewiesenen Standortgebiete.</p>	<p>Klassifizierung der umweltbezogenen Faktoren (Klassen 1 bis 3), Abwägung zwischen den zuvor ausgewiesenen Blöcken („target areas“), fungieren als Ausschlusskriterien:</p> <p>Klasse 1: geeignetes Gebiet (u. a. schwach besiedelt, geringe Bebauungsdichte, gute Transportanbindung, keine geschützten Gebiete).</p> <p>Klasse 2: weniger gut geeignetes Gebiet (u. a. keine städtischen bzw. größeren Siedlungen, nur kleine Flächen geschützter Gebiete, keine signifikanten Grundwasservorkommen, angemessene Transportanbindungen).</p> <p>Klasse 3: ungeeignetes Gebiet (u. a. große städtische Siedlungen, vielfrequentierte Straßen, keine Transportanbindungen, Vorhandensein großer Schutzgebiete sowie bedeutender Grundwasservorkommen).</p>	<p>162 Blöcke (zuteilt den Klassen 1 und 2). 165 Blöcke (Klasse 3) wurden aus dem Verfahren ausgeschlossen.</p>
4: 1984-1985	<p>Sammeln und Analyse weiterer Felddaten, bestehender Daten und regionaler Studien.</p> <p>Reduktion von Anzahl und Ausmaß der zuvor ausgewiesenen Standortgebiete.</p>	<p>Anwendung geologischer Kriterien:</p> <p>Größe des Standortgebietes</p> <p>Wahrscheinlichkeit, das Wirtsgestein in geringerer Ausdehnung innerhalb eines Blocks („target area“) anzutreffen</p> <p>Klufthäufigkeit</p> <p>Topographie</p> <p>Aufschlussdichte</p> <p>Klassifizierung, Einteilung in 5 Klassen.</p>	<p>61 Blöcke.</p>

- Anhang 3 -

Verfahrensschritt	Datenauswertung, Ziel	Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen, Klassifizierung/Abwägung	Ergebnis
5: 1984-1985	Identifikation von Untersuchungsgebieten/ Blöcken („investigation areas“) innerhalb der Blöcke („target areas“), Flächengrößen 5-10 km ² . Begrenzung der Untersuchungsgebiete durch Ruschelzonen/ Störungen (Klasse 3, s.o.). Annahme: das Untersuchungsgebiet stellt auch zukünftig ein tektonisch stabiles Gebiet/ Block dar, tektonische Bewegungen beschränken sich auf die die „target areas“ begrenzenden Hauptstörungen.	Kriterien: Gebietsgröße, Topographie, Störungszonen, Störungsdichte. Klassifizierung der „investigation areas“, Einteilung in Klassen 1 bis 4, basierend auf dem „scoring“ der Kriterien, d.h. Punktevergabe für jedes Kriterium (1 Punkt=„best“ bis 5 Punkte=„worst“). Gesamtpunktzahl bestimmt die Klassifizierung.	134 Untersuchungsgebiete.
6: 1985-1986	Geologische Analysen (keine Tiefbohrungen), Klassifizierungen, Studien zu den Umweltfaktoren. Betrachtung geologischer und sozioökonomischer Faktoren. Ausweisen von Gebieten für weitere Untersuchungen („areas for further investigations“).	Klassifizierung nach geologischen Faktoren (s.o.), 4 Klassen: Klasse 1: primär empfohlen. Klasse 2: sekundär empfohlen. Klasse 3: empfohlen, jedoch mit Einschränkungen. Klasse 4: nicht empfohlen. Zusätzliche Klassifizierung nach sozioökonomischen und infrastrukturellen Faktoren (Bevölkerung, Landbesitzverhältnisse, Transport), 3 Klassen je Faktor.	102 Gebiete für weitere Untersuchungen („areas for further investigations“).
7: 1986	Auswahl und Reduzierung der Anzahl an Gebieten durch STUK (Finnish Radiation and Nuclear Safety Authority), Expert Judgement.		85 Gebiete für weitere Untersuchungen („areas for further investigations“).
8: 1987	Ausweisen von Standorten für vorläufige Untersuchungen („sites for preliminary investigations“).	Ausgewählte Standortgebiete sollen möglichst die Hauptlithologien des finnischen Kristallins repräsentieren. Ausschluss von Gebieten aufgrund unzureichender geologischer Informationen (ausgeschlossene Gebiete weisen überwiegend flächenhafte Lockergesteinüberdeckungen auf. Informationen wären nur durch Bohrungen möglich). Bei gleicher Eignung von Gebieten bzgl. geologischer Faktoren, zusätzliche Betrachtung sozioökonomischer Faktoren (s.o.). Diskussion mit betroffenen Gemeinden.	5 Standorte für vorläufige Untersuchungen.
9: 1987-1992	Vorläufige Standortuntersuchungen		
10: 1993-2000	Detaillierte Standortuntersuchungen, Standortwahl		
11: 2012	Antrag auf Erteilung der Baugenehmigung		
12: 2015	Erteilung der Baugenehmigung		
13: 2020	Antrag auf Erteilung der Betriebsgenehmigung		
14: 2020's	Geplanter Beginn der Endlagerung		

