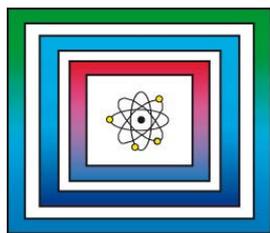


Standortauswahl

9S2019090000

Zusammenstellung von
Erkundungszielen für die
übertägige Erkundung gemäß
§16 StandAG



Zwischenbericht

Hannover und Berlin, April 2020

BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND
ROHSTOFFE HANNOVER

DIENSTBEREICH HANNOVER UND BERLIN

Standortauswahl

Zusammenstellung und Bewertung von geowissenschaftlichen
Methoden und Programmen für die übertägige Standorterkundung
(GeoMePS)

Zusammenstellung von Erkundungszielen für die übertägige
Erkundung gemäß §16 StandAG

Zwischenbericht

Autoren:

Kneuker, Tilo; Bartels, Alexander, Dr.; Bebiolka, Anke; Beilecke, Thies, Dr.; Bense, Frithjof, Dr.; Beushausen, Matthias; Frenzel, Britta; Jähne-Klingberg, Fabian; Lang, Jörg, Dr.; Lippmann-Pipke, Johanna, Dr.; May, Franz, Dr.; Mertineit, Michael; Noack, Vera, Dr.; Pollok, Lukas; Reinhold, Klaus; Rummel, Lisa, Dr.; Schubarth-Engelschall, Nicole; Schumacher, Sandra, Dr.; Stück, Heidrun, Dr.; Weber, Jan Richard, Dr.-Ing.

Auftraggeber:	Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE)
Auftragsnummer:	9S2019090000
Datum:	17.04.2020
Geschäftszeichen:	B3.2/B50161-17/2020-0001/001
Gesamtblattzahl:	78

Im Auftrag:

gez. G. Enste

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

Inhaltsverzeichnis	Seite
Verkürzte Zusammenfassung	5
1 Einleitung	6
2 Erkundungsziele zur Anwendung der Ausschlusskriterien gemäß § 22 StandAG	11
2.1 Großräumige Vertikalbewegungen (AK-1)	11
2.2 Aktive Störungszonen (AK-2)	13
2.3 Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit (AK-3)	15
2.4 Seismische Aktivität (AK-4)	16
2.5 Vulkanische Aktivität (AK-5)	17
2.6 Grundwasseralter (AK-6)	18
3 Erkundungsziele zur Anwendung der Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG	20
3.1 Gebirgsdurchlässigkeit (MA-1)	20
3.2 Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (MA-2)	21
3.3 Minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (MA-3)	22
3.4 Fläche des Endlagers (MA-4)	23
3.5 Erhalt der Barrierewirkung (MA-5)	24
4 Erkundungsziele zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungs- kriterien gemäß § 24 StandAG	26
4.1 Transport radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen im ein- schlusswirksamen Gebirgsbereich (AwK-1)	26
4.1.1 Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers (AwK-1.1a)	27
4.1.2 Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit des Gesteinstyps (AwK-1.2a)	28
4.1.3 Charakteristischer effektiver Diffusionskoeffizient des Gesteinstyps (AwK-1.3a)	29
4.1.4 Diffusionsgeschwindigkeit bei Tonstein (AwK-1.4)	30
4.1.4.1 Absolute Porosität von Tonstein (AwK-1.4a)	30
4.1.4.2 Verfestigungsgrad von Tonstein (AwK-1.4b)	30
4.2 Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper (AwK-2)	31
4.2.1 Barrierenmächtigkeit (AwK-2.1a)	31
4.2.2 Grad der Umschließung des Einlagerungsbereichs durch einen ein- schlusswirksamen Gebirgsbereich (AwK-2.1b)	32
4.2.3 Teufe der oberen Begrenzung des erforderlichen ewG (AwK-2.2a)	33
4.2.4 Flächenhafte Ausdehnung bei gegebener Mächtigkeit (Vielfaches des Mindestflächenbedarfs) (AwK-2.3a)	34
4.2.5 Potenzialbringer bei Tonstein (AwK-2.4)	35

	Seite
4.3 Räumliche Charakterisierbarkeit (AwK-3)	36
4.3.1 Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich (AwK-3.1a)	37
4.3.2 Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften (AwK-3.1b)	40
4.3.3 Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit (AwK- 3.1c)	41
4.3.4 Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies) (AwK-3.2a)	41
4.4 Langfristige Stabilität der günstigen Verhältnisse (AwK-4)	42
4.4.1 Zeitspanne, über die sich die Mächtigkeit des ewG nicht wesentlich verändert hat (AwK-4.1a)	44
4.4.2 Zeitspanne, über die sich die flächenhafte bzw. räumliche Ausdehnung des ewG nicht wesentlich geändert hat (AwK-4.1b)	45
4.4.3 Zeitspanne, über die sich die Gebirgsdurchlässigkeit des ewG nicht wesentlich verändert hat (AwK-4.1c)	46
4.5 Günstige gebirgsmechanische Eigenschaften (AwK-5)	47
4.6 Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten (AwK-6)	49
4.6.1 Veränderbarkeit der vorhandenen Gebirgsdurchlässigkeit (AwK-6.1)	50
4.6.1.1 Verhältnis Gebirgsdurchlässigkeit zu Gesteinsdurchlässigkeit (AwK-6.1a) ...	50
4.6.1.2 Erfahrungen über die Barrierewirksamkeit der Gebirgsformation (AwK-6.1b)	51
4.6.1.3 Duktilität des Gesteins (AwK-6.1c)	52
4.6.2 Rückbildbarkeit von Rissen (AwK-6.2)	53
4.6.2.1 Rückbildung der Sekundärpermeabilität durch Risssschließung (AwK-6.2a) ...	53
4.6.2.2 Rückbildung der mechanischen Eigenschaften durch Rissverheilung (AwK-6.2b)	54
4.6.3 Zusammenfassende Beurteilung der Neigung zur Bildung von Fluid- wegsamkeiten (AwK-6.3)	54
4.7 Gasbildung (AwK-7)	55
4.8 Temperaturverträglichkeit (AwK-8)	56
4.9 Rückhaltevermögen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich (AwK-9)	60
4.10 Hydrochemische Verhältnisse (AwK-10)	62
4.11 Schutz des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durch das Deckgebirge (AwK-11)	64
4.11.1 Überdeckung des ewG mit grundwasserhemmenden Gesteinen (AwK-11.1a)	65

Seite

4.11.2	Verbreitung und Mächtigkeit erosionshemmender Gesteine im Deckgebirge des ewG (AwK-11.1b)	66
4.11.3	Strukturelle Komplikationen im Deckgebirge (AwK-11.1c)	67
5	Erkundungsziele zur Durchführung vorläufiger Sicherheitsuntersuchungen gemäß § 16 Abs. 1 und § 18 Abs. 1 StandAG	68
6	Zusammenfassung	70
	Literaturverzeichnis	71
	Abkürzungsverzeichnis	76
	Tabellenverzeichnis	77
	Abbildungsverzeichnis	78

Verkürzte Zusammenfassung

Autoren:

Kneuker, Tilo; Bartels, Alexander, Dr.; Bebiolka, Anke; Beilecke, Thies, Dr.; Bense, Frithjof, Dr.; Beushausen, Matthias; Frenzel, Britta; Jähne-Klingberg, Fabian; Lang, Jörg, Dr.; Lippmann-Pipke, Johanna, Dr.; May, Franz, Dr.; Mertineit, Michael; Noack, Vera, Dr.; Pollok, Lukas; Reinhold, Klaus; Rummel, Lisa, Dr.; Schubarth-Engelschall, Nicole; Schumacher, Sandra, Dr.; Stück, Heidrun, Dr.; Weber, Jan Richard, Dr.-Ing.

Titel: Zusammenstellung von Erkundungszielen für die übertägige Erkundung gemäß §16 StandAG

Schlagwörter: Ausschlusskriterien, Erkundungsziele, geowissenschaftliche Abwägungskriterien, übertägige Erkundung, Mindestanforderungen, StandAG

Als Vorhabenträgerin hat die Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE) gemäß des 2017 evaluierten Standortauswahlverfahrens (Standortauswahlgesetz – StandAG) für ein Tiefenendlager für hoch radioaktive Abfälle in Deutschland die Aufgabe, Teilgebiete nach § 13 Abs. 1 zu ermittelten, die günstige geologische Voraussetzungen für die sichere Endlagerung erwarten lassen. Aus diesen Teilgebieten sind im Anschluss Standortregionen für die übertägige Erkundung auszuweisen und Erkundungsprogramme zu entwickeln (§ 14).

In diesem Kontext hat die BGE die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) beauftragt, den aktuellen Stand der Technik zu den übertägig und in Bohrungen einsetzbaren geowissenschaftlichen und geophysikalischen Untersuchungsmethoden zu erarbeiten. Dies soll in den beiden Arbeitspaketen GeoMePS und ZuBeMERk, basierend auf einer Auswertung von Literatur und Erfahrungen in Standorterkundungsprogrammen, erfolgen. Für eine zielgerichtete Auswahl der einzusetzenden Methoden geht dem eine Zusammenstellung von Erkundungszielen voraus.

Der vorliegende Bericht stellt die Erkundungsziele für die übertägige Erkundung gemäß § 16 StandAG zusammen. Dabei werden sogenannte direkte Erkundungsziele vollständig aus den im StandAG definierten Kriterien und Anforderungen (Ausschlusskriterien (§ 22), Mindestanforderungen (§ 23) und geowissenschaftlichen Abwägungskriterien (§ 24)) abgeleitet. Weitere, sogenannte ergänzende Erkundungsziele ergeben sich auf der Grundlage von Erfahrungen in geowissenschaftlichen Erkundungsprogrammen in Endlagerprojekten sowie aus absehbaren Anforderungen an die repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß StandAG.

Somit liefert der vorliegende Bericht die Grundlage für die sich anschließende Zusammenstellung der geophysikalischen und geowissenschaftlichen Methoden für die übertägige Erkundung in Form einer recherchierbaren Datenbank sowie darauf aufbauende Empfehlungen für zukünftige Erkundungsprogramme.

1 Einleitung

Das Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hoch radioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz - StandAG) legt die Vorgehensweise fest, mit der ein Standort für die Endlagerung von hoch radioaktiven Abfällen zu ermitteln ist (StandAG 2017). In der ersten Phase des Auswahlverfahrens werden aus Teilgebieten Standortregionen ermittelt, die in der zweiten Phase des Verfahrens übertägig erkundet werden (Abb. 1).

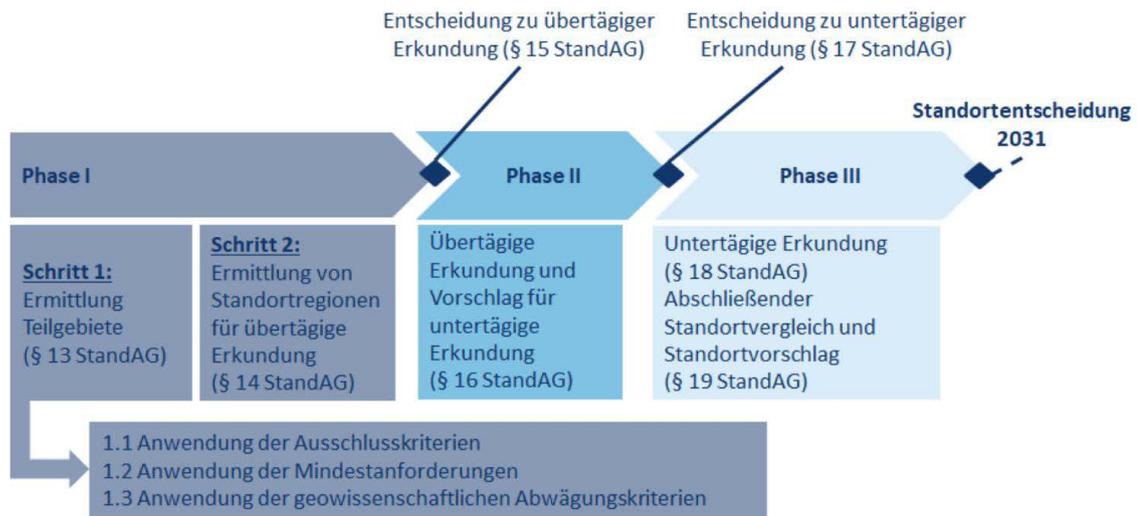


Abb. 1: Schematische Darstellung vom Ablauf des Standortauswahlverfahrens (BGE 2019)

Nach § 14 Abs. 1 StandAG sind für die Standortregionen standortbezogene übertägige Erkundungsprogramme zu entwickeln, und zwar nach Maßgabe sowohl der Anforderungen und Kriterien nach den §§ 22 bis 24, als auch für die Durchführung der weiterentwickelten vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen nach § 16 Abs. 1. Durch diese übertägige Erkundung soll gemäß § 16 Abs. 2 StandAG die Grundlage geschaffen werden, um unter „Anwendung der Anforderungen und Kriterien nach den §§ 22 bis 24 günstige Standorte“ zu ermitteln. Außerdem bilden die Ergebnisse der übertägigen Erkundung gemäß § 16 Abs. 1 StandAG die Basis für weiterentwickelte vorläufige Sicherheitsuntersuchungen.

In diesem Zusammenhang hat die BGE als Vorhabenträgerin die BGR mit der Zusammenstellung von übertägig und in Bohrungen einsetzbaren geowissenschaftlichen und geophysikalischen Untersuchungsmethoden und daraus abgeleiteten Empfehlungen für zukünftige Erkundungsprogramme beauftragt. Dies erfolgt in zwei von der BGE übertragenen Arbeitspaketen:

- GeoMePS: „Zusammenstellung und Bewertung von geowissenschaftlichen Methoden und Programmen für die übertägige Standorterkundung“ (Gz.: B3.5/B50161-17/2019-0001/006) und
- ZuBeMERK: „Zusammenstellung und Bewertung von geophysikalischen Methoden zur über- und untertägigen Erkundung“ (Gz.: B3.5/B50161-16/2019-0004/006).

In diesem Bericht werden die Erkundungsziele, die maßgebend bei der übertägigen Erkundung sind, identifiziert und dargelegt. Dabei sind Bandbreiten bzw. „Ausprägungen“ der jeweiligen Eigenschaften zu ermitteln, die für eine Anwendung der Ausschlusskriterien gemäß § 22 StandAG, der Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG und der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG in den zu erkundenden Standortregionen notwendig sind (Abb. 2). Es kann zu einer Nennung von gleichen Erkundungszielen unter verschiedenen Kriterien/Anforderungen kommen. Des Weiteren müssen diejenigen Sachverhalte, die für die Durchführung von weiterentwickelten vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen notwendig sind, bekannt sein (Abb. 2).

Da die Kriterien, Anforderungen und vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen über das gesamte Verfahren hinweg der Ermittlung und Eingrenzung von potenziell geeigneten Gebieten, Standortregionen und Standorten dienen, sind die daraus abgeleiteten Erkundungsziele nicht auf die übertägige Erkundung beschränkt. Sie sind auch für die gemäß § 18 StandAG durchzuführende untertägige Erkundung maßgeblich und ggf. auf Basis der im Laufe des Verfahrens gewonnenen Erkenntnisse, z. B. aus den Befunden der übertägigen Erkundung, der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen und den zu entwickelnden Prüfkriterien auf Vollständigkeit bzw. Zweckmäßigkeit zu überprüfen und ggf. zu ergänzen oder zu spezifizieren. Die in diesem Bericht erarbeiteten Erkundungsziele sind für die Umsetzung der 2. Phase des Auswahlverfahrens relevant und beziehen sich somit hauptsächlich auf die von der Vorhabenträgerin für die übertägige Erkundung vorgeschlagenen Standortregionen. Es wurde nicht berücksichtigt, inwieweit sich bestimmte Erkundungsziele ggf. durch Datenlieferungen und vorliegende Informationen erübrigt haben könnten.