2.5 Tschechien

In Tschechien wird das aktuell laufende Standortauswahlverfahren für ein HAW-Endlager durch die staatliche Organisation SÚRAO durchgeführt, die als Genehmigungsinhaber und Verfahrensträger fungiert und die tschechischen Entsorgungsanlagen für radioaktiven Abfall und die bestehenden oberflächennahen Endlager für schwach- bis mittelradioaktive Abfälle betreibt. SÚRAO untersteht der Kontrolle des Ministeriums für Industrie und Handel MPO (Alt 2017). Vorgesehen ist die Endlagerung der hochradioaktiven Abfälle im Wirtsgestein Kristallin (plutonisch/granitoid) in einer Teufe von ca. 500 m. Im Gegensatz zum schwedischen KBS-3-Konzept ist die Lagerung abgebrannter Brennelemente jedoch in bentonitummantelten Stahlcontainern anstatt in Kupferbehältern geplant. Der Standortauswahlprozess soll sich an der IAEA-Richtlinie "Siting of Geological Disposal Facilities - A Safety Guide", (IAEA 1994) orientieren. Standortauswahlkriterien (Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen) finden sich im Dokument (SÚRAO 2017b) und in den Dokumenten (Woller 2006; Piskač 2003). Abwägungen anhand von Kriterien finden sich in (Lorenz & Lahodynsky 2013) nach (Piskač 2003) und (Woller 2006). Zumeist beruhen die Abwägungen im Verlauf des tschechischen Standortauswahlprozesses jedoch auf Expert Judgement ohne Nennung konkreter Bewertungsgrößen und Wertebereiche zu den Kriterien. Das tschechische Verfahren verläuft in Anlehnung an die IAEA-Vorgaben in vier Etappen (1. Konzept und Planung, 2. Untersuchung und Bewertung von Standortgebieten, 3. Charakterisierung von Standortgebieten, 4. Standortauswahl). Zurzeit befindet sich das tschechische Standortauswahlverfahren laut SÚRAO in der Etappe 3, in der die Standortgebiete weitergehend bewertet bzw. charakterisiert werden sollen. Aus Etappe 3 sollen schließlich zwei Standorte hervorgehen, aus denen in Etappe 4 der endgültige Endlagerstandort festgelegt wird.

Die Suche nach einem Endlager wurde in Tschechien 1991 begonnen, nachdem ein Abkommen mit der Sowjetunion über die Rücknahme abgebrannter tschechischer Brennelemente aufgelöst wurde. Zwischen 1991 und 1998 (Etappe 1: Konzept und Planung) erfolgte eine Auswahl von 27 potenziellen Standortgebieten (nach Lorenz & Lahodynsky 2013) durch den damaligen geologischen Dienst ČGU durch die Auswertung vorhandener regionalgeologischer Informationen und Karten. Neben Kristallingebieten war zunächst auch eine Kreide-Mergelformation vorgesehen. Anhand welcher Kriterien die Auswahl der Standorte erfolgte ist den tschechischen Unterlagen allerdings nicht zu entnehmen (Alt 2017).

An einem Forschungsstandort im Melechovský-Massiv wurden zwischen 1993 und 2010 Bohrungen abgeteuft und repräsentative geophysikalische, strukturgeologische, hydrogeologische und geochemische Untersuchungen am Kristallingestein durchgeführt (Alt 2017). Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens sollten die Grundlage für die Konkretisierung geologischer Standortkriterien bilden.

- Anhang 3 -

Bis 1998 wurde die Anzahl potenzieller Standortgebiete auf acht begrenzt. Die Auswahl der Standortgebiete erfolgte anhand eines zweistufigen geowissenschaftlichen Kriteriensatzes sowie unter Betrachtung möglicher Interessenkonflikte. In einem ersten Schritt erfolgte eine Recherche der vorhandenen geowissenschaftlichen Daten. Insbesondere wurden seismologische Daten betrachtet. Geologische und hydrogeologische Daten in der geplanten Endlagertiefe von 500-1000 m lagen nicht vor, da vorhandene Bohrungen nur vereinzelt bis max. 100 m abgeteuft wurden. Im zweiten Schritt wurde das jeweilige Standortgebiet nach Homogenität des Wirtsgesteins, Tektonik, Alteration des Gesteins, Tiefenerstreckung und seismischer Stabilität sowie möglicher Interessenkonflikte bewertet. Die qualitative Bewertung der potenziellen Standortgebiete anhand einer Bewertungsskala erfolgte durch Expert Judgement (1=vollständig akzeptabel, 2=noch akzeptabel, 3=nicht mehr akzeptabel, (Alt 2017; Woller 2006)).