In den Anforderungen und Kriterien nach den §§ 22 bis 24 StandAG wird der jeweilige räumliche Geltungsbereich, für welchen die bewertungsrelevanten Eigenschaften/Indikatoren bewertet werden sollen, genannt. Mehrere der Anforderungen und Kriterien beziehen sich auf den einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG). Dieser kann allerdings erst festgelegt werden, wenn die technische Auslegung des Endlagers unter Berücksichtigung der jeweiligen örtlichen Gegebenheiten vorliegt und das Gesamtsystem des Endlagers im Rahmen von vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen bewertet wurde. Solange dies nicht der Fall ist, wird empfohlen, die entsprechenden Anforderungen und Kriterien stattdessen auf das Barrieregestein bzw. den Einlagerungsbereich anzuwenden. Als Barrieregestein

wird hier diejenige Gesteinsschicht bezeichnet, in der der ewG ausgewiesen werden soll. Diese Vorgehensweise gilt generell und wird in den nachfolgenden Kapiteln nicht wiederholt dargestellt.

Bei der Bewertung von Gebieten muss unterschieden werden zwischen Endlagersystemen mit ewG und solchen, bei denen die Rückhaltung der Radionuklide im Wesentlichen auf technischen oder geotechnischen Barrieren beruht. Für Endlagersysteme ohne ewG sind die Mindestanforderungen und Abwägungskriterien, die sich auf den ewG beziehen, stattdessen auf den Einlagerungsbereich anzuwenden (mit Ausnahme von § 23 Abs. 5 Nr. 1 und des Abwägungskriteriums nach Anlage 2 StandAG).

Wie bereits oben erwähnt, sind zur Ableitung von Erkundungszielen für die übertägige Erkundung zusätzlich diejenigen Sachverhalte relevant, die für die Durchführung von weiterentwickelten vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen bekannt sein müssen. Auf Basis der im StandAG enthaltenen Verordnungsermächtigungen werden derzeit die Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hoch radioaktiver Abfälle beziehungsweise die Anforderungen an die Durchführung von vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen im Standortauswahlverfahren erarbeitet. Diese Verordnungen sollen spätestens zum Zeitpunkt der Durchführung repräsentativer vorläufiger Sicherheitsuntersuchungen nach § 14 Abs. 1 Satz 2 StandAG vorliegen, welche im Anschluss an den Zwischenbericht der BGE zu den Teilgebieten erfolgt (§ 13 Abs. 2 Satz 3 StandAG). Die Ergebnisse der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen liegen somit erst zum Ende der Phase 1 (Abb. 1) des Auswahlverfahrens vor (§ 14).

Da derzeit die genannten Rechtsverordnungen und die darauf aufbauenden weiterentwickelten vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen noch nicht vorliegen¹, können diese Grundlagen nicht genutzt werden, um daraus weitere mögliche Erkundungsziele abzuleiten. Daher finden diese Grundlagen keine systematische Berücksichtigung in der vorliegenden Zusammenstellung der Erkundungsziele.

Weitere Erkundungsziele aus unterschiedlichen Wissenschaftsdisziplinen können sich ggf. im weiteren Verlauf des Verfahrens aus speziellen Fragestellungen und gesetzlich festgelegten Anforderungen ergeben, z. B. aus der Diskussion mit der (Fach-) Öffentlichkeit in Fach-/Regionalkonferenzen, der Ableitung von Prüfkriterien, der Anwendung von planungswissenschaftlichen Abwägungskriterien oder der gesetzlich geforderten Durchführung von Umweltverträglichkeitsstudien und sozio-ökonomischen Potenzialanalysen. Diese weiteren Grundlagen bleiben in der vorliegenden Studie bei der Erkundungszielbestimmung unberücksichtigt.

¹ Mit Stand vom Mai 2020 liegt die vom BMU zu erlassene Endlagersicherheitsanforderungsverordnung (EndlSiAnfV) sowie die Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung (EndlSiUntV) in einer aktuellen Fassung vor. Aufgrund der Aufgabenstellung des Arbeitspaketes sowie der inhaltlich abgeschlossenen Bearbeitung des vorliegenden Berichts blieben die Verordnungen bei der Zielebestimmung unberücksichtigt.

Die hier durchgeführte Ermittlung der Erkundungsziele bezieht sich im Kern auf die im StandAG genannten Anforderungen und Kriterien. Es werden sämtliche Ausschlusskriterien (§ 22), Mindestanforderungen (§ 23) und geowissenschaftlichen Abwägungskriterien (§ 24) betrachtet (Abb. 2), mit dem Ergebnis der vollständigen Ableitung der sogenannten „direkten“ Erkundungsziele für die übertägige standortbezogene Erkundung im jeweils genannten räumlichen Geltungsbereich.

Auf Basis der geowissenschaftlichen Expertise werden weitere „ergänzende“ Erkundungsziele aufgenommen, die aus derzeitiger Sicht aufgrund der gemäß StandAG geforderten repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen und sich daraus ergebenden Anforderungen absehbar sind. Des Weiteren können ergänzende Erkundungsziele aus Anforderungen an Langzeitsicherheitsnachweise und geowissenschaftliche Erkundungsprogramme im Rahmen bisheriger Endlagerprojekte abgeleitet werden (Abb. 2). Die ergänzenden Erkundungsziele erheben, u. a. aufgrund der ausstehenden Vorgaben zur Durchführung von vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen, keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Die ergänzenden Erkundungsziele können sich auf Erkundungsräume beziehen, die über die gesetzlich vorgegebenen räumlichen Geltungsbereiche hinausgehen. Neben den direkten und ergänzenden Erkundungszielen finden sich zudem erläuternde Hinweise auf weitere mögliche Erkundungsziele.

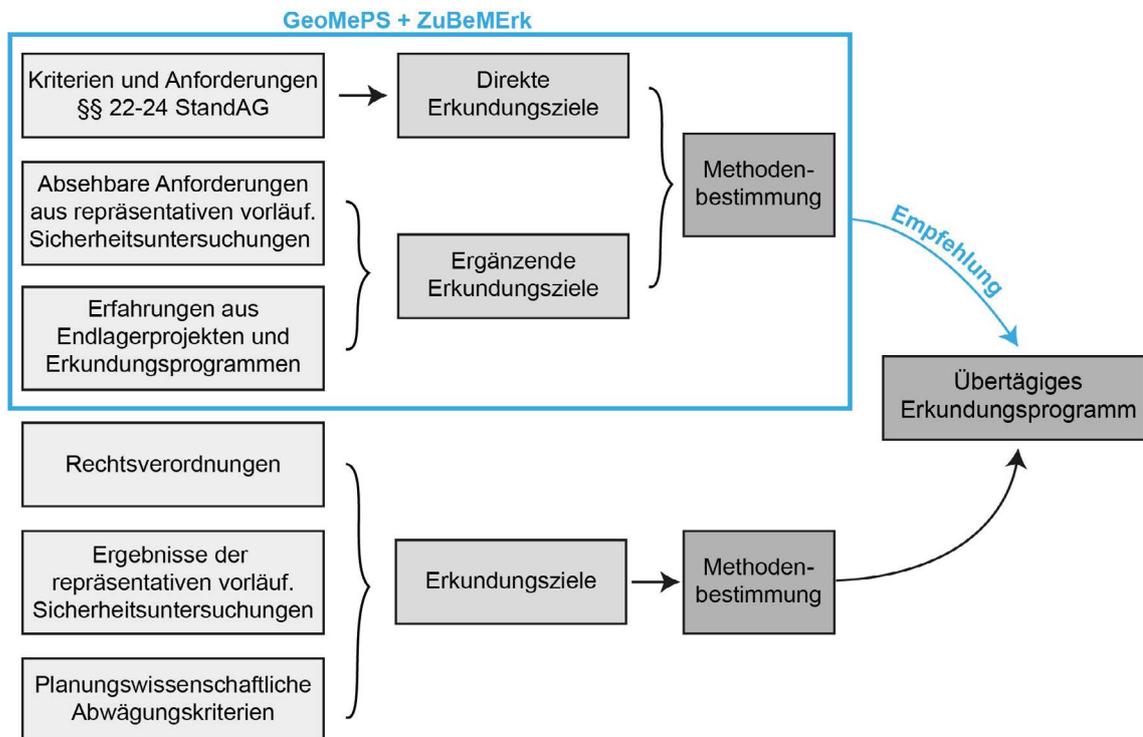


Abb. 2: Grundlagen für die übertägige Erkundung

Die aus den Anforderungen und Kriterien nach den §§ 22 bis 24 StandAG abgeleiteten „direkten“ Erkundungsziele sind vollständig im vorliegenden Bericht abgebildet. Nach Kenntnis der noch zu verabschiedenden, für die Sicherheitsuntersuchungen relevanten Verordnungen werden ggf. weitere Erkundungsziele hinzukommen (Abb. 2). Für die Ableitung der Erkundungsziele und Prüfkriterien für die untertägige Erkundung stellen die mit diesem Bericht vorgelegten Erkundungsziele eine umfassende Grundlage dar, die anhand des sich im Laufe des Verfahrens einstellenden Erkenntniszuwachses auf Vollständigkeit und Zweckmäßigkeit zu überprüfen ist (Abb. 3).

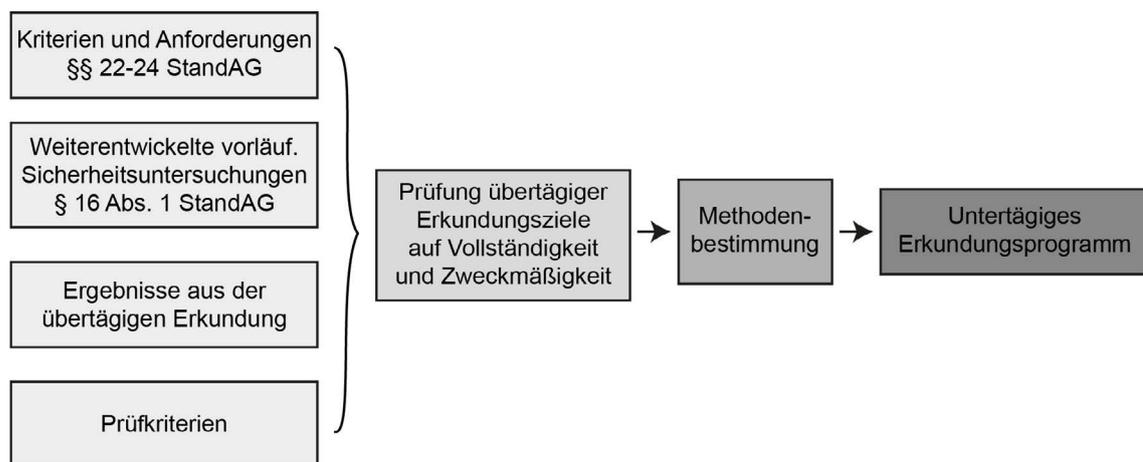


Abb. 3: Grundlagen für die untertägige Erkundung (nicht Gegenstand dieses Berichts)

Mit der Bewertung der gesetzlich vorgegebenen Anforderungen und Kriterien im Rahmen des Auswahlverfahrens nach StandAG soll ein Standort mit der bestmöglichen Sicherheit ermittelt werden. Dabei zielt der sicherheitsgerichtete geowissenschaftliche Vergleich auf die technisch unbeeinflusste geologische Gesamtsituation der jeweiligen, hinsichtlich ihrer Eignung als Endlagerstandort zu bewertenden räumlichen Bereiche. Die Anwendung der Anforderungen und Kriterien erfolgt ausschließlich auf die Eigenschaften der zu bewertenden Geosphäre, ohne Beeinflussung durch oder Wechselwirkung mit einem möglichen Endlager. Denkbare Erkundungsziele, die sich infolge von Störungen des Grundzustands der Geosphäre durch den Bau oder Betrieb eines Endlagers für hoch radioaktive Abfälle ergeben, werden in der vorliegenden Studie nicht betrachtet.

2 Erkundungsziele zur Anwendung der Ausschlusskriterien gemäß § 22 StandAG

In § 22 StandAG werden sechs Ausschlusskriterien genannt, bei deren Vorliegen ein Gebiet nicht als Endlagerstandort geeignet ist. Für die weitere Bearbeitung innerhalb des Vorhabens werden die Ausschlusskriterien entsprechend der Reihenfolge ihrer Nennung in §22 StandAG aufsteigend durchnummeriert (AK-1 bis AK-6), siehe Tab. 1.

Tab. 1: Ausschlusskriterien gemäß § 22 StandAG

Kürzel	Bezeichnung
AK-1	Großräumige Vertikalbewegungen
AK-2	Aktive Störungszonen
AK-3	Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit
AK-4	Seismische Aktivität
AK-5	Vulkanische Aktivität
AK-6	Grundwasseralter

2.1 Großräumige Vertikalbewegungen (AK-1)

Gemäß § 22 Abs. 2 Nr. 1 StandAG ist ein Gebiet als nicht geeignet zu bewerten, wenn für dieses „eine großräumige geogene Hebung von im Mittel mehr als 1 mm pro Jahr über den Nachweiszeitraum von einer Million Jahren zu erwarten“ ist. Folglich ist zu ermitteln, ob in dem zu untersuchenden Gebiet Bedingungen vorliegen, die dazu führen können, dass dieses in den nächsten eine Million Jahren um mehr als 1.000 m gehoben werden kann. Als auf dem StandAG basierende Erkundungsziele sind daher diejenigen Sachverhalte zu ermitteln, auf deren Basis sich die geogen hervorgerufene Hebung während der nächsten eine Million Jahre prognostizieren lässt.

In Jähne-Klingberg et al. (2019) werden Prognosemöglichkeiten von großräumigen Vertikalbewegungen für Deutschland und der dazugehörige Stand von Wissenschaft und Technik diskutiert. Neben anderen Aspekten werden zudem eine Übersicht über vorhandene und erforderliche Daten zur Analyse von großräumigen Hebungen gegeben sowie Möglichkeiten und Grenzen von Datenanalyse und Interpretation aufgezeigt.

Eine verlässliche quantifizierbare flächige Prognose zur Ausweisung des Kriteriums erfordert verschiedene Arten der Modellierung (statisch & dynamisch) auf Basis von Annahmen zu teilweise komplexen geodynamischen und klimatischen Zusammenhängen (Jähne-Klingberg et al. 2019). Mit fehlendem Prozessverständnis sinkt die Aussagekraft

der Zukunftsprognose. Die Prognose entspräche demnach der Unsicherheit im Stand der Forschung. Prognosen mit qualitativem Charakter scheinen mit gewissen Unschärfen möglich, sind jedoch ebenfalls von den getroffenen Modellannahmen abhängig.

Rezente Hebungsraten einer Region lassen sich mittels verschiedener geodätischer Verfahren durch wiederkehrende Messungen der Höhenlage der Geländeoberfläche bestimmen. Aus dieser aktuellen Hebungsrates kann die geogen hervorgerufene Hebung des Gebietes jedoch nur mit erheblichen Ungewissheiten ermittelt werden, da der geogene, häufig stetig wirkende aber meist kleine, Anteil der Hebung zuerst durch Ausschluss anderer Einflüsse (Grundwasseränderung, Vegetations- und Bodenänderungen, anthropogene Einflüsse, Klimaveränderung, exogene Dynamik im Allgemeinen) aus den ermittelten Messreihen gefiltert werden muss und eine Extrapolation über das Vielfache der eigentlichen Dauer der Messreihe mit großen Fehlern behaftet ist. Deshalb ist es erforderlich, dass neben der direkten Messung der aktuellen Hebungsrates zusätzlich weitere Parameter bestimmt werden, die mit der Hebung (bzw. Senkung), Abtragung und Exhumation eines Gebietes über geologische Zeiträume in Bezug stehen und somit zur Korrelation herangezogen werden können. Am zuverlässigsten lassen sich die langfristigen zukünftigen Absenkungs- oder Hebungsrates einer Region auf Basis eines vielseitigen Ansatzes abschätzen, der unter Verwendung von quantitativen und qualitativen Analysen der Hebung (Gesteinshebung und Oberflächenhebung), der Exhumation und Denudation sowie durch Vergleiche zwischen diesen Analyseergebnissen eine Plausibilitätsprüfung ermöglicht.

Für diese Analysen müssen Gebiete über die eigentliche Standortregion hinaus betrachtet werden, um den Einfluss von endogenen Prozessen erfassen zu können. Entsprechende Zusammenhänge werden in Jähne-Klingberg et al. (2019) erläutert. Lang andauernde Senkungsbewegungen lassen sich, aufgrund von stetiger Sedimentation in diesen Gebieten und durch einen besseren Erhalt geologischer Befunde, meist besser ermitteln als die Hebung, da diese über geologische Zeiträume zur verstärkten Abtragung geologischer Belege führen kann.

Methoden und deren Einschränkungen, Prozesse und deren mögliche Auswirkungen, sowie die Möglichkeiten der Prognose von Vertikalbewegungen in Deutschland werden in Jähne-Klingberg et al. (2019) im Detail diskutiert. Daraus lassen sich zusammenfassend folgende Erkundungsziele definieren.

Direkte Erkundungsziele:

- Rate der rezenten Hebung/Senkung an der Oberfläche
- Beträge und Geschwindigkeiten vergangener Hebungen und Senkungen
- Differenzielle Hebung/Senkung

Zudem sind Rückschlüsse auf Zusammenhänge zwischen Hebung und Aktivität von Störungen und der Verteilung und Charakteristik der Seismizität durch den Abgleich mit rezenten und vergangenen Vertikalbewegungsmustern möglich und führen zu ergänzenden Erkundungszielen. Ergänzend können zur Validierung von Ergebnissen zur Geländehebung, Exhumation oder Denudation voneinander unabhängige quantitative/qualitative Analysetechniken durchgeführt werden.

Ergänzende Erkundungsziele:

- Räumliche Lage, Geometrie und Ausdehnung einer Störung/Störungszone sowie von atektonischen bzw. aseismischen Strukturen
- Versatz über die Zeit entlang von Störungen/Störungszonen
- Rezente und paläoseismische Aktivität
- Großräumige Datierung von tertiären & quartären Schichtaltern
- Quantitative Ermittlung der Denudation

Zur Prognose des Einflusses von großräumigen endogenen Prozessen, die Vertikalbewegungen verursachen können (u. a. die Dynamik des oberen Erdmantels) kann es hilfreich sein, geodynamische Modellierungen durchzuführen, die auch Ergebnisse der Exploration des tieferen Gebirgsbaus miteinbeziehen (Jähne-Klingberg et al. 2019).

2.2 Aktive Störungszonen (AK-2)

Gemäß § 22 Abs. 2 Nr. 2 StandAG kommen Gebirgsbereiche nicht als Endlagerbereich in Betracht, wenn darin oder innerhalb eines abdeckenden Sicherheitsabstandes geologisch aktive Störungszonen vorhanden sind, die das Endlagersystem und seine Barrieren beeinflussen können. Unter „aktiven Störungszonen“ werden entsprechend § 22 Abs. 2 Nr. 2 StandAG Brüche in den Gesteinsschichten der oberen Erdkruste mit deutlichem Gesteinsversatz und ausgedehnten Zerrüttungszonen mit tektonischer Entstehung verstanden, an denen nachweislich oder mit großer Wahrscheinlichkeit im Zeitraum Rupel bis heute, also innerhalb der letzten 34 Millionen Jahre, Bewegungen stattgefunden haben. Atektonische beziehungsweise aseismische Vorgänge, die nicht aus tektonischen Abläufen abgeleitet werden können oder nicht auf seismische Aktivitäten zurückzuführen sind und die zu ähnlichen Konsequenzen für die Sicherheit eines Endlagers wie tektonische Störungen führen können, sind nach Gesetzeslage wie diese zu behandeln.

Erforderliche Erkundungsziele zur Anwendung des Ausschlusskriteriums sind, neben der Kenntnis der räumlichen Lage und Ausdehnung einer Störung, die Ermittlung ihres Aktivitätszeitraumes bzw. das Alter der jüngsten Störungsbewegung sowie die Ermittlung der Versatzbeträge (z. B. Stück et al. 2020). Insbesondere letztere Erkundungsziele erfordern eine bestmögliche Kenntnis des strukturellen und stratigraphischen Aufbaus des Untergrundes, da die Ermittlung der Störungsaktivität über eine rezente Bewegung hinaus, wenn möglich durch relative Datierungen anhand der versetzten Gesteinshorizonte erfolgt. Im Hinblick auf atektonische bzw. aseismische Vorgänge gilt es insbesondere, die Tiefe und räumliche Ausdehnung jener Strukturen zu erfassen, um eine potenzielle Beeinflussung der Sicherheit eines Endlagers zu beurteilen. Zu Strukturen atektonischen Ursprungs gehören diagenetische Deformationsstrukturen („soft sediment deformation“/“subsurface sediment mobilization“ (van Rensbergen et al. 2000), u. a. Entwässerungsstrukturen, Sandinjektionen, polygonale Störungssysteme), subaquatische/subaerische Rutschungen, Karst- und Subrosionsstrukturen, Strukturen der Glazitektonik und Kryoturbation sowie Impaktereignisse (Meteoriteneinschläge). Inwieweit Auswirkungen von atektonischen Vorgängen eine sicherheitliche Relevanz für das Endlager haben, ist unter Berücksichtigung ihrer Tiefenwirkung im Rahmen der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen zu bewerten. Daraus ergeben sich ggf. Erkundungsziele.

Angelehnt an § 22 Abs. 2 Nr. 2 StandAG sind atektonische beziehungsweise aseismische Vorgänge hinsichtlich der Erkundungsziele wie aktive Störungszonen zu behandeln und werden nachfolgend nicht gesondert aufgeführt.

Direkte Erkundungsziele:

- Räumliche Lage, Geometrie und Ausdehnung einer Störung/Störungszone
- Versatz entlang einer Störung (ggf. akkumulierter Versatz einer aus mehreren Störungen bestehenden Störungszone)
- Alter der jüngsten Bewegungsphase einer Störungszone (< oder > 34 Ma)
- Rezentes, natürliches Spannungsfeld im Umfeld der Störung

Zur Abschätzung der Wahrscheinlichkeit einer Reaktivierung von Störungen im Rahmen von vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen kann das folgende ergänzende Erkundungsziel relevant sein.

Ergänzendes Erkundungsziel:

- Aktivität der Störung/Störungszone in der Vergangenheit (Ausmaß, Zeitraum, Häufigkeit)

Ergänzend zu den genannten Zielen sei an dieser Stelle auf das Arbeitspaket „Ausschlusskriterien“ (9S2019070000) verwiesen, in dem die BGR im Auftrag der BGE ausgewählte Fragestellungen u. a. bezüglich des Ausschlusskriteriums „Aktive Störungszonen“ bearbeitet hat. Im entsprechenden Abschlussbericht zum Ausschlusskriterium „Aktive Störungszonen“ werden Grundlagen für das thematische Verständnis dieses Ausschlusskriteriums im Zusammenhang mit seiner Anwendung im Auswahlverfahren behandelt (Stück et al. 2020). Insbesondere werden gängige Methoden zur Ermittlung des Zeitraums der Störungsaktivität aufgezeigt und erläutert. Neben der Definition störungsbezogener Begriffe werden zudem eine mögliche Gefährdung des Endlagersystems durch Grundgebirgsstörungen und atektonische Vorgänge erörtert, Charakteristika von Störungen im Steinsalz dargelegt und Möglichkeiten aufgezeigt, den erforderlichen Sicherheitsabstand eines Endlagers zu Störungszonen zu charakterisieren. Die Ausführungen im Bericht zum Ausschlusskriterium „Aktive Störungszonen“ sind ergänzend zu den hier behandelten Aspekten zu sehen.

2.3 *Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit (AK-3)*

Gemäß § 22 Abs. 2 Nr. 3 StandAG darf das Gebirge durch bergbauliche Tätigkeit nicht so geschädigt sein, dass daraus negative Einflüsse auf den Spannungszustand und die Permeabilität des Gebirges im Bereich eines vorgesehenen Endlagerbereichs zu besorgen sind. Zudem dürfen vorhandene Bohrungen die Barrieren eines Endlagers in ihrer Einschlussfunktion nicht beeinträchtigen.

Aus diesem Ausschlusskriterium leitet sich ein direktes Erkundungsziel nur ab, wenn in der betrachteten Region Bergbau stattgefunden hat oder Bohrungen vorhanden sind. Aufschluss darüber wird durch Informationen aus den Unterlagen der zuständigen Bergbehörden erlangt. Der Einfluss aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Aktivität ist insbesondere für die Standortregionen zu bewerten, die in der Nähe eines potenziellen Einwirkbereichs bergbaulicher Aktivität liegen. Als ein erster Ansatz kann ein pauschaler Sicherheitspfeiler um die äußeren Grenzen einer Bohrung oder eines Bergwerks gezogen werden, der sich z. B. aus bergtechnischen Erfahrungen und/oder bergrechtlichen Vorgaben ableiten lässt. Ob ein veranschlagter Sicherheitsabstand angemessen ist oder an die jeweilige Situation anzupassen ist, muss ggf. standortspezifisch bewertet werden.

Dies kann z. B. auch erforderlich sein, wenn eine Standortregion betroffen ist, in der keine hinreichenden Informationen darüber vorliegen, inwieweit negative Einflüsse auf den Spannungszustand oder die Permeabilität des Gebirges zu besorgen sind.

Als Grundlage für eine solche Bewertung sind dementsprechend Informationen über die Gebirgsdurchlässigkeit, den Spannungszustand und das Vorhandensein von alten Bohrungen und Hohlräumen, die verfüllt oder unverfüllt vorliegen können, erforderlich.

Direkte Erkundungsziele:

- Identifikation von Bereichen bergbaulicher Tätigkeit inklusive Altbohrungen (verfüllte und unverfüllte Hohlräume)
- Bestimmung von Gebirgsdurchlässigkeiten
- Bestimmung der Spannungsverhältnisse

Mittels numerischer Analysen kann geklärt werden, ob aus den bergbaulichen Tätigkeiten in der Nachbarschaft potenzieller Standortgebiete negative Einflüsse auf den Endlagerbereich resultieren. Entsprechende Modellberechnungen sollten ggf. in den vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen berücksichtigt werden.

2.4 Seismische Aktivität (AK-4)

Gemäß § 22 Abs. 2 Nr. 4 StandAG kommen Gebiete nicht als Endlagerstandort in Betracht, in denen die örtliche seismische Gefährdung größer ist als in Erdbebenzone 1 nach DIN EN 1998-1/NA 2011-01.

Die Zuordnung von Regionen zu Erdbebenzonen ist in entsprechenden Unterlagen von staatlichen geologischen Diensten der Länder oder anderer Institutionen dokumentiert. Daten, die im Rahmen einer Erkundung vor Ort erhoben werden können, gehen in die Zuordnung der Erdbebenzone nicht ein. Deshalb leiten sich aus diesem Ausschlusskriterium keine direkten Erkundungsziele ab.

Direkte Erkundungsziele:

- Keine

Da sich die DIN EN 1998-1/NA 2011-01 zurzeit in Überarbeitung befindet, können sich aus einer aktualisierten Fassung Erkundungsziele ergeben. Es ist denkbar, dass durch Erkenntnisse aus einer seismischen Überwachung die Einordnung in eine Erdbebenzone nach DIN EN 1998-1/NA 2011-01 geändert wird.

Zur Beurteilung der örtlichen seismischen Gefährdung (seismische Gefährdungsanalyse) in konkreten Standortregionen und für die Eingrenzung von Standortregionen, insbesondere im Übergangsbereich von Zone 1 zu Zone 2 (DIN EN 1998-1/NA 2011-01), ist die Bestimmung der seismischen Aktivität von Bedeutung.

Ergänzendes Erkundungsziel:

- Seismische Aktivität

Weiterführende Fragestellungen bezüglich der Anwendung des Ausschlusskriteriums „Seismische Aktivität“ werden im von der BGE an die BGR übertragenen Arbeitspaket „Ausschlusskriterien“ (9S2019070000) bearbeitet. Die Ausführungen im entsprechenden Zwischenbericht (Kaiser & Spies 2020) sind ergänzend zu den hier behandelten Aspekten zu sehen.

2.5 Vulkanische Aktivität (AK-5)

Entsprechend § 22 Abs. 2 Nr. 5 StandAG kommen Gebiete nicht als Endlagerstandort in Betracht, in denen quartärer Vulkanismus aufgetreten oder in denen zukünftig vulkanische Aktivität zu erwarten ist. Hinzu schlägt die BGR eine Erweiterung des zu betrachtenden Zeitraums auf den gesamten känozoischen Vulkanismus vor (May 2019).

Um känozoische oder zukünftige vulkanische Aktivitäten sowie deren mögliche Auswirkungen auf den Endlagerstandort abzuschätzen, sind die Vorkommen magmatischer Bildungen zu erfassen. Prozesse und Indikatoren hinsichtlich der Wahrscheinlichkeit eines zukünftig in Deutschland zu erwartenden Vulkanismus (in den nächsten 1 Million Jahren) sind Gegenstand aktueller Forschung. Eine Zusammenstellung von möglichen Indikatoren, aus denen sich Erkundungsziele ableiten lassen, ist von May (2019) aufgestellt worden.

Die oberflächennahen Erkundungsziele beinhalten sowohl die Erfassung von magmatischen Produkten und deren Eigenschaften, wie z. B. Verbreitung, Alter, Zusammensetzung und Gefüge, als auch das Prozessverständnis zu deren Entstehungsgeschichte. Da jedoch nicht gewährleistet ist, dass sich die vergangene magmatische Aktivität immer an der Oberfläche widerspiegelt, ist es ebenso erforderlich den Untergrund zu erfassen, um das Vorkommen möglicher magmatischer Produkte und deren Wegsamkeiten zu ermitteln. Des Weiteren ist das Vorhandensein möglicher, magmatisch bedingter Fluidsysteme zu untersuchen.