Die Arbeiten zur Standortauswahl wurden durch SÚRAO kaum öffentlich diskutiert. Die Bekanntmachung der Untersuchungsergebnisse 2001 durch die Medien lösten einen massiven öffentlichen Protest aus, der SÚRAO zum Neustart der Standortsuche veranlasste (Etappe 2: Bewertung der Standortgebiete). Zur Bewertung der Standortgebiete wurde durch die Arbeiten von (Piskač 2003) ein fünfschrittiges Verfahren entwickelt, in dem vorrangig die geowissenschaftlichen Kriterien, aber auch sozioökonomische und infrastrukturelle Aspekte sowie zukünftige Interessens- und Zielkonflikte betrachtet wurden (Tab. 3.2).

Tab. 3.2: Auswahlverfahren in Etappe 2 (Bewertung der Standortgebiete)

Schritte Standortauswahl/ Etappe 2	Identifikation	Datenauswertung / Ziel
Schritt 1	Identifikation von: Störungszonen, Hauptstörungen Seismisch aktiven Gebieten Neotektonik Quartärer Vulkanismus Postvulkanische Aktivität	Literaturrecherche, Auswertung vorhandener Daten, Analyse ingenieur-seismologischer Daten, die für den Bau kerntechnischer Anlagen erfasst wurden. Ausschluss tektonisch-geologisch ungeeigneter Regionen.
Schritt 2	Identifikation geeigneter Wirtsgesteinsvorkommen über: Morphologie Lithologie Störungen, Klüftung Hydrogeologie Mineralogie Geochemie	Ausweisung von Regionen mit günstigen geologischen Bedingungen.

- Anhang 3 -

Schritte Standortauswahl/ Etappe 2	Identifikation	Datenauswertung / Ziel
Schritt 3	Identifikation von (geologisch geeigneten) Gebieten, die jedoch in Konflikt stehen mit: Langzeitsicherheit Realisierbarkeit und sicherem Betrieb eines Endlagers Raumnutzung, Umweltschutz, Demographie	Ausschluss von Gebieten aufgrund von Rechtsvorschriften und Schutzstatus. Grundlage: Erlass 215/1997 Coll. des SÚJB(SÚJB 1997) zur Standortauswahl kerntechnischer Anlagen, relevante Umweltschutzbestimmungen, prioritäre Nutzungen.
Schritt 4	Vergleich der Standortgebiete bezüglich: Zugänglichkeit Infrastruktur Bevölkerungsdichte Grundstückverhältnisse Landschaftsbild Natürliches Radonrisiko Öffentliche Akzeptanz	Beurteilung potenziell vorteilhafter oder nachteiliger, jedoch nicht sicherheitsrelevanter Aspekte.
Schritt 5		Finale Auswertung und Begründung der Auswahl der Standortgebiete.

Im Abwägungsprozess sollten primär die Anforderungen des Strahlenschutzes bzw. der kerntechnischen Sicherheit gelten. In Bezug auf den IAEA Safety Guide 111-G-4.1 (IAEA 1994) wurden die Standortgebiete vorrangig anhand geowissenschaftlicher Kriterien betrachtet und bewertet. Eine Auflistung der geowissenschaftlichen Kriterien und zugehöriger Indikatoren und Limitierungen nach (Piskač 2003) finden sich in den Tabellen 3.3, 3.4 und 3.5. Ergebnis des fünfschrittigen Auswahlverfahrens (unter Betrachtung zweier Varianten der Eingrenzung) war die Beschränkung von ursprünglich 11 Standortgebieten auf „8+1“ bzw. „6+1“ Standortgebiete (die Ergänzung „+1“ bezieht sich auf die Hinzunahme des nordböhmischen Beckens in Grenznähe zu Sachsen, das optional einer Machbarkeitsprüfung unterzogen werden sollte) (Alt 2017). SÚRAO favorisierte die Variante „6+1“. Die sechs Standortgebiete finden sich auch schon in der ursprünglichen Standortgebietsauswahl der Etappe 1. Die verbliebenen fünf Standorte wurden zurückgestellt und sollten als Ersatzstandorte fungieren.

Tab. 3.3: Anforderungen an die Wirtsgesteine und Indikatoren (Lorenz & Lahodynsky 2013) nach (Piskač 2003)

Anforderung	Indikator
1. Günstige räumliche und Größenkonfiguration des Gesteinsmassivs.	a) notwendige Flächenreichweite und Tiefenreichweite des Gesteinsmassivs, b) geeignete morphologische Bedingungen.
2. Gute Kenntnis und Beschreibbarkeit des Gesteinsmassivs.	a) einfacher struktureller Aufbau, b) petrographische Homogenität und Homogenität der physikalischen Eigenschaften, c) Minimum an sekundären Veränderungen begleitet von Veränderungen der physikalischen Eigenschaften, d) niedrige Stufe an tektonischer Störung, e) Fehlen von Lagerstätten (auch von potenziellen, in der Zukunft bedeutsamen Lagerstätten).
3. Annahme langfristiger Stabilität des Gesteinsmassivs.	a) das Gesteinsmassiv muss geodynamisch stabil sein, mit beschreibbaren neotektonischen Erscheinungen und rezenter tektonischer Stabilität, b) Gesteinsmassiv muss in einem seismisch inaktiven Gebiet liegen und die seismische Last aus entfernt liegenden Erdbebenherden liegt unter 6° MSK-64.
4. Die Wirtsgesteinsformationen haben für das Tiefenlager günstige Eigenschaften.	a) Sicherstellung einer langfristigen Isolation der radioaktiven Abfälle, b) die Bedingungen stellen die Realisierung der unterirdischen Bereiche des Tiefenlagers sicher, c) gute Wärmeleitfähigkeit und geringes Ausdehnungsvermögen.
5. Einfache und beschreibbare hydrogeologische Verhältnisse.	a) geringe Durchlässigkeit, b) beschreibbare Pfade und Möglichkeiten für das Strömen des Grundwassers.
6. Günstige geochemische und hydrochemische Bedingungen im Horizont des Tiefenlagers.	a) chemisches Gleichgewicht, b) geeigneter pH- Wert (7-8), c) Reduktionsbedingungen, d) minimaler Anteil komplexierender Stoffe, e) Kompatibilität des natürlichen Umfelds mit den Materialien der angenommenen künstlichen Barrieren.
7. Hohe Retentionsfähigkeit der Gesteine für Radionuklide.	a) Sorption.
8. Gute Widerstandsfähigkeit gegen Gasdruck.	a) Druck von Gasen im Endlager.
9. Geringe Tendenz zur Bildung von Zonen für präferentielle Strömung.	a) beschreibende und physikalische Eigenschaften von Erden und Gesteinen, b) Schaffung plastischer Deformationen.

- Anhang 3 -

Tab. 3.4: Anforderungen und Indikatoren aus Tabelle 2 und der zugehörigen zulässigen Limits (Lorenz & Lahodynsky 2013) nach (Piskač 2003)

Anforderungen	Indikator	Limit (Kriterium)
1.	a)	Bei magmatischen und metamorphen Gesteinen beträgt die Fläche des Gesteinsmassivs 10 km ² , ihre Tiefe sollte sich bis 1500 m erstrecken. Bei Sedimentgesteinen eine Fläche von 25 km ² , die minimale Mächtigkeit der Formation sollte für die Lagerung 100 m betragen.
	b)	Die morphologischen Verhältnisse des Gebiets dürfen die Realisierung und den Betrieb des Tiefenlagers nicht unmöglich machen.
2.	a)b)c)d)e)	Für die Auswahl eines geeigneten Gebiets im zweiten Schritt kann man die genannten Indikatoren nur unter dem Aspekt der regionalgeologischen Kenntnisse und existierenden geologischen Unterlagen anwenden. In der CR ist diese Vorgangsweise möglich.
3.	a)	Ein Gebiet aus Sedimentgestein muss mind. 500 000 Jahre seismotektonisch stabil sein.
	b)	SUJB-Verordnung Nr. 215/1997 Slg., 4 e) und §5c). Für die Wahl des Tiefenlagers wird ein strengerer Wert angewendet werden.
4.	a)b)c)	Klassifizierung und Bewertung kann allein auf allgemeinen Charakteristika und Eigenschaften der Gesteine beruhen und von Analogien oder aus Expertengutachten stammen.
5.	a)b)	Einschätzung der Eigenschaften lässt sich auf der Grundlage existierender Daten, Erfahrungen und Analogien durchführen.
6.	a)b)c)d)e)	Bei den meisten Fällen lassen sich keine Rahmenkriterien aufstellen.
7.	a)	Allgemeine Anwendung der quantitativen Kriterien geeigneter geologischer Bedingungen ist sehr schwierig. Die Kriterien müssen von der Kenntnis der Bedingungen am Bauplatz und dem Lagerungskonzept abgeleitet werden.
8.	a)	Die geologischen Verhältnisse müssen unter dem Aspekt des Druckanstiegs der Gase bewertet werden, der eine Gefahr für die Integrität des Barriersystems bedeutet. Verifizierung auf der Grundlage der Daten über den Bauplatz und das Lagerungskonzept.
9.	a)	Können auf der Grundlage existierender Daten und Analogien festgelegt werden.
	b)	Können nur theoretisch, als Rahmen festgelegt werden.