Direkte Erkundungsziele:

- Räumliche Verbreitung von känozoischen Eruptionszentren, Vulkaniten, vulkanischen Ablagerungen und magmatischen Intrusionen, sowie von rezenten magmatischen Fluiden und deren Austrittsstellen
- Alter, Zusammensetzung und Gefüge der identifizierten, känozoischen magmatischen Bildungen
- Zusammensetzung der rezenten, magmatischen Fluide

Für die Prognose des Auftretens von zukünftigem Vulkanismus für einen Zeitraum von 1 Million Jahren liegen keine etablierten und „marktreifen“ Methoden nach Stand der Technik vor. Für den Umgang mit der Forderung des Kriteriums wird empfohlen, sich an dem jeweils aktuellen Stand der Wissenschaft zu orientieren.

2.6 Grundwasseralter (AK-6)

Gemäß § 22 Abs. 2 Nr. 6 StandAG kommen Gebirgsbereiche nicht als ewG oder Einlagerungsbereich in Betracht, in denen junge Grundwässer nachgewiesen wurden.

Den Begriff Grundwasser definiert das Wasserhaushaltsgesetz (WHG) vom 31.07.2009, als „das unterirdische Wasser in der Sättigungszone, das in unmittelbarer Berührung mit dem Boden oder dem Untergrund steht“ (WHG 2018).

Der Begriff Grundwasseralter wird in der hydrogeologischen Literatur mitunter unspezifisch gebraucht, um die Zeit zu bezeichnen, die seit der Grundwasserneubildung vergangen ist (Cartwright et al. 2017). Alternativ zum Term Grundwasseralter wird auch der Begriff (Untergrund-)Verweilzeit verwendet (Fröhlich 1990).

Aufgrund der unterschiedlichen Techniken zur Wasserbeprobung aus dem Gebirge (frei fließende Wässer) und aus Gesteins(-bruch)-stücken (Porenwässer) werden unter Umständen Wässer unterschiedlicher Genese und Herkunft extrahiert. Dies ist eine realistische Möglichkeit gerade bei potenziellen Wirtsgesteinen, deren Matrixdurchlässigkeit idealerweise sehr gering ist und deren Porengrößen sehr klein sind. Hier können sich aus Klüften zutretende Grundwässer in Alter und Zusammensetzung u. U. signifikant von denjenigen anstehender Porenwässer unterscheiden. Mit der Begriffsdefinition des WHG sind diese beiden Wasserreservoirs gleichwertig in ihrer Relevanz für das Ausschlusskriterium. Es ist anzunehmen, dass sich Porenwässer auch in hydraulisch dichtem Gestein konsequent beproben lassen, und zwar aus frischen Bohrkernproben (u. a. Osenbrück 1998, Lippmann et al. 1998, Rübel et al. 2002, Rufer et al. 2017), während frei fließende Grundwässer dort erwartungsgemäß seltener angetroffen werden.

In der Begründung zum StandAG wird als Bewertungsgrundlage zur Begrifflichkeit „junges Grundwasser“ aufgeführt, dass die Konzentration der Isotope Tritium (^3H) und Kohlenstoff-14 (^{14}C) im Grundwasser herangezogen werden kann (BT-Drs. 18/11398). Im Abschlussbericht der Kommission Lagerung hochradioaktiver Abfallstoffe (EL-KOM 2016) wird diesbezüglich ausgeführt, dass die ^3H - und ^{14}C -Konzentrationen nicht über dem natürlichen Hintergrundniveau nachweisbar sein dürfen. Bei Anwendung der auf Konzentrationen beruhenden Methoden beträgt die zeitliche Auflösung des Grundwasseralters bei ^3H einige Jahrzehnte (Tolstikhin & Kamensky 1969, Schlosser et al. 1988, Sültenfuß & Massmann 2004), bei ^{14}C (sog. Radiokarbonmethode) wenige tausend bis um 30.000 Jahre (u. a. Stuiver & Polach 1977, Clark & Fritz 1997). Diese oberen Altersgrenzen dieser beiden Datierungsmethoden ergeben sich aus dem natürlichen Zerfall des jeweiligen Isotops und deren Nachweisbarkeit. Nach dem Mehrfachen der jeweiligen Halbwertszeiten ($T_{1/2}$) des Isotops wird die Restaktivität ununterscheidbar vom Hintergrundwert ($T_{1/2}(^3\text{H}) = 12,33$ Jahre, $T_{1/2}(^{14}\text{C}) = 5.730$ Jahre). In der Begründung zum StandAG wird die Möglichkeit eingeschlossen, die errechneten Grundwasseralter durch weitere geochemische und isotopenhydrogeologische Hinweise zu überprüfen.

Direktes Erkundungsziel des Kriteriums „Junges Grundwasseralter“ ist es sicherzustellen, ein im Barrieregestein bzw. im Gestein des Einlagerungsbereiches angetroffenes Grundwasser mit geeigneten Maßnahmen auf dessen mögliches junges Alter zu testen, um ein Alter bis 30.000 Jahre auszuschließen. Dies kann insbesondere mittels ^3H - und ^{14}C -Konzentrationen oder alternativer Tracer bestimmt werden, die in der Lage sind, diesen Zeitraum abzudecken.

Direktes Erkundungsziel:

- Altersbestimmung des Grundwassers im ewG bzw. Einlagerungsbereich zum Nachweis, dass kein angetroffenes Grundwasser jungen Alters (< 30.000 Jahre) ist

Ergänzende Erkundungsziele ergeben sich aus der Notwendigkeit der Durchführung von Sicherheitsuntersuchungen. Die dazu nötigen hydrogeologischen Modelle (mit repräsentativen Diffusionskoeffizienten, Porositäten und Gebirgsdurchlässigkeiten) können auf Grundlage der Altersstruktur validiert werden und die durchzuführenden modellbasierten Radionuklidtransport-Prognoserechnungen können darauf aufsetzen.

In der Begründung zum StandAG wird die Möglichkeit eingeschlossen, die errechneten Grundwasseralter durch weitere geochemische und isotopenhydrogeologische Methoden zu überprüfen.

Ergänzendes Erkundungsziel:

- Altersbestimmung des Grundwassers im Gesamtsystem aus Barrieregestein, Deckgebirge und Nebengestein

Neben den hier dargestellten Erkundungszielen werden weiterführende Aspekte zur Anwendung des Ausschlusskriteriums „Grundwasseralter“ in einem separaten Arbeitspaket der BGR („Ausschlusskriterien“; 9S2019070000) behandelt und sind in einem ersten Zwischenbericht dokumentiert (Neukum et al. 2020). Neben Begriffsdefinitionen wird darin ein allgemeiner Überblick zu aktuellen Möglichkeiten und Einschränkungen der Grundwasserdatierung gegeben.

3 Erkundungsziele zur Anwendung der Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG

In § 23 StandAG werden fünf Mindestanforderungen genannt, die in Gebieten, die nach dem Konzept des ewG als Endlagerstandort geeignet sind, erfüllt sein müssen. Für die weitere Bearbeitung innerhalb des Vorhabens werden die Mindestanforderungen entsprechend der Reihenfolge ihrer Nennung in § 23 StandAG aufsteigend durchnummeriert (MA-1 bis MA-5), siehe Tab. 2. Aus diesen Mindestanforderungen ergeben sich die in den nachfolgenden Unterkapiteln 3.1 bis 3.5 dargestellten Erkundungsziele.

Tab. 2: Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG

Kürzel	Bezeichnung
MA-1	Gebirgsdurchlässigkeit
MA-2	Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs
MA-3	Minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs
MA-4	Fläche des Endlagers
MA-5	Erhalt der Barrierewirkung

3.1 Gebirgsdurchlässigkeit (MA-1)

Gemäß § 23 Abs. 5 Nr. 1 StandAG muss die Gebirgsdurchlässigkeit im ewG weniger als 10^{-10} m/s betragen. Damit soll ein advektiver Fluidtransport weitgehend ausgeschlossen werden. Der Stofftransport erfolgt dann überwiegend diffusiv. Die Gebirgsdurchlässigkeit des ewG ist eine Kenngröße für eine fehlende oder langsame Grundwasserbewegung in

einem Endlagersystem. Grundwasserbewegungen durch ein poröses Medium (Darcy-Fluss) werden im Wesentlichen durch die effektive Porosität, den hydraulischen Gradienten und den Durchlässigkeitsbeiwert bestimmt.

Die Gebirgsdurchlässigkeit setzt sich aus der Gesteinsdurchlässigkeit und der Trennflächendurchlässigkeit zusammen. Die Gesteinsdurchlässigkeit ist die Durchlässigkeit eines ungestörten Gesteinskörpers und ist charakteristisch für den jeweiligen Gesteinstyp. Innerhalb eines Gesteinstyps können laterale und vertikale Heterogenitäten der Gesteinsdurchlässigkeit auftreten, die von der sedimentären, magmatischen oder metamorphen Fazies und diagenetischen Prozessen abhängen. Trends in der Gesteinsdurchlässigkeit lassen sich in der Regel aus der räumlichen Verteilung von Gesteinstypen beziehungsweise Faziestypen ableiten. Die Trennflächendurchlässigkeit ist die Durchlässigkeit entlang von flächenförmigen Gefügeelementen, wie etwa Störungen, Deformationsbändern, Klüften oder sedimentären Trennflächen. Abhängig von der Art der Trennflächen und ihrer Genese kann die Trennflächendurchlässigkeit höher oder niedriger als die Gesteinsdurchlässigkeit sein.

Direktes Erkundungsziel:

- Gebirgsdurchlässigkeit im ewG; für die Bewertung ausschließlich der Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit genügt der Nachweis, dass diese kleiner als 10^{-10} m/s ist

Für die Sicherheitsuntersuchungen, die gemäß § 14 Abs. 1, § 16 Abs. 1, § 18 Abs. 1 und § 26 erstellt werden müssen, sowie für das sich an die Standortauswahl anschließende Genehmigungsverfahren, sind neben den Gebirgsdurchlässigkeiten auch Kenntnisse über Gesteinsdurchlässigkeiten erforderlich. Diese Erkundungsziele beziehen sich nicht ausschließlich auf den ewG.

Ergänzende Erkundungsziele:

- Gesteinsdurchlässigkeiten
- Trennflächenpermeabilitäten
- Verteilung / räumliche Lage der Trennflächen

3.2 Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (MA-2)

Gemäß § 23 Abs. 5 Nr. 2 StandAG muss der Gebirgsbereich, der den ewG aufnehmen soll, mindestens 100 m mächtig sein. Ein Gebirgsbereich ist dann zur Aufnahme eines ewG geeignet, wenn er durch ein Barrieregestein aufgebaut ist.

In § 23 Abs. 5 Nr. 2 ist für das Wirtsgestein Kristallin (im Falle einer Mächtigkeit kleiner als 100 m) die geforderte „geringe Gebirgsdurchlässigkeit“ nicht quantifiziert. Gleichzeitig muss gemäß Absatz 4 für Kristallin der Nachweis geführt werden, dass anstelle der nach § 23 Abs. 5 Nr. 1 geforderten Gebirgsdurchlässigkeit von 10^{-10} m/s die technischen und geotechnischen Barrieren den sicheren Einschluss der Radionuklide für eine Million Jahre gewährleisten können. Insofern erfolgt die Bewertung, ob eine Gebirgsdurchlässigkeit gering ist, durch die vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen.

Direkte Erkundungsziele:

- Vertikale Ausdehnung des ewG
- Für Kristallingestein (nach § 23, Abs. 4):
 - Vertikale Ausdehnung des betreffenden Gebirgsbereichs
 - Gebirgsdurchlässigkeit

3.3 Minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (MA-3)

Gemäß § 23 Abs. 5 Nr. 3 StandAG muss die Oberfläche des ewG mindestens 300 m unter der Geländeoberfläche liegen. Außerdem muss die Oberfläche des ewG tiefer als die zu erwartende größte Tiefe der Auswirkungen von im Nachweiszeitraum möglichen exogenen Prozessen liegen, die zu einer Beeinträchtigung des ewG führen können.

Bei Standorten mit dem Gesteinstyp Steinsalz in steiler Lagerung muss die Salzschwebe über dem ewG mindestens 300 m mächtig sein.

Um zu überprüfen, ob die Anforderung an die Tiefenlage der Oberfläche des ewG an einem untersuchten Standort bei gleichzeitiger Einhaltung der Anforderung an die Mächtigkeit erfüllt werden kann, muss bekannt sein, in welcher Teufe die untere Begrenzung des Barrieregesteins liegt.

Im Kontext von § 23 Abs. 1 ist für das Wirtsgestein Kristallin die Sonderregelung aus Abs. 4 zu berücksichtigen. Entsprechend ist im betreffenden Gesteinskörper des Wirtsgesteins Kristallin, wenn kein ewG ausgewiesen werden kann, die Mindestanforderung nach Abs. 5 Nr. 3 auf den Einlagerungsbereich anzuwenden. Daraus resultiert, dass die minimale Teufe der Oberfläche des Einlagerungsbereichs 300 m beträgt. Für die Bestimmung der Liegendgrenze des Barrieregesteins wird eine Erkundungsteufe bis maximal 2000 m unter Geländeoberkante empfohlen.

Direkte Erkundungsziele:

- Räumliche Lage der Schichtgrenzen zwischen Barrieregestein und über- und unterlagerndem Gestein (Bewertungsgrundlage ist der Nachweis, dass die Liegendgrenze mehr als 300 m zuzüglich der Mächtigkeit des ewG unterhalb der Geländeoberfläche liegt)
- Beim Gesteinstyp Steinsalz in steiler Lagerung zusätzlich: Räumliche Lage der Oberfläche des den ewG aufnehmenden Steinsalzes (Bewertungsgrundlage ist der Nachweis, dass diese Oberfläche mehr als 300 m oberhalb des ewG liegt)
- Im Fall der Sonderreglung für das Wirtsgestein Kristallingestein ist die räumliche Lage der Basisfläche des betreffenden Kristallingesteins zu bestimmen (Bewertungsgrundlage ist der Nachweis, dass diese Fläche mehr als 300 m zuzüglich der Mächtigkeit des Einlagerungsbereiches unterhalb der Geländeoberfläche liegt)

Mögliche Beeinträchtigungen der Integrität des Barrieregesteins oder speziell des Einlagerungsbereiches im Kristallin durch direkte oder indirekte Auswirkungen exogener Prozesse sind durch numerische Analysen im Rahmen von standortspezifischen Sicherheitsuntersuchungen zu bewerten und ggf. zu berücksichtigen. Die Ergebnisse sollen angemessen sowie bezogen auf das jeweils vorgesehene Barrieregestein berücksichtigt werden (BT-Drs. 18/11398). Dies kann dazu führen, dass eine Festlegung der minimalen Tiefe der Oberfläche des ewG bzw. des Einlagerungsbereiches größer als 300 m für ein/e Gebiet/Region oder ein Standort erfolgt. Spezifische Erkundungsziele zur Bewertung möglicher Beeinträchtigungen der Integrität des Barrieregesteins oder Einlagerungsbereiches ergeben sich aus den Anforderungen für die Sicherheitsuntersuchungen.

3.4 Fläche des Endlagers (MA-4)

Gemäß § 23 Abs. 5 Nr. 4 StandAG muss ein ewG und somit die geologische Formation mit dem Barrieregestein über eine für die Realisierung eines Endlagers ausreichende Fläche verfügen. Um die Einhaltung dieser Anforderung zu überprüfen, muss bekannt sein, in welchen Bereichen die geologische Formation die Mindestanforderungen gemäß § 23 Abs. 5 Nr. 1, 2 und 3 StandAG erfüllt. Der notwendige Flächenbedarf für die Entsorgung der einzulagernden Abfälle ist u. a. von den standortspezifischen Eigenschaften des Wirtsgesteins und dem Endlagerkonzept abhängig. Bis zur Festlegung eines standortspezifischen Endlagerkonzeptes wird empfohlen, entsprechend der Gesetzesbegründung, die folgenden Flächenbedarfe zu berücksichtigen: Steinsalz 3 km², Tonstein 10 km² und Kristallin 6 km² (BT-Drs. 18/11398).