- Anhang 3 -

Tab. 3.5: Anforderungen, Indikatoren aus Tabelle 2 und Limits (Auswahlkriterien) für eine weitergehende Standortgebietsauswahl (Lorenz & Lahodinsky 2013) nach (Piskač 2003)

Anforderungen	Indikator	Limit (Kriterium)	
1.	a)	Magmatite und Metamorphite: Für das Tiefenlager muss auf 600-800 m unter der Oberfläche die Existenz eines quasihomogenen Blocks in einer subhorizontalen Ebene von min. 1,5 x 2,0 km (für das einstöckige Lager) vorhanden sein. Bei Sedimentgesteinen und Sedimenten muss eine minimal 100 m mächtige homogene Schicht günstiger Eigenschaften des Wirtsgesteins auf einer Tiefe von min. 100 m bis max. 600 m vorliegen. Ihr Umfang auf der subhorizontalen Schicht beträgt 1,5 x 2 km.	
	b)	Die morphologischen Verhältnisse des potenziellen Standorts müssen eine Erreichbarkeit während Bau und Betrieb und Platz für das Oberflächenareal auf einer Fläche von 10 – 30 ha ermöglichen. Es müssen Erdbeben und Felsstürze ausgeschlossen werden können. Weiter muss die SUJB-Verordnung Nr. 215/1997 Slg., §5, lit. i) eingehalten werden.	
2.	a)	Archivdaten und Analogien müssen einfache Struktur des Aufbaus des potenziellen Standorts aufzeigen.	
	b)	Existierende petrographische Beschreibungen müssen die Feststellung einer petrographischen Homogenität zulassen, wobei eine monotype Zusammensetzung keine Bedingung ist. Bedingung ist eine große Übereinstimmung der physikalischen Eigenschaften.	
	c)	Im Gebiet des potenziellen Standorts dürfen keine weiträumigen hydrothermalen oder andere das Gestein degradierende Umwandlungen vorliegen, das Vorkommen von Adern, Schichten oder Linsen verschiedener Gesteine muss minimal sein.	
	d)	Existierende Kenntnisse und Analogien erlauben es, auf eine geringe tektonische Störung und Zerklüftung zu schließen.	
	e)	Im Raum des potenziellen Standorts (engerer Standort gemäß Verordnung 215/1997 Slg.) darf keine bekannte Lagerstätte sein, deren Abbau die isolierenden und übrigen Eigenschaften der natürlichen Barrieren stören könnte. Es dürfen auch keine reichen Akkumulationen an nicht nachwachsenden Rohstoffen vorliegen, bei denen anzunehmen ist, dass sie in Zukunft abgebaut werden könnten. Einhaltung der Ausschließungskriterien der Verordnung 215/1997 Slg., § 4, lit. n)o).	
3.	a)	Die verfügbare Information muss eine Schlussfolgerung über Art und Umfang der neotektonischen Aktivierung und rezente Stabilität des Standorts und dessen Umgebung zulassen, in einem Zeitintervall von mindestens 500 000 Jahren.	
	b)	Studien über die seismotektonische Gefährdung des Standorts müssen eine Einhaltung der Kriterien der Verordnung 215/1997 Slg., §4, lit. e)9, §5 lit.c) nachweisen.	
4.	a)b)c)	Die vorliegenden Daten müssen die vorläufige Bewertung ermöglichen, wonach die Indikatoren mit der höchsten Wahrscheinlichkeit nach Gewinnung der relevanten Daten erfüllt werden.	
5.	a)b)	Aus den existierenden Daten und Analogien muss es möglich sein eine reale Annahme über geringe Durchlässigkeit, geringe Strömungsgeschwindigkeit und in Folge hohes Alter des Grundwassers im Gesteinsmassiv des Standorts und dessen naher Umgebung abzuleiten. Durchlässigkeitskoeffizient $k < 10^{-9}$.	
		Die Unterlagen des AKEND 2001 der BRD gingen von folgenden Eigenschaften aus:	
		Durchlässigkeitskoeffizient	Hydraulischer Gradient
		10 ⁻¹² m/s	0,05 m/m
10 ⁻¹¹ m/s	0,005 m/m		
6.	a)b)c)d)e)	Existierende Information bzw. Analogien dürfen die Annahme nicht ausschließen, dass in der Tiefe des Endlagers günstige hydrochemische Bedingungen vorherrschen.	

- Anhang 3 -

Anforderungen	Indikator	Limit (Kriterium)
7.	a)	Allgemein gilt die Annahme, dass Gesteine mit Anteilen der Hydroxide Mn, Fe, Al oder deren Oxide gute absorbierende Eigenschaften aufweisen.
8.	a)	Zum Schutz der Integrität und Funktionalität der Felsbereiche in mit Wasser gesättigten Zonen übersteigt der entstehende Druck 20% des hydrostatischen Drucks im Endlager nicht.
9.	a)	Theoretische Annahmen stützen eine positive Bewertung.

Im Projekt Geobariéra sollten zwischen 2003 und 2006 (Woller 2006) an den sechs potenziellen, in Etappe 2 festgelegten Standortgebieten (ausschließlich in granitischen Formationen) weitere oberflächliche bzw. oberflächennahe geologische Erkundungen durchgeführt werden. Diese sollten der weitergehenden Bewertung der Standortgebiete dienen. Im Rahmen des Projektes sollte im ersten Schritt ein GIS-System aufgebaut werden zur Zusammenführung verschiedener Daten- und Informationstypen. In einem zweiten Schritt sollten Recherchen vorhandener Informationen, die Auswertung von Luft- und Satellitenbildern sowie flugzeuggestützte geophysikalische Messungen Informationen zur Homogenität der Kristallinformationen in den Standortgebieten liefern. Auch sollten Aussagen zu potenziellen Interessenkonflikten aktualisiert werden. In einem dritten Schritt war die Erstellung vorläufiger Machbarkeitsstudien geplant.