Im Kontext von § 23 Abs. 1 sowie Abs. 4 ist für das Wirtsgestein Kristallin zu berücksichtigen, dass im betreffenden Gesteinskörper die Mindestanforderung nach Abs. 5 Nr. 4 auf den Einlagerungsbereich anzuwenden ist, wenn kein ewG ausgewiesen werden kann.

Direkte Erkundungsziele:

- Flächenhafte Verbreitung (laterale Erstreckung) des ewG
- Für Kristallingestein (nach § 23, Abs. 4):
 - Flächenhafte Verbreitung (laterale Erstreckung) des Einlagerungsbereichs

3.5 Erhalt der Barrierewirkung (MA-5)

Gemäß § 23 Abs. 5 Nr. 5 StandAG dürfen keine Erkenntnisse oder Daten vorliegen, welche die Integrität des ewG, insbesondere die Einhaltung der geowissenschaftlichen Mindestanforderungen zur Gebirgsdurchlässigkeit, Mächtigkeit und Ausdehnung des ewG über einen Zeitraum von einer Million Jahren zweifelhaft erscheinen lassen. Die Bewertung des Erhalts der Barrierewirkung ist Aufgabe der Sicherheitsuntersuchungen, hier insbesondere der geologischen Langzeitprognose und der Szenarienanalysen.

Die Barrierewirkung eines ewG kann durch eine Reihe von endogenen oder exogenen Prozessen, wie Hebung, Senkung, Erosion, Sedimentation und Wechselwirkungen zwischen diesen Prozessen, beeinflusst werden. Endogene Prozesse, wie großräumige Vertikalbewegungen, aktive Störungen, Seismizität und Vulkanismus fallen unter die Ausschlusskriterien gemäß § 22 Abs. 2 StandAG. Im Wirtsgestein Steinsalz in steiler Lagerung (Salzstrukturen) können Bewegungen im Zusammenhang mit einem anhaltenden Salzaufstieg auftreten. Hinweise auf eine anhaltende Aktivität von Salzstrukturen können Bewegungen an der Erdoberfläche und die Deformation von Gesteinspaketen oberhalb oder in unmittelbarer Umgebung einer Salzstruktur sein.

Das Auftreten dieser endogenen Prozesse muss für den Standort hinsichtlich der Auswirkung auf den Erhalt der Barrierewirkung über einen Zeitraum von einer Million Jahren überprüft werden. Wechselwirkungen zwischen endogenen und exogenen Prozessen können in Form von Ausgleichsbewegungen als Reaktionen auf Sedimentation, Erosion und eiszeitliche Eisauflast auftreten.

Die Auswirkungen von Erosionsprozessen hängen vom Gesteinstyp ab. Generell hat linienhafte Erosion eine größere Tiefenwirkung als flächenhafte Erosion. Erosion entlang der Flusssysteme findet überwiegend linienhaft statt, die Verlagerung der Flussläufe kann

langfristig zur flächenhaften Erosion führen. Die maximale Tiefenlage der Erosionsbasis der Flusssysteme hängt von der Höhe des relativen Meeresspiegels, dem Gefälle, den Abflussraten, dem Untergrund und dem Sedimentangebot ab. Die Erosions- und Sedimentationsraten lassen Rückschlüsse auf die Auflaständerung durch Kompaktion / Dekompaktion im ewG zu.

Die größte Tiefenwirkung geht von eiszeitlichen Prozessen, wie zum Beispiel der Erosion durch Gletscher und Schmelzwasser, Permafrost und Eisauflast, aus. Insbesondere das Einschneiden subglazialer Rinnen durch Schmelzwasser unter hohem hydrostatischen Druck kann sehr große Tiefen (~500 m) erreichen (Keller 2009, Weitkamp & Bebiolka 2017). Eisauflast kann zur (Re-)Aktivierung von Störungen durch isostatische Ausgleichsbewegungen führen. Veränderungen der hydraulischen, thermischen und mechanischen Bedingungen im Untergrund können durch erhöhten hydrostatischen und lithostatischen Druck, Permafrost und die Bildung von Eisstauseen auftreten.

Das Potenzial für das zukünftige Auftreten endogener oder exogener Prozesse, welche die Barrierewirkung im Nachweiszeitraum beeinträchtigen können, hängt von der regionalen geologischen Situation ab. Die Wahrscheinlichkeit für das Vorkommen dieser Prozesse lässt sich aus der geologischen Überlieferung ableiten. Relevant ist in diesem Zusammenhang die Lage des Endlagerbereichs relativ zu Störungen, Flusssystemen, pleistozänen Eisrandlagen und dem Verbreitungsgebiet des pleistozänen Permafrosts.

Direkte Erkundungsziele:

- Erosions- bzw. Sedimentationsraten (rezent und in der geologischen Vergangenheit)
- Maximale Tiefenwirkung von Erosionsprozessen in der jüngeren geologischen Vergangenheit (Känozoikum)
- Vertikalbewegungen (vgl. Kapitel 2.1)
- Störungsaktivität (vgl. Kapitel 2.2)
- Aktivität von Salzstrukturen (Wirtsgestein Steinsalz in steiler Lagerung), insbesondere hinsichtlich Salzaufstieg / Salzbewegung
- Subrosionsrate

Im Rahmen der vorläufigen Sicherheitsuntersuchung wird geklärt werden, ob aus den oben genannten Prozessen in potenziellen Standortregionen negative Einflüsse auf die Integrität der geologischen Barriere resultieren.

4 Erkundungsziele zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien gemäß § 24 StandAG

In § 24 StandAG und in den zugehörigen Anhängen 1 bis 11 sind geowissenschaftliche Abwägungskriterien definiert, anhand derer zu bewerten ist, ob in einem Gebiet eine günstige geologische Gesamtsituation vorliegt. Für die weitere Bearbeitung innerhalb des Vorhabens werden die geowissenschaftlichen Abwägungskriterien entsprechend der Reihenfolge ihrer Nennung in den Anhängen 1 bis 11 aufsteigend durchnummeriert (AwK-1 bis AwK-11). Dabei werden weitere Nummerierungsebenen für die bewertungsrelevanten Eigenschaften (z. B. AwK-2.1: Barrierewirksamkeit) und die dazugehörigen Bewertungsgrößen/Indikatoren (z. B. AwK-2.1a: Barrierenmächtigkeit) eingeführt. Aus diesen geowissenschaftlichen Abwägungskriterien ergeben sich die in den nachfolgenden Unterkapiteln 4.1 bis 4.11 dargestellten Erkundungsziele.

4.1 *Transport radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich (AwK-1)*

Nach Definition § 3 Wasserhaushaltsgesetz vom 31.07.2009 ist unter dem Begriff Grundwasser das unterirdische Wasser in der Sättigungszone zu verstehen, das in unmittelbarer Berührung mit dem Boden oder dem Untergrund steht. Gemäß Anlage 1 zu § 24 StandAG wird das Kriterium „Transport radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich“ über die Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers, die charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit des Gesteinstyps und den charakteristischen effektiven Diffusionskoeffizienten des Gesteinstyps bewertet. Maßgeblich sind jeweils die Bedingungen im ewG.

Nach EL-KOM (2016) liegen zum effektiven Diffusionskoeffizienten als Maß für die Diffusionsgeschwindigkeit in konkreten Gesteinsvorkommen zu Beginn des Standortauswahlverfahrens keine ausreichenden Informationen vor. Da der Diffusionskoeffizient (wie auch die Gebirgsdurchlässigkeit) generell vom Porenvolumen des Gesteins abhängig ist, kann hilfsweise die absolute Porosität als Indikator für die Diffusionsgeschwindigkeit in Frage kommen. Dies trifft bei Tonstein zu. Hier nehmen Diffusionsgeschwindigkeit und effektiver Diffusionskoeffizient ebenso wie die Porosität mit zunehmendem Kompaktionsbeziehungsweise Verfestigungsgrad des Gesteins generell ab. Im StandAG werden für die bewertungsrelevante Eigenschaft „Diffusionsgeschwindigkeit bei Tonstein“ die Porosität und der Verfestigungsgrad als Indikatoren vorgegeben (Tab. 3).

Tab. 3: Bewertungsrelevante Eigenschaften und Indikatoren des Abwägungskriteriums „Transport radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen im ewG“

Geowiss. Abwägungskriterium	Bewertungsrelevante Eigenschaft	Indikator
AwK-1 Transport radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen im ewG	AwK-1.1 Grundwasserströmung	AwK-1.1a Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers [mm/a]
	AwK-1.2 Grundwasserangebot	AwK-1.2a Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit des Gesteinstyps [m/s]
	AwK-1.3 Diffusionsgeschwindigkeit	AwK-1.3a Charakteristischer effektiver Diffusionskoeffizient des Gesteinstyps für tritiiertes Wasser (HTO) bei 25 °C [m ² /s]
	AwK-1.4 Diffusionsgeschwindigkeit bei Tonstein	AwK-1.4a Absolute Porosität AwK-1.4b Verfestigungsgrad

4.1.1 Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers (AwK-1.1a)

Die Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers kann aus dem Durchlässigkeitsbeiwert, dem hydraulischen Gradienten und der durchflusswirksamen Porosität bestimmt werden. Entsprechend der Wertungsgruppengrenzen für diesen Indikator genügt die Feststellung, dass die Geschwindigkeit < 0,1 mm/a oder > 1 mm/a ist.

Direkte Erkundungsziele:

- Durchlässigkeitsbeiwert im ewG
- Hydraulischer Gradient im ewG
- Durchflusswirksame Porosität im ewG

Zur Absicherung einer festgestellten Abstandsgeschwindigkeit sind hydrogeologische Modellierungen erforderlich. Für die Kalibrierung hydrogeologischer Modelle ist es nützlich, die klassischen isotopehydrologischen Methoden im Grundwasser anzuwenden. Dieselben ergänzenden Erkundungsziele ergeben sich auch aus der Notwendigkeit der Durchführung von Sicherheitsuntersuchungen. Die in diesem Zusammenhang

durchzuführenden numerischen Modellberechnungen des Gesamtsystems gilt es mittels Paläoproxi (Grundwasseraltersbestimmung mittels Isotopenhydrologie) zu validieren (siehe AK-6).

Ergänzendes Erkundungsziel:

- Isotopenbestimmung an den angetroffenen Grundwässern

4.1.2 Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit des Gesteinstyps (AwK-1.2a)

Bestimmten Gesteinstypen können charakteristische Bandbreiten der Gebirgsdurchlässigkeit zugeordnet werden. Allerdings können Tongestein und Kristallingestein Gebirgsdurchlässigkeiten aufweisen, die über eine Bandbreite von mehreren Größenordnungen variieren (Appel & Habler 2002). Gebirgsdurchlässigkeiten von Kristallingesteinen können beispielsweise aufgrund unterschiedlicher Klüftigkeit um mehr als acht Größenordnungen voneinander abweichen. Tongesteine können durch Einschaltungen von petrologisch abweichenden Gesteinslagen und ihrer Anisotropie variierende Durchlässigkeiten aufweisen.

Außerdem kann die Gebirgsdurchlässigkeit von der Teufenlage abhängen und durch geologische Prozesse wie beispielsweise diagenetische, tektonische oder gering metamorphe Überprägung verändert worden sein. Daraus folgt, dass die Angabe der charakteristischen Durchlässigkeit des Gesteinstyps für Kristallingestein und Tongestein nicht allein aufgrund der Gesteinsart erfolgen kann, sondern standortspezifische Untersuchungen erfordert. In Steinsalz variieren die Durchlässigkeitsbeiwerte erheblich weniger und es kann angenommen werden, dass für diese Wirtsgesteinsart von einer Gebirgsdurchlässigkeit kleiner 10^{-12} m/s auszugehen ist.

Direktes Erkundungsziel:

- Gebirgsdurchlässigkeit im ewG (entsprechend der Wertungsgruppengrenzen für diesen Indikator genügt die Feststellung, dass die Gebirgsdurchlässigkeit $< 10^{-12}$ m/s oder $> 10^{-10}$ m/s ist)

Ergänzende Erkundungsziele ergeben sich ggf. aus der Notwendigkeit der Durchführung von Sicherheitsuntersuchungen. Die in diesem Zusammenhang durchzuführenden numerischen Modellberechnungen des Gesamtsystems gilt es mittels Paläoproxi (Grundwasseraltersbestimmung mittels Isotopenhydrologie) zu validieren. Zur Absicherung einer festgestellten charakteristischen Gebirgsdurchlässigkeit sind Strömungs- und Transportmodellierungen erforderlich. Für die Kalibrierung hydrogeologischer Modelle ist es nützlich, die klassischen isotopenhydrologischen Methoden im Grundwasser anzuwenden (siehe AK-6).

Ergänzende Erkundungsziele:

- Isotopenbestimmung an den angetroffenen Grundwässern

4.1.3 Charakteristischer effektiver Diffusionskoeffizient des Gesteinstyps (AwK-1.3a)

Als weiteren Indikator nennt das StandAG den charakteristischen effektiven Diffusionskoeffizienten des Gesteinstyps für tritiertes Wasser (HTO) bei 25°C. Es muss davon ausgegangen werden, dass die Diffusionskoeffizienten der infrage kommenden Gesteinstypen Kristallingestein und Tongestein je nach Gesteinsausbildung und Anisotropie größere Bandbreiten aufweisen können. Da der effektive Diffusionskoeffizient für tritiertes Wasser (HTO) bei 25°C nicht im Rahmen einer In-situ-Messung, sondern nur durch eine Laboruntersuchung festgestellt werden kann, muss zu seiner Bestimmung im Rahmen von Erkundungsmaßnahmen entsprechendes Probenmaterial gewonnen werden.

Entsprechend der Wertungsgruppengrenzen für diesen Indikator genügt die Feststellung, dass der Diffusionskoeffizient $< 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ oder $> 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ ist.

Direktes Erkundungsziel:

- Bestimmung des charakteristischen effektiven Diffusionskoeffizienten des Gesteinstyps für tritiertes Wasser (HTO) bei 25°C

Zur Ergänzung des charakteristischen effektiven Diffusionskoeffizienten, der an tritiertem Wasser (HTO) bei 25°C bestimmt wird, können alternative Methoden zu Bestimmung herangezogen werden. Eine Normierung auf den charakteristischen effektiven Diffusionskoeffizienten für tritiertes Wasser bei 25°C ist notwendig.

Ergänzendes Erkundungsziel:

- Bestimmung des charakteristischen effektiven Diffusionskoeffizienten aus alternativen Methoden

4.1.4 Diffusionsgeschwindigkeit bei Tonstein (AwK-1.4)

4.1.4.1 Absolute Porosität von Tonstein (AwK-1.4a)

Für die Bewertung der Diffusionsgeschwindigkeit bei Tonstein gibt das StandAG als Indikator die absolute Porosität an. Entsprechend der Wertungsgruppengrenzen für diesen Indikator genügt die Feststellung, dass die absolute Porosität $< 20\%$ oder $> 40\%$ ist.