In (Woller 2006) finden sich Beschreibungen geowissenschaftlicher Kriterien, anhand derer eine Bewertung der ausgewählten Standortgebiete erfolgte. Die geowissenschaftlichen Kriterien beschrieben, wie schon in Etappe 2, die tektonische Stabilität (über die Distanz zu Störungen), Homogenität/Alteration des Gesteinskörpers (Abwesenheit von Xenolithen, Ganggesteinen, Lagerstätten, geodynamische Aktivität, hydrogeologische Verhältnisse und günstige Gesteinskonfiguration hinsichtlich geologischer Untersuchungen). Weitere Kriterien wurden bezüglich der Infrastruktur und der Sozioökonomie abgeleitet.

Die Bewertung erfolgte z.T. wiederum durch Expert Judgement unter Verwendung vorhandener Daten (Wertungskategorien günstig, bedingt günstig, ungünstig, ohne Angaben zu Limits). Für neu aufgenommene Daten zur Tektonik und geophysikalische Daten wurden dagegen konkrete Limits der drei Wertungskategorien angegeben. Des Weiteren wurden die einzelnen Kriterien gewichtet.

Zwischen 2004 und 2009 führte die weiterhin ablehnende Haltung der Öffentlichkeit gegenüber der Standortsuche zum Moratorium. SÚRAO wertete während dieser Phase das Projekt Geobariéra aus, veröffentlichte weitere Unterlagen zur Standortsuche und setzte auf eine verstärkte Kommunikation mit der Öffentlichkeit.

2009 erfolgte die Fortsetzung der Standortsuche. Neben den im Projekt Geobariéra favorisierten sechs Standortgebieten wurden zwei weitere Gebiete betrachtet (die ehemalige Uranmine Kraví Hora und der Truppenübungsplatz Boletice), wobei sich Boletice als

geologisch ungeeignet herausstellte. In 2015 wurde schließlich durch das tschechische Umweltministerium MŽP die Genehmigungen erteilt, oberflächenbasierte Erkundungsarbeiten und anschließende Tiefbohrungen zur Ermittlung der Ausdehnung potenziell geeigneter geologischer Strukturen in den sieben ausgewählten Standortgebieten durchzuführen. Die von SÚRAO beantragten und zeitlich bis 2016 befristeten Genehmigungen wurden durch das Umweltministerium aufgrund von Formfehlern bei der Antragsstellung nicht verlängert, die bis Ende 2016 durchgeführten Arbeiten bestanden aus Forschung, Monitoring, Probennahme, Geländeerkundung und der Entwicklung geowissenschaftlicher Modelle. In den meisten der betroffenen Gemeinden gab es zudem keine Zustimmung bzgl. der Arbeiten und es kam zu weiteren Verzögerungen bei der Standortsuche durch die abgelehnten Genehmigungsverlängerungen (Alt 2017). Zwei weitere potenzielle Standortgebiete wurden 2015 mit in den Auswahlprozess aufgenommen. Betrachtet werden nun auch die Gebiete in unmittelbarer Nachbarschaft der Kernkraftwerke Dukovany und Temelín. SÚRAO argumentiert mit einem hohen Kenntnisstand bezüglich der Geologie der Standorte, der durch den Bau der Kraftwerke gegeben ist und mit einer gegebenen Akzeptanz der dort ansässigen Bevölkerung in Bezug auf nukleare Entsorgungsprojekte. In Kraftwerksnähe wurden die Standortgebiete Janoch und Na Skalním als weitere Untersuchungsgebiete ausgewiesen.

Nach Angaben SÚRAOs wurden zwischen 2017 und 2018 Standortgebietsuntersuchungen durchgeführt und Machbarkeitsstudien für neun potenzielle Standortgebiete (Březový potok, Čertovka, Čihadlo, Horka, Hrádek, Magdaléna und Kraví hora) erstellt (<https://www.surao.cz/en/experts/dgr-design/>). Die Untersuchungen dürften sich jedoch auf die weitere Auswertung oberflächennaher Daten beschränkt haben (Alt 2017). Bis 2025 soll die Wahl eines Standortes abgeschlossen sein (SÚRAO 2017a).