Direktes Erkundungsziel:

- Absolute Porosität im ewG (für Tonstein)

Für vorläufige Sicherheitsuntersuchungen sind über die Feststellung, dass die absolute Porosität $< 20\%$ oder $> 40\%$ ist, hinaus absolute und effektive Werte der Porosität relevant, um eine räumliche bzw. statistische Verteilung dieser Eigenschaft abbilden zu können.

Ergänzendes Erkundungsziel:

- Effektive Porosität (für Tonstein)

4.1.4.2 Verfestigungsgrad von Tonstein (AwK-1.4b)

Für die Bewertung der Diffusionsgeschwindigkeit bei Tonstein gibt das StandAG als Indikatoren neben der absoluten Porosität den Verfestigungsgrad an. Der Verfestigungsgrad bei Tongestein ist abhängig vom Grad der Kompaktion, die ein Tonstein während der Versenkung erfahren hat, sowie von damit zusammenhängenden diagenetischen Prozesse.

Entsprechend der Wertungsgruppengrenzen für diesen Indikator ist die Feststellung erforderlich, ob es sich um Tonstein, festen Ton oder halbfesten Ton handelt.

Direktes Erkundungsziel:

- Verfestigungsgrad im ewG (für Tonstein)

Für die Feststellung, ob es sich um Tonstein, festen Ton oder halbfesten Ton handelt, sind darüber hinaus weitere vergleichende Angaben relevant, um eine räumliche bzw. statistische Verteilung des Festigkeitsgrades abbilden zu können (Beushausen et al. 2019).

Ergänzende Erkundungsziele:

- Zugfestigkeit
- Maximale Versenkungstiefe
- Diageneseegrad (z. B. Illitkristallinität, Vitrinitreflexion)

4.2 Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper (AwK-2)

Im Fokus dieses Kriteriums stehen Bewertungen zur Lagerung des Barrieregesteins, die der Einschätzung und Prognose des Einschlussvermögens der geologischen Formation dienen. Dazu zählen die Mächtigkeit, Ausdehnung und Tiefenlage des barrierewirksamen Gesteinskörpers oder bei mehreren Gesteinskörpern ihre Anordnung (BT-Drs. 18/11398), siehe Tab. 4. Nach § 24 Abs. 2 erfolgt eine Bewertung für Standorte durch Anwendung der Anlage 2 nur dann, wenn § 23 Abs. 4 nicht zur Anwendung kommt.

Tab. 4: Bewertungsrelevante Eigenschaften und Indikatoren des Abwägungskriteriums „Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper“

Geowiss. Abwägungskriterium	Bewertungsrelevante Eigenschaft	Indikator
AwK-2 Konfiguration der Gesteinskörper	AwK-2.1 Barrierewirksamkeit	AwK-2.1a Barrierenmächtigkeit [m]
		AwK-2.1b Grad der Umschließung des Einlagerungsbereichs durch einen ewG
	AwK-2.2 Robustheit und Sicherheitsreserven	AwK-2.2a Teufe der oberen Begrenzung des erforderlichen ewG [m unter GOK]
	AwK-2.3 Volumen des ewG	AwK-2.3a Flächenhafte Ausdehnung bei gegebener Mächtigkeit (Vielfaches des Mindestflächenbedarfs)
	AwK-2.4 Indikator „Potenzialbringer“ bei Tonstein	AwK-2.4a Vorhandensein von Gesteinsschichten mit hydraulischen Eigenschaften und hydraulischem Potenzial

4.2.1 Barrierenmächtigkeit (AwK-2.1a)

Nach Beushausen et al. (2019) wird der Begriff Barrierenmächtigkeit in Anlehnung an die Begriffsbestimmungen in § 2 Nr. 7 als die Mächtigkeit der geologischen Einheiten im Endlagersystem verstanden, die im Wesentlichen eine Ausbreitung von Radionukliden be- oder verhindern (Barrieregestein).

Als Bewertungsgrundlage für die Barrierenmächtigkeit kommt in den Fällen, in denen der Einlagerungsbereich innerhalb des Barrieregesteins liegt, der kleinste Abstand zwischen

dem Einlagerungsbereich und dem Rand des Barrieregesteins zur Anwendung. Solange keine Festlegung zur Positionierung des Einlagerungsbereichs im Barrieregestein getroffen wurde, sollte die Position angenommen werden, die diese Barrierenmächtigkeit maximiert. Der Einlagerungsbereich wird in seiner vertikalen Ausdehnung nicht berücksichtigt (RESUS 2019).

Für den Fall, dass der ewG den Einlagerungsbereich überlagert, wird die gesamte Mächtigkeit des Barrieregesteins im Hangenden des Einlagerungsbereichs betrachtet (RESUS 2019).

Bewertungsgrundlage ist die Zuordnung der Mächtigkeit zu einer der Wertungsgruppen: „günstig“ (größer 150 m), „bedingt günstig“ (100 m bis 150 m), „weniger günstig“ (50 m bis 100 m).

Direktes Erkundungsziel:

- Mächtigkeit des Barrieregesteins

Ergänzendes Erkundungsziel:

- Räumliche Abgrenzung des Barrieregesteins (z. B. durch Erfassung von Schichtgrenzen der barrierewirksamen Gesteinstypen)

4.2.2 Grad der Umschließung des Einlagerungsbereichs durch einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich (AwK-2.1b)

Die barrierewirksamen Gesteinskörper sollen die eingelagerten radioaktiven Abfälle möglichst vollständig umschließen. Bewertet wird der Grad der Umschließung des Einlagerungsbereichs durch den ewG, wobei der Einlagerungsbereich a) innerhalb oder b) außerhalb des ewG liegen kann.

Für den Fall a) ist in einem Endlagersystem die Umschließung des Einlagerungsbereiches vollständig, im Fall b) unvollständig. Für den Fall b) ist das Barrieregestein im Endlagersystem Teil der den Einlagerungsbereich überlagernden Schichten (§ 23 Abs. 5 Nr. 1). Die Konfiguration des Endlagersystems ist eine von der Erkundung unabhängige Festlegung.

Für den Fall b) kann sowohl die Wertungsgruppe „bedingt günstig“ als auch „weniger günstig“ zutreffen. Die Abstufung basiert auf einer Bewertung von Fehlstellen und deren Position, wobei eine Einteilung in klein und unkritisch bzw. groß und kritisch vorgegeben ist. Fehlstellen im Barrieregestein führen dazu, dass dort lokal das Einschlussvermögen durch eine höhere hydraulische Wirksamkeit beeinträchtigt wird. Durch die Erfassung der

hydrogeologischen und anderen Eigenschaften der barrierewirksamen Gesteinstypen und Störungen in der betreffenden Formation können Fehlstellen im Barrieregestein erkannt werden.

Direktes Erkundungsziel:

- Räumliche Lage und Ausdehnung der barrierewirksamen Gesteine bzw. Gesteinsformationen

Ergänzende Erkundungsziele:

- Eigenschaften und räumliche Variation der barrierewirksamen Gesteinstypen
 - Hydrogeologische Eigenschaften (Identifizierung hydraulisch relevanter Wegsamkeiten)
 - Gebirgsmechanische, chemische und petrologische Eigenschaften der barrierewirksamen Gesteinstypen

Ob die Fehlstellen, die das Einschussvermögen eines Endlagersystems beeinträchtigen, in unkritischer oder kritischer Position vorkommen, ist durch numerische Analysen im Rahmen von standortspezifischen Sicherheitsuntersuchungen zu bewerten und ggf. zu berücksichtigen. Spezifische Erkundungsziele zur Bewertung des Einschussvermögens vom Barrieregestein ergeben sich somit aus den Anforderungen für die Sicherheitsuntersuchungen.

4.2.3 Teufe der oberen Begrenzung des erforderlichen ewG (AwK-2.2a)

Die Teufe der oberen Begrenzung des ewG ist der minimale Abstand des äußeren oberen Randes des ewG zur Geländeoberfläche (RESUS 2019).

Eine Unterscheidung zwischen ewG und erforderlichem ewG kann nicht durch Bohrungen oder geophysikalische Messungen erfolgen. Solange keine Festlegung erfolgt ist, sollte mit Bezug zum § 23 Abs. 5 Nr. 2 als minimale Größe eine Mächtigkeit des Barrieregesteins von 100 m berücksichtigt werden. Im Fall der Sonderregelung für das Wirtsgestein Kristallingestein im § 23 Abs. 5 Nr. 2 ist grundsätzlich auch eine geringere Mächtigkeit des Barrieregesteins zulässig.

Erst Modellberechnungen für ein Endlagersystem mit einem konkreten Sicherheitskonzept, welches u. a. die Teufe des Einlagerungsbereiches beinhaltet, ermöglichen die Festlegung eines erforderlichen ewG.

Da sich die in diesem Bericht erarbeiteten Erkundungsziele hauptsächlich auf die von der Vorhabenträgerin für die übertägige Erkundung vorgeschlagenen Standortregionen beziehen, liegen zu diesem Zeitpunkt die Ergebnisse der vorläufigen repräsentativen Sicherheitsuntersuchungen sowie die jeweiligen Endlagerkonzepte bereits vor. Aus diesen Grundlagen ergibt sich die Mächtigkeit des erforderlichen ewG.

Im weiteren Verfahren ist nach einer Festlegung der Teufe des Einlagerungsbereiches die minimale zulässige Ausdehnung der Barrierenmächtigkeit (d. h. die Oberkante dieses Gebirgsbereiches) für die Bewertung zu berücksichtigen.

Bewertungsgrundlage ist der Nachweis, dass die Teufe der oberen Begrenzung des ewG einer der Wertungsgruppen zugeordnet werden kann: „bedingt günstig“ (300 m – 500 m unter Geländeoberfläche), „günstig“ (größer 500 m unter Geländeoberfläche).

Direktes Erkundungsziel:

- Bestimmung von den ewG einschließenden Schichtgrenzen (Räumliche Lage der Schichtgrenze zwischen Barrieregestein und über- und unterlagerndem Gestein)

4.2.4 Flächenhafte Ausdehnung bei gegebener Mächtigkeit (Vielfaches des Mindestflächenbedarfs) (AwK-2.3a)

Die Bewertung der flächenhaften Ausdehnung ergibt sich aus dem Verhältnis von horizontaler Querschnittsfläche des Barrieregesteins zu der Fläche des Endlagers (Beushausen et al. 2019).

Der notwendige Flächenbedarf für die Entsorgung aller einzulagernden Abfälle ist u.a. von den standortspezifischen Eigenschaften des Wirtsgesteins und dem Endlagerkonzept abhängig. Solange im Verfahren die Informationen fehlen, sollten entsprechend der Gesetzesbegründung zum StandAG die folgenden Flächenbedarfe berücksichtigt werden: Steinsalz 3 km², Tonstein 10 km² und Kristallin 6 km² (BT-Drs. 18/11398).

Dabei ist auch, nach § 23 Abs. 5 Nr. 2, eine Unterteilung in mehrere isoliert vorkommende ewG innerhalb eines Endlagersystems zulässig. Mit diesem Indikator soll der Spielraum für eine flexible Auslegung des Endlagerbergwerkes inkl. aller Barrieren bewertet werden (EL-KOM 2016). Durch die Berücksichtigung der die isoliert vorkommenden ewG umhüllenden Fläche oder der Summe ihrer einzelnen flächenhaften Ausdehnungen, wird der Anforderung nach Flexibilität entsprochen.

Bewertungsgrundlage ist der Nachweis, dass die Flächenausdehnung des Barrieregesteins einer der Wertungsgruppen zugeordnet werden kann: „günstig“ (größer zweifach), „bedingt günstig“ (zweifach), „weniger günstig“ (weniger als zweifach).

Direktes Erkundungsziel:

- Flächenhafte Verbreitung der Barrieregesteine bei einer durchgehenden Mächtigkeit von mindestens 100 m

4.2.5 Potenzialbringer bei Tonstein (AwK-2.4)

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. Sind solche Gesteinskörper (Gesteinstyp) vorhanden, ist deren Einfluss auf Grundwasserbewegung und Radionuklidtransport im Barrieregestein zu beurteilen.

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.

Nach Beushausen et al. (2019) erfordert der Begriff „unmittelbar“ 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 Potenzialbringer in unmittelbarer Nachbarschaft zum ewG bzw. Barrieregestein vorhanden sind. Als Grundwasserleiter werden nach Ad-hoc-Arbeitsgruppe Hydrogeologie (Grimmelmann et al. 1997) Gesteinskörper verstanden, die eine Durchlässigkeit größer als $k_f = 10^{-5}$ m/s aufweisen (vgl. Beushausen et al. 2019).

Bewertungsgrundlage ist der Nachweis, dass der angrenzende Gesteinskörper einer der Wertungsgruppen zugeordnet werden kann: „günstig“ (kein Grundwasserleiter), „weniger günstig“ (Grundwasserleiter).

Direkte Erkundungsziele:

- Durchlässigkeitsbeiwert der an das Barrieregestein Tonstein angrenzenden Gesteinskörper oder Gesteinstypen
- Hydraulischer Gradient in den Gesteinskörpern, die an das Barrieregestein Tonstein angrenzen

4.3 Räumliche Charakterisierbarkeit (AwK-3)

Das Kriterium ist gemäß § 24 Abs. 3 StandAG zur Bewertung der erreichbaren Qualität des Einschlusses und der zu erwartenden Robustheit des Nachweises heranzuziehen. Anlage 3 zu § 24 StandAG formuliert das Kriterium wie folgt:

„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 (AwK-3.1) sowie die Übertragbarkeit dieser Eigenschaften (AwK-3.2)“, siehe Tab. 5.

Tab. 5: Bewertungsrelevante Eigenschaften und Indikatoren des Abwägungskriteriums „Bewertung der räumlichen Charakterisierbarkeit“

Geowiss. Abwägungskriterium	Bewertungsrelevante Eigenschaft	Indikator
AwK-3 Räumliche Charakterisierbarkeit	AwK-3.1 Ermittelbarkeit der Gesteinstypen und ihrer charakteristischen Eigenschaften im vorgesehenen Endlagerbereich, insbes. im vorgesehenen ewG	AwK-3.1a Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich
		AwK-3.1b Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften
		AwK-3.1c Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit
	AwK-3.2 Übertragbarkeit der Eigenschaften im vorgesehenen ewG	AwK-3.2a Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)

Die Ermittelbarkeit der Gesteinstypen und ihrer charakteristischen Eigenschaften im vorgesehenen Endlagerbereich, insbesondere im vorgesehenen ewG sowie die Übertragbarkeit der Eigenschaften im vorgesehenen ewG wird mit folgenden Bewertungsgrößen/Indikatoren abgedeckt:

- Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich (AwK-3.1a)
- Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften (AwK-3.1b)
- Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit (AwK-3.1c)
- Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies) (AwK-3.2a)

4.3.1 Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich (AwK-3.1a)

Der Gesetzgeber lässt offen, welche Eigenschaften der Gesteinstypen zur Bewertung dieses Kriteriums gefragt sind. In Anlehnung an Beushausen et al. (2019) wird davon ausgegangen, dass sämtliche relevante Eigenschaften im StandAG erfasst und die zu bewertenden Eigenschaften in den Mindestanforderungen und Abwägungskriterien vollständig abgebildet und zu berücksichtigen sind.