2.6 Großbritannien

In Großbritannien hat die mit der aktuellen Standortsuche beauftragte RWM (Radioactive Waste Management) im Zuge der Suche nach einem geeigneten Standort für ein geologisches Tiefenlager (Geological Disposal Facility/GDF) einen landesweiten geologischen Screening-Prozess durchgeführt (RWM 2018). Im Rahmen dessen sollte die regionale Verbreitung potenzieller Wirtsgesteinsformationen im Kristallingestein, im Tongestein und im Salzgestein in England, Wales und Nordirland aufgezeigt werden. Grundlage des Screening bildeten die vorhandenen geologischen und geowissenschaftlichen Daten des British Geological Survey (BGS), die im Hinblick auf fünf langzeitsicherheitsrelevante geologische Attribute ausgewertet und klassifiziert wurden. Diese Attribute sind als Ausschluss- bzw. Mindestanforderungen zu betrachten (RWM 2016):

- Anhang 3 -

- Gesteinstypen: Verteilung der potenziellen Wirtsgesteine Kristallingestein, Tongestein, Salz in Teufen zwischen 200 m und 1000 m,
- Strukturgeologie: Lokalisierung von Hauptstörungen und Faltungsgebieten,
- Grundwasser: Identifizierung von flachen und tiefen Grundwasserleitern sowie hydrogeologischen und hydrochemischen Eigenschaften der Gesteinstypen,
- natürliche Prozesse: Erdbebenaktivität und Vereisungen,
- Ressourcen: Ausweisung bergbaulich genutzter Regionen, Gebiete mit hoher Anzahl an Tiefbohrungen, Gebiete, die aktuell oder zukünftig hohes Potenzial zur Exploration und zum Abbau von Rohstoffen bieten.

Ergebnis der Analysen sind zum jetzigen Zeitpunkt Karten für 13 Regionen Englands, auf denen die o.g. Attribute dargestellt sind. Ein Abwägungsprozess zwischen Gebieten hat zum jetzigen Stand noch nicht stattgefunden.

2.7 USA

In den USA wurde der Yucca Mountain Komplex in Nevada als Standort für ein HAW-Endlager untersucht (Costin 1997). Als Wirtsgestein dient Tuff. Ursprünglich war ein Vergleich zwischen drei Standortalternativen (Yucca Mountain/Vulkanischer Tuff, Deaf Smith, Texas/flachlagerndes Salzgestein und Hanford, Washington/Basalt) auf Grundlage der Standortauswahlrichtlinien des Energieministeriums der Vereinigten Staaten/Department of Energy (DOE) (DOE 1984) vorgesehen, der zum bestgeeignetsten Standort führen sollte (Hansen & Leigh 2011). Jedoch wurde der Standortvergleich 1987 durch den amerikanischen Kongress vorzeitig mit der Entscheidung zugunsten Yucca Mountain beendet (GRS 2001, Costin 1997). Ein Abwägungsprozess erfolgte somit nicht. Laut DOE erfüllte Yucca Mountain sowohl die technischen als auch die sicherheitlichen Anforderungen an ein Endlager (USNRC 2010a, 2010b). Dem 2008 gestellten Antrag auf Bau eines Endlagers wurde bis heute nicht stattgegeben. Im Jahr 2011 wurde die Finanzierung für das Projekt Yucca Mountain ausgesetzt. Die in den Haushaltsplänen 2017 und 2018 beantragten Mittel zur Wiederaufnahme der Prüfungen zur Genehmigung wurden durch den Kongress nicht bereitgestellt (GAO 2020).

Im Jahre 1999 wurde in einem Salzstock des Delaware-Beckens in New Mexico die WIPP (Waste Isolation Pilot Plant), das erste geologische Endlager ausschließlich für transurane Abfälle aus der Kernwaffenproduktion, in Betrieb genommen. Der Wahl des Standortes ging die Suche auf Grundlage geowissenschaftlicher Kriterien und ein Vergleich mehrerer Standorte im Salz (in Kansas, Oklahoma, West Texas) voraus (GRS 2001, DOE

- Anhang 3 -

1978, Lappin 1988, Mora 1999). Im Jahre 1974 wurde durch das DOE die Salzformation im SE New Mexicos festgelegt. Eine Publikation zu den Entscheidungsgründen für die Standortauswahl erfolgte aufgrund des militärischen Charakters des Endlagers nicht, auch gab es keine Anweisungen für den Ablauf des Standortauswahlverfahrens oder Anweisungen zum Vergleich potenzieller Standorte.

2.8 China

In China startete 1985 die Suche nach einem geeigneten Standort zur Lagerung hochradioaktiven Atommülls, 2016 erfolgte die Festlegung eines Standortes für ein Untertagelabor (URL) im Wirtsgestein Kristallingestein (Granit). Hierbei handelt es sich um ein sogenanntes „area specific URL“, d.h. der Standort des URL wird in einem Standortgebiet liegen, das für die Platzierung eines zukünftigen Endlagers in Betracht kommt und entsprechend vergleichbare standortspezifische Gegebenheiten aufweisen soll wie der zukünftige Endlagerstandort. Der Wahl des Standortes Xinchang in der Region Beishan (Provinz Gansu, im Nordwesten Chinas) ging ein mehrstufiger Auswahlprozess unter Anwendung von Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen voraus. Im ersten Schritt wurden zwischen 1985 und 1986 durch den landesweiten Screening-Prozess sechs potenzielle Regionen selektiert. Das im Anschluss erfolgende regionale (1986 bis 1989) und standortbezogene Screening (1990 bis heute) lieferte 21 potenzielle Standortgebiete in den zuvor ausgewählten Regionen bzw. neun potenzielle Standorte, die für die Errichtung eines HAW-Standortes in Frage kämen. Neben geologischen, hydrogeologischen und geophysikalischen sowie auf Oberflächenkartierungen basierenden Untersuchungen wurden Tiefbohrungen zur Charakterisierung der neun potenziellen Standorte durchgeführt. Zwischen diesen Standorten, die sowohl die Ausschlusskriterien als auch die Mindestanforderungen erfüllten, wurde anhand verschiedener Kriterien abgewägt. Abschließend erfolgte im Rahmen zweier Review Meetings (Expert Judgement) des BRIUG (Beijing Research Institute of Uranium Geology) und der CAEA (China Atomic Energy Authority als Aufsichtsbehörde) die Wahl des Standortes Xinchang (Wang 2018).