Der Begriff „Variationsbreite“ wird im Gesetz und diesem zu Grunde liegenden Dokumenten nicht definiert. In Übereinstimmung mit RESUS (2019) soll in dem vorliegenden Bericht unter Variationsbreite der Eigenschaften der Gesteinstypen die Bewertung der Spannweite bzw. Ermittelbarkeit der für die Abwägung der relevanten Eigenschaften im zu betrachtenden Bereich verstanden werden. Mit der Variationsbreite soll bewertet werden, inwieweit die Gesteinstypen großräumig einheitlich oder sehr ähnlich hinsichtlich ihrer Eigenschaften sind. Die Auswertungen zielen auch darauf ab, die Skalen, auf denen Veränderungen der relevanten Eigenschaften auftreten, abzuleiten.

Dementsprechend ist die Variationsbreite der in den Anlagen 1-3 und 5-11 sowie der in § 23 Abs. 5 StandAG genannten Eigenschaften zu ermitteln. Der räumliche Geltungsbereich der Indikatoren bzw. der bewertungsrelevanten Eigenschaften wird in den Abwägungskriterien unterschiedlich gehandhabt und ist aus den Anlagen abzuleiten. Aus Tab. 6 wird ersichtlich, für welchen Geltungsbereich eine Methode zur Erhebung einer bestimmten Eigenschaft geeignet sein muss. Innerhalb eines Kriteriums existieren teilweise unterschiedliche räumliche Geltungsbereiche.

Tab. 6: Räumlicher Geltungsbereich der Abwägungskriterien gemäß den Anlagen 1 bis 11 des StandAG

Anlage	Abwägungskriterium	Nr.	räumlicher Geltungsbereich
Anlage 1 (zu § 24 Abs. 3)	Transport durch Grundwasserbewegung	AwK-1	• ewG
Anlage 2 (zu § 24 Abs. 3)	Konfiguration der Gesteinskörper	AwK-2	• ewG • Gesteine in unmittelbarer Nachbarschaft zum ewG (AwK-2.4)
Anlage 3 (zu § 24 Abs. 3)	Räumliche Charakterisierbarkeit	AwK-3	• ewG • Endlagerbereich, gemäß der Anlagen 1 – 3 und 5 – 11
Anlage 4 (zu § 24 Abs. 3)	Langfristige Stabilität der günstigen Verhältnisse	AwK-4	• ewG; prozessabhängig auch Betrachtung des Endlagerbereichs
Anlage 5 (zu § 24 Abs. 4)	Günstige gebirgsmechanische Eigenschaften	AwK-5	• ewG
Anlage 6 (zu § 24 Abs. 4)	Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten	AwK-6	• ewG • die Gebirgsformation/der Gesteinstyp (AwK-6.1b)
Anlage 7 (zu § 24 Abs. 5)	Gasbildung	AwK-7	• Einlagerungsbereich
Anlage 8 (zu § 24 Abs. 5)	Temperaturverträglichkeit	AwK-8	• Endlagerbereich (AwK-8.1a) • Wirtsgestein (AwK-8.1b)
Anlage 9 (zu § 24 Abs. 5)	Rückhaltevermögen im ewG	AwK-9	• ewG
Anlage 10 (zu § 24 Abs. 5)	Hydrochemische Verhältnisse	AwK-10	• ewG
Anlage 11 (zu § 24 Abs. 5)	Schutz des ewG durch Deckgebirge	AwK-11	• Deckgebirge

Dabei wird i. d. R. auf den ewG bzw. das Barrieregestein und/oder Wirtsgestein abgezielt, lediglich für die aufgrund von Anlage 11 zu berücksichtigenden Eigenschaften sind die entsprechenden Variationsbreiten der Gesteine im Deckgebirge zugrunde zu legen.

Es soll bewertet werden, inwieweit die Gesteinstypen großräumig einheitlich oder sehr ähnlich hinsichtlich ihrer Eigenschaften im Untersuchungsgebiet ausgebildet sind. Die Variationsbreite ist 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). Die Auswertungen der Informationen zu den Gesteinstypen zielen somit auch darauf ab, die Skalen, auf denen Veränderungen der relevanten Eigenschaften der Gesteinstypen in den Suchräumen auftreten, abzuleiten. Der Begriff Variationsbreite wird nicht als die Spannweite einer Verteilung (Differenz von größtem und kleinstem Wert) verstanden, da diese bei sehr kleinen Werten (z. B. Diffusionskoeffizienten) konsequenterweise sehr klein ist (Beushausen et al. 2019).

Aus diesem Indikator ergibt sich kein direktes Erkundungsziel, da die Eigenschaften der Gesteinstypen gemäß der Anlagen 1-3 und 5-11 sowie der in § 23 Abs. 5 StandAG zu ermitteln sind.

Direkte Erkundungsziele:

- Keine, da die Variationsbreiten sich auf die in den Anlagen 1-3 und 5-11 sowie der in § 23 Abs. 5 StandAG genannten Eigenschaften beziehen; dort sind entsprechende Erkundungsziele abgeleitet

Die im Untersuchungsgebiet eingesetzten Methoden liefern skalen- und anisotropiebedingt unterschiedliche Variationsbreiten. Unterschiedliche Methoden, die das gleiche Ziel bedienen, helfen dabei, die Variationsbreite auf verschiedenen Skalen zu erfassen. Daher sollte bei der Erkundung der einzelnen Parameter gemäß Anlagen zum StandAG darauf geachtet werden, dass die Daten eine Grundlage für die Bewertung der Variationsbreite bilden. Diese Datengrundlagen können auch für ggf. durchzuführende probabilistische Betrachtungen im Rahmen von Sicherheitsuntersuchungen genutzt werden.

Bewertungsgrundlage ist der Nachweis, dass die Variationsbreite der Eigenschaften einer der Wertungsgruppen zugeordnet werden kann: „günstig“ (gering), „bedingt günstig“ (deutlich, aber bekannt bzw. zuverlässig erhebbar), „ungünstig“ (erheblich und/oder nicht zuverlässig erhebbar).

Ergänzendes Erkundungsziel:

- Datengrundlage für die Bewertung der Variationsbreite von Eigenschaften der Gesteinstypen im Endlagerbereich

4.3.2 Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften (AwK-3.1b)

Zu jedem Gesteinstyp sind die Angaben Mächtigkeit, Teufe und Verbreitung bzw. Ausdehnung (z. B. auch Diskordanzen) sowie die räumliche Verteilung ihrer Eigenschaften erforderlich. Die Untersuchungsziele decken sich mit denen aus den Mindestanforderungen und aus den Indikatoren/Bewertungsgrößen der Abwägungskriterien in den Anlagen 1-3 und 5-11 StandAG. In den genannten Anforderungen und Kriterien wird i. d. R. auf den ewG bzw. das Barrieregestein und/oder Wirtsgestein abgestellt, lediglich für die aufgrund von Anlage 11 zu berücksichtigenden Gesteinstypen und ihrer Eigenschaften sind die Gesteine im Deckgebirge zugrunde zu legen (Tab. 6).

Direkte Erkundungsziele:

- Keine, da die Untersuchungsziele sich mit denen aus den Mindestanforderungen und den Abwägungskriterien in Anlage 1-3 und 5-11 StandAG decken; dort sind entsprechende Erkundungsziele abgeleitet

Bei der Erkundung der einzelnen Parameter gemäß Anlagen zum StandAG sollten die zu erhebenden Daten eine ausreichend große bzw. belastbare Grundlage für die Einschätzung der räumlichen Verteilung der Gesteinstypen und ihrer Eigenschaften in den Untersuchungsgebieten bilden. Die Datengrundlage sollte hinreichend umfangreich sein, um die Gesteinseigenschaften räumlich auf den vorgesehenen Endlagerbereich und insbesondere auf den vorgesehenen ewG übertragen zu können.

Bewertungsgrundlage ist der Nachweis, dass die räumliche Verteilung der Gesteinstypen im Endlagerbereich und ihrer Eigenschaften einer der Wertungsgruppen zugeordnet werden können: „günstig“ (gleichmäßig), „bedingt günstig“ (kontinuierliche, bekannte räumliche Veränderungen), „ungünstig“ (diskontinuierliche, nicht ausreichend genau vorhersagbare räumliche Veränderungen).

Ergänzende Erkundungsziele:

- Datengrundlage für die Bewertung der räumlichen Verteilung (Mächtigkeit, Teufe und Verbreitung) der Gesteinstypen und ihrer Eigenschaften

4.3.3 Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit (AwK- 3.1c)

Die Ermittlung der räumlichen Verteilung der charakteristischen Eigenschaften wird durch eine starke tektonische Überprägung eingeschränkt. Daher sollte der Gesteinsverband des Endlagerbereiches und des ewG eine möglichst geringe tektonische Überprägung aufweisen. Das Ausmaß der Überprägung im Untersuchungsgebiet wird abgeleitet aus den Lagerungsverhältnissen unter Berücksichtigung von Bruch- und Falten tektonik. Es wird der Abstand von Störungen zum Rand des ewG, der Abstand von Störung zu Störung und das Maß der Faltungsintensität (Flexur bis engständige Faltung) bewertet. Salzstrukturen sollten möglichst großräumige und geringfügig komplexe Verfaltungen von Schichten aufweisen, die unterschiedliche mechanische und hydraulische Eigenschaften haben.

Bewertungsgrundlage ist der Nachweis, dass das Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit einer der Wertungsgruppen zugeordnet werden kann: „günstig“ (weitgehend ungestört (Störungen im Abstand > 3 km vom Rand des ewG), flache Lagerung), „bedingt günstig“ (wenig gestört (weitständige Störungen, Abstand 100 m bis 3 km vom Rand des ewG), Flexuren), „ungünstig“ (gestört (engständig zerblockt, Abstand < 100 m), gefaltet).

Direkte Erkundungsziele:

- Geometrie und Ausdehnung von Störungen/Störungszonen und ihrer räumlichen Lage im Untersuchungsgebiet und ggf. darüber hinaus
- Lagerungsverhältnisse der Gesteinseinheiten (Schichtstreichen und -fallen, Faltenachsen- und Faltenachsenengeometrie, Geometrie von Flexuren) im Untersuchungsgebiet und ggf. darüber hinaus

4.3.4 Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies) (AwK-3.2a)

Die Übertragbarkeit der Eigenschaften im vorgesehenen ewG wird durch die Bewertungsgröße / den Indikator „Gesteinsausbildung“ abgedeckt.

Dazu sind Daten und Informationen erforderlich, die den lithologischen und strukturellen Aufbau der Gesteinstypen im vorgesehenen ewG beschreiben und einen Rückschluss auf die Variationsbreite der Gesteinsausbildung dieser Gesteinstypen erlauben. Es ist im Einzelfall für jedes Untersuchungsgebiet zu prüfen, ob Informationen über lithologische Ausprägungen der Gesteinstypen und deren Veränderungen im Raum im regionalen Maßstab, das heißt über das Untersuchungsgebiet hinaus, erforderlich sind.

Bewertungsgrundlage ist die Zuordnung der Faziesausbildung zu einer der Wertungsgruppen: „günstig“ (Fazies regional einheitlich), „bedingt günstig“ (Fazies nach bekanntem Muster wechselnd), „ungünstig“ (Fazies nach nicht bekanntem Muster wechselnd).

Direkte Erkundungsziele:

- Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies) in den wesentlichen geologischen Barrieren, im Wesentlichen:
 - Quantitative und qualitative Mineralzusammensetzung des Gesteinstyps
 - Gefügemerkmale (Textur/Struktur) des Gesteinstyps
 - Alterationen
 - Diagenesemerkmale
 - Tektonische Überprägung / Schieferung

4.4 Langfristige Stabilität der günstigen Verhältnisse (AwK-4)

Das Kriterium ist gemäß § 24 Abs. 3 StandAG zur Bewertung der erreichbaren Qualität des Einschlusses und der zu erwartenden Robustheit des Nachweises heranzuziehen. Anlage 4 zu § 24 StandAG formuliert das Kriterium wie folgt:

„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 bzw. räumliche „Ausdehnung“ und „Gebirgsdurchlässigkeit“ des ewG nicht wesentlich verändert haben“, siehe Tab. 7.

Tab. 7: Bewertungsrelevante Eigenschaften und Indikatoren des Abwägungskriteriums „Bewertung der langfristigen Stabilität der günstigen Verhältnisse“

Geowiss. Abwägungskriterium	Bewertungsrelevante Eigenschaft	Indikator
AwK-4 Langfristige Stabilität der günstigen Verhältnisse	AwK-4.1 Langfristige Stabilität der günstigen Verhältnisse durch nicht wesentliche Veränderung der sicherheitsgerichteten geologischen Merkmale	AwK-4.1a Zeitspanne, über die sich die Mächtigkeit des ewG nicht wesentlich verändert hat
		AwK-4.1b Zeitspanne, über die sich die flächenhafte bzw. räumliche Ausdehnung des ewG nicht wesentlich geändert hat
		AwK-4.1c Zeitspanne, über die sich die Gebirgsdurchlässigkeit des ewG nicht wesentlich verändert hat

Das Kriterium ist durch die bewertungsrelevante Eigenschaft „langfristige Stabilität der wichtigen sicherheitsgerichteten geologischen Merkmale“ (AwK-4.1) und deren entsprechende Indikatoren definiert (siehe Tab. 7). Allerdings erfolgt in dem Kriterium keine Unterscheidung zwischen positiven und negativen Veränderungen.

Grundsätzlich ist die Entwicklungsgeschichte des Untersuchungsgebietes mit Blick auf die zeitliche Veränderung der Mächtigkeit, Ausdehnung und Gebirgsdurchlässigkeit des ewG zu untersuchen. Dabei ist es notwendig, die Entwicklungsgeschichte der vergangenen zehn Millionen Jahren bzw. darüber hinaus zu betrachten, wenn sich daraus bewertungsrelevante Informationen ergeben.

Die Wertungsgruppen dieses Kriteriums verlangen eine Rekonstruktion geologischer Prozesse und ggf. ihre gegenseitige Beeinflussung. Dies muss in einer für die Wertungsgruppen angemessenen Zeitauflösung erfolgen. Die Wertungsgruppen lauten:

- „günstig, wenn seit mehr als zehn Millionen Jahren keine wesentliche Änderung des betreffenden Merkmals aufgetreten ist“,
- „bedingt günstig, wenn seit mehr als einer Million Jahren, aber weniger als zehn Millionen Jahren keine solche Änderung des betreffenden Merkmals aufgetreten ist“,
- „ungünstig, wenn innerhalb der letzten eine Million Jahre eine solche Änderung aufgetreten ist“.

Werden Änderungen der sicherheitsgerichteten geologischen Merkmale innerhalb der genannten Zeitspannen in einer Standortregion erkannt, ist je nach geologischer Gesamtsituation zu bewerten, ob die Änderungen einen „wesentlichen Einfluss“ auf den jeweiligen ewG gehabt haben.

Es ist zu beachten, dass sich Daten für die Berücksichtigung relevanter Prozesse in angemessener zeitlicher Auflösung, z. B. Hebungsbeiträge der Erdkruste, Subrosions- und Erosionsbeiträge in den letzten zehn Million Jahren aus verschiedenen Kriterien und/oder Anforderungen ergeben und dort als Erkundungsziele definiert sind.

4.4.1 Zeitspanne, über die sich die Mächtigkeit des ewG nicht wesentlich verändert hat (AwK-4.1a)

Generell ist eine Mächtigkeitsänderung eines Gesteinskörpers (hier ewG), insbesondere wenn der Gesteinskörper unter mehreren hundert Meter Gebirgsbedeckung liegt, schwierig zu erfassen. Eine Mächtigkeitsänderung kann nur aus einem, aber auch aus einer Vielzahl von Prozessen resultieren.