In den Mindestanforderungen, Ausschluss- und Abwägungskriterien sollten u. a. sowohl geologische, hydrogeologische und geochemische Bedingungen eines potenziellen Standortes als auch infrastrukturelle Bedingungen betrachtet werden. Des Weiteren sollten raumplanerische Aspekte (Landnutzung bzw. Ressourcen) als auch sozioökonomische Aspekte Beachtung finden. In der vorliegenden Literatur werden nur die verschiedenen

Abwägungskriterien genannt. Ein Abwägungsprozess zwischen den neun potenziellen Standorten wird jedoch nicht explizit erläutert (Wang 2018).

Als allgemeine Anforderungen an den Standort des URL werden genannt:

- Platzierung des URL im Gebiet, das als bevorzugtes Standortgebiet für ein späteres HLW-Endlager in Frage kommt (Wirtsgestein Granit, Tiefe des URL etwa 500 m, identisch mit der geplanten Endlagertiefe),
- URL soll Möglichkeiten zu verschiedenen In-situ-Tests sowie Erweiterungspotenzial bieten,
- Betrieb des URL soll von lokalen Behörden und der Bevölkerung akzeptiert werden und Möglichkeiten zur internationalen Zusammenarbeit sowie zur Forschung und Entwicklung im Bereich der Endlagerung im Granit bieten,
- Errichtung des URL soll unter Beachtung der nationalen Gesetzgebung und Vorgaben bzgl. Bau und Umwelt erfolgen.

Folgende Ausschlusskriterien für den Standort des URL werden genannt:

- Neotektonische Prozesse, seismische Aktivität, Vulkanismus, Faltung und Diapirismus und andere geologische Prozesse „in nicht akzeptablem Ausmaß“,
- u. a. Gebiete im Bereich hoher Meeresspiegelschwankungen, hohe Erosions- und Subsidenzraten, wechselnder Oberflächenwasser- und Grundwasserstände,
- rohstoffreiche Gebiete (Mineralische Rohstoffe, Öl- und Gasvorkommen, Wasser)
- bergbaulich erschlossene Gebiete,
- existierende oder zukünftige Überschwemmungsgebiete,
- Schutzgebiete,
- Akzeptanz der Öffentlichkeit.

Abwägung bzw. Vergleich der neun potenziellen Standorte über:

- Geologische Verhältnisse (Wirtsgestein Granit, Volumen, Teufe),
- zukünftige natürliche Entwicklungen,
- hydrogeologische Bedingungen (geringe Permeabilität, langsame Grundwasserneubildung, lange Fließpfade, günstige geochemische Verhältnisse),

- Anhang 3 -

- konstruktions- und ingenieurgeologische Bedingungen (Topographie, felsmechanische Eigenschaften),
- menschliche Aktivitäten (Ressourcen),
- Landnutzung,
- Umweltschutz,
- infrastrukturelle und Transportbedingungen,
- sozioökonomische Bedingungen.

2.9 Russland

In Russland ist der Bau eines UntertageLABors innerhalb des Standortgebietes Yeniseysky in Planung. Der Standort befindet sich in der Nizhnekansky Granitoid-Formation östlich von Krasnoyarsk/Südsibirien. Das URL kann zum späteren Zeitpunkt in ein zukünftiges HAW-Endlager integriert werden.

Yeniseysky wurde 2003 als bevorzugter Standort aus fünf potenziellen Standortgebieten ausgewählt, die alle innerhalb der Nizhnekansky Granitoid-Formation platziert waren (BGR 2007; GRS et al. 2014). Forschungsprojekte unter deutscher Beteiligung seitens der BGR, GRS und der DBE Technology GmbH (BGE Tec) trugen zur Charakterisierung der Standorte bzw. Standortgebiete bei. Ob und inwiefern eine Abwägung zwischen den potenziellen Standorten bzw. Standortgebieten anhand geowissenschaftlicher Abwägungskriterien zur letztlichen Wahl des Standortes Yeniseysky eingesetzt wurden, konnte nicht recherchiert werden.