Die Mächtigkeitsänderungen von Gesteinseinheiten erfolgen überwiegend durch Wechselbeziehungen zwischen Hebung bzw. Senkung (z. B. aufgrund tektonischer Prozesse und/oder isostatischer Ausgleichsbewegungen infolge wechselnder Auflast durch Gletscher- oder Gesteinsmaterial) und damit verbunden durch Erosion und/oder Sedimentation. Erosive Prozesse betreffen die Erdoberfläche und können aufgrund ihrer teilweise hohen Tiefenwirkung (z. B. glazigene Rinnenbildung) direkten Einfluss auf die Mächtigkeit des ewG haben. Sedimentationsprozesse betreffen ebenfalls die Erdoberfläche und üben indirekt Einfluss auf die Mächtigkeit des ewG, z. B. über Kompaktion durch Auflast, aus. Indirekte Beeinflussung bei Tongesteinen kann über z. B. Dekompaktion durch fehlende Auflast erfolgen, z. B. bei flächenhaft wirkenden Abtragungsprozessen. Eine direkte Mächtigkeitsänderung kann durch Volumenänderung bestimmter Tonminerale durch Quellen erfolgen. Zusätzlich ist eine Änderung der Mächtigkeit durch Verkarstungsprozesse in Tongesteinen mit nennenswerten Karbonateinschlüssen möglich (RESUS 2019). Subrosion führt zu einer Verringerung der Steinsalzmächtigkeit und ist deshalb für Standorte mit Steinsalz als Barrieregestein zu betrachten. Außerdem ist bei Steinsalz eine Mächtigkeitsänderung durch Salzkriechen unter Auflast und durch salztektonische Überprägung möglich und damit zu betrachten.

Zur Bedienung dieses Kriteriums bedarf es einer Analyse der Prozesse, die im Endlagerbereich in den letzten 10 Millionen Jahren gewirkt haben und die zu einer Mächtigkeitsänderung des ewG geführt haben können. Die Prozessanalyse kann auf Basis numerischer Modellberechnungen erfolgen. Auf eine angemessene zeitliche Auflösung ist dabei zu

achten. Die Einordnung, ob die Mächtigkeitsänderung „wesentlich“ ist, ist vorzunehmen, um das Kriterium anzuwenden. Da viele der Prozesse an der Erdoberfläche ansetzen, ist der Endlagerbereich mit zu betrachten, auch wenn die Bewertungsgröße / der Indikator auf den ewG zielt.

Die relevanten geologischen Prozesse, die das Betrachtungsmerkmal „Mächtigkeit des ewG“ betreffen, werden durch andere Kriterien und Anforderungen abgedeckt (z. B. AK-1, MA-2, MA-5, AwK-2.1a, AwK-11).

Direktes Erkundungsziel:

- Änderung der Mächtigkeit des ewG in den letzten 10 Millionen Jahren

4.4.2 Zeitspanne, über die sich die flächenhafte bzw. räumliche Ausdehnung des ewG nicht wesentlich geändert hat (AwK-4.1b)

Die Ausführungen im Kapitel 4.4.1 zu den Prozessen und der Problematik bei der Erfassung von Mächtigkeitsänderungen gelten hier sinnverwandt für die Rekonstruktion der flächenhaften bzw. räumlichen Ausdehnungsänderung des ewG und deren Zeitlichkeit.

Zur Bedienung dieses Kriteriums bedarf es einer Analyse der Prozesse, die im Endlagerbereich in den letzten zehn Millionen Jahren gewirkt haben und die zu einer flächenhaften bzw. räumlichen Ausdehnungsänderung des ewG geführt haben können. Das Zusammenspiel der Prozesse kann durch numerische Modellberechnungen analysiert werden. Auf eine angemessene zeitliche Auflösung ist dabei zu achten. Die Einordnung, ob die Mächtigkeitsänderung „wesentlich“ ist, ist vorzunehmen, um das Kriterium anzuwenden. Die Prozesse und ihre Wirkungen sind z. T. nur erfassbar, wenn der gesamte Endlagerbereich betrachtet wird.

Die relevanten geologischen Prozesse, die das Betrachtungsmerkmal „Ausdehnung des ewG“ betreffen, werden durch andere Kriterien und Anforderungen abgedeckt (z. B. AK-1, AK-2, MA-4, MA-5, AwK-2.3a).

Direktes Erkundungsziel:

- Änderung der flächenhaften bzw. räumlichen Ausdehnung des ewG in den letzten 10 Millionen Jahren

4.4.3 Zeitspanne, über die sich die Gebirgsdurchlässigkeit des ewG nicht wesentlich verändert hat (AwK-4.1c)

Generell ist die Änderung der Gebirgsdurchlässigkeit des ewG, insbesondere wenn der Gesteinskörper unter mehreren hundert Meter Gebirgsbedeckung liegt, schwierig zu erfassen. Eine Änderung der Gebirgsdurchlässigkeit wird aus einer Vielzahl von Prozessen resultieren.

Beispielsweise kann es während Hebungs- und Senkungsprozessen zu einer Bildung von Be- und Entlastungsklüften durch Spannungsänderungen kommen. Diageneseprozesse und Alterationsprozesse können zu einer Volumenänderung des den ewG aufnehmenden Gebirgsbereichs bzw. des Gesteinstyps führen, und auch die Gebirgsdurchlässigkeit beeinflussen. Tektonische/Salztekttonische Prozesse können die Gebirgsdurchlässigkeit durch störungs- und klufftbedingte Wegsamkeiten verändern.

Zur Bedienung dieses Kriteriums bedarf es einer Analyse der Prozesse, die im Endlagerbereich in den letzten zehn Millionen Jahren gewirkt haben und die zu einer Änderung der Gebirgsdurchlässigkeit des ewG geführt haben können. Das Zusammenspiel der Prozesse kann durch numerische Modellberechnungen analysiert werden. Auf eine angemessene zeitliche Auflösung ist dabei zu achten. Die Einordnung, ob eine Änderung der Gebirgsdurchlässigkeit „wesentlich“ ist, ist vorzunehmen, um das Kriterium anzuwenden. Die Prozesse und ihre Wirkungen sind z. T. nur erfassbar, wenn der gesamte Endlagerbereich betrachtet wird.

Die relevanten geologischen Prozesse, die das Betrachtungsmerkmal „Gebirgsdurchlässigkeit des ewG“ betreffen, werden durch andere Kriterien und Anforderungen abgedeckt (z. B. AK-1, AK-2, AK-6, MA-1, AwK-1).

Direktes Erkundungsziel:

- Änderung der Gebirgsdurchlässigkeit in den letzten 10 Millionen Jahren

Indirekt lässt sich die Historie der Gebirgsdurchlässigkeit z. B. durch das Vorhandensein einer Porendruckanomalie sowie die isotopenhydrologische Zusammensetzung und/oder das Alter von Grundwasser im ewG erfassen.

Ergänzende Erkundungsziele:

- In-situ-Porendruck (Prüfung auf Druckanomalie) im Endlagerbereich
- Altersbestimmung des Grundwassers im ewG

4.5 **Günstige gebirgsmechanische Eigenschaften (AwK-5)**

Nach Anlage 5 StandAG soll die Neigung zur Ausbildung mechanisch induzierter Sekundärpermeabilitäten im ewG außerhalb einer konturnahen entfestigten Auflockerungszone um die Endlager Hohlräume möglichst gering sein (Tab. 8).

Laut Anlage 5 des StandAG soll das Gebirge als geomechanisches Haupttragelement die Beanspruchung aus Auffahrung und Betrieb ohne planmäßigen tragenden Ausbau (abgesehen von einer Kontursicherung) bei verträglichen Deformationen aufnehmen (AwK-5.1a). Außerhalb dieser unvermeidbaren, konturnah entfestigten Auflockerungszone sollten keine weiteren mechanisch bedingten Sekundärpermeabilitäten zu erwarten sein (AwK-5.1b).

Tab. 8: Bewertungsrelevante Eigenschaften und Indikatoren des Abwägungskriteriums „Bewertung der günstigen gebirgsmechanischen Eigenschaften“

Geowiss. Abwägungskriterium	Bewertungsrelevante Eigenschaft	Indikator
AwK-5 Günstige gebirgsmechanische Eigenschaften	AwK-5.1 Neigung zur Ausbildung mechanisch induzierter Sekundärpermeabilitäten im ewG außerhalb einer konturnahen entfestigten Auflockerungszone um die Endlager Hohlräume	AwK-5.1a Aufnahme der Beanspruchung des Gebirges aus der Auffahrung und Betrieb
		AwK-5.1b Mechanisch bedingte Sekundärpermeabilitäten

Im Hinblick auf günstige gebirgsmechanische Eigenschaften ist es somit notwendig, zwischen kurzfristigen und langfristigen Prozessen zu unterscheiden. Kurzfristige Prozesse werden durch Spannungsumlagerungen ausgelöst, die durch die Auffahrung und den Betrieb eines Endlagers verursacht werden. Langfristige Prozesse ergeben sich u. a. durch sich im Nachweiszeitraum verändernde tektonische Spannungen (z. B. erhöhte Spannungen durch Eisauflast). Um ein aussagekräftiges Gesamtbild zu erhalten, muss das Gesteinsverhalten sowohl unter kurzfristigen als auch unter langfristigen Prozessen analysiert werden. So beschreiben Zug- und Scherfestigkeiten die Stabilität des Gesteins unter schnell auftretenden Veränderungen, während für langfristige Stabilitätsprognosen eher das Dilatanz- und Kriechverhalten des Gesteins relevant ist. Zusätzlich ist das gesteinsmechanische Verhalten abhängig vom Primärspannungszustand des Gebirges. Die Primärspannungen können durch tektonische Einflüsse, Anisotropie oder Trennflächen wie Risse und Klüfte weiter beeinflusst werden (RESUS 2019).

Parameter wie der Druckdiffusionskoeffizient spielen im Tonstein eine Rolle, da z. B. die Scher- und Zugfestigkeit oder die Dilatanzgrenze von den effektiven Spannungen abhängen, und es daher entscheidend sein kann, wie schnell sich Änderungen des Porendrucks im Gestein ausbreiten. Im Kristallin kann Druckdiffusion zur Reaktivierung von Störungsflächen führen und muss daher für diesen Gesteinstyp auch untersucht werden.

Direkte Erkundungsziele:

- Scher- und Zugfestigkeit
- E-Modul, Schermodul, Kompressionsmodul
- Dilatanzgrenze
- Plastisches Verhalten des Gesteins
- Kriechverhalten
- Druckdiffusionskoeffizient
- Wasseraufnahmekapazität (für Tonstein)
- In-situ-Spannungsregime (Orientierung)
- Riss-/Kluftdichte² und -art
- Gebirgstemperatur

Im Rahmen von numerischen Analysen zur Integrität der geologischen Barriere kann durch das Dilatanz- und Fluidruck-Kriterium bzw. Risskriterium untersucht werden, ob es durch die Einwirkung des Endlagers zur Bildung von sekundären Wegsamkeiten im Barrieregestein kommen könnte. Neben den oben genannten Erkundungszielen ist der Porenfluiddruck von Bedeutung.

Ergänzendes Erkundungsziel:

- Porenfluiddruck

² Unter Rissen werden Trennflächen verstanden, die in Folge technogener Einwirkungen entstanden sind. Demgegenüber stehen Klüfte, deren Entstehung geogen begründet ist (RESUS 2019).

4.6 **Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten (AwK-6)**

Die Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten im ewG soll möglichst gering sein. Sie wird gemäß Anlage 6 zum § 24 Abs. 4 StandAG über die Veränderbarkeit der aktuellen Gebirgsdurchlässigkeit, die Rückbildbarkeit von Rissen und die zusammenfassende Bewertung der einzelnen Indikatoren/Bewertungsgrößen dieses Kriteriums bewertet (Tab. 9).

Tab. 9: Bewertungsrelevante Eigenschaften und Indikatoren des Abwägungskriteriums „Bewertung der Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten“

Geowiss. Abwägungskriterium	Bewertungsrelevante Eigenschaft	Indikator
AwK-6 Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten	AwK-6.1 Veränderbarkeit der vorhandenen Gebirgsdurch- lässigkeit	AwK-6.1a Verhältnis repräsentative Gebirgsdurchlässigkeit zu repräsen- tativer Gesteinsdurchlässigkeit
		AwK-6.1b Erfahrungen über die Barrierewirksamkeit der Gebirgsformation
		AwK-6.1c Duktilität des Gesteins
	AwK-6.2 Rückbildbarkeit von Rissen	AwK-6.2a Rückbildung der Sekundärpermeabilität durch Risssschließung
		AwK-6.2b Rückbildung der mechanischen Eigenschaften durch Rissverheilung
	AwK-6.3 Zusammenfassende Beurteilung der Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten aufgrund der Bewertung der einzel- nen Indikatoren	AwK-6.3a Zusammenfassende Beurteilung der Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten aufgrund der Bewertung der einzelnen Indikatoren

Während die Formulierung des Kriteriums ausschließlich auf die Bildung von Fluidwegsamkeiten, d. h. auf eine Verschlechterung der Barriereigenschaften, gerichtet ist, zielen die Bewertungsgrößen/Indikatoren im Wesentlichen auf die Fähigkeit des Gesteins, vorhandene Risse zu schließen bzw. zu verheilen. Lediglich der Indikator „Erfahrungen über die Barrierewirksamkeit der Gebirgsformationen“ bietet die Möglichkeit, Erfahrungen über eine Verschlechterung, d. h. die Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten, in die Bewertung einzubringen. Bei dem Indikator „Duktilität des Gesteins“ ist zu berücksichtigen, dass er nach Anlage 6 StandAG erst bei einem Vergleich von Standorten angewandt werden soll.

4.6.1 Veränderbarkeit der vorhandenen Gebirgsdurchlässigkeit (AwK-6.1)

Die bewertungsrelevante Eigenschaft „Veränderbarkeit der vorhandenen Gebirgsdurchlässigkeit“ wird mit drei Indikatoren beurteilt, die im Folgenden hinsichtlich direkter und ergänzender Erkundungsziele beschrieben werden.

4.6.1.1 Verhältnis Gebirgsdurchlässigkeit zu Gesteinsdurchlässigkeit (AwK-6.1a)

Der erste Indikator beschreibt das Verhältnis aus der repräsentativen Gebirgsdurchlässigkeit, also der hydraulischen Leitfähigkeit des natürlichen Gesteinsverbandes (Durchlässigkeit der Gesteinsmatrix plus Trennfugendurchlässigkeit) und der repräsentativen Durchlässigkeit der Gesteinsmatrix (AwK-6.1a).

Bewertungsgrundlage ist die Zuordnung des Quotienten aus repräsentativer Gebirgsdurchlässigkeit und repräsentativer Gesteinsdurchlässigkeit zu einer der folgenden Wertungsgruppen: „günstig“ (< 10), „bedingt günstig“ (10 bis 100), „weniger günstig“ (> 100).

Direkte Erkundungsziele:

- Gebirgsdurchlässigkeit (Transmissivität)
- Gesteinsdurchlässigkeit (Durchlässigkeitsbeiwert)

4.6.1.2 Erfahrungen über die Barrierewirksamkeit der Gebirgsformation (AwK-6.1b)

Als zweiten Indikator zählt das StandAG in Anlage 6 eine Reihe von Erfahrungsbereichen auf, auf deren Basis auf die Barrierewirksamkeit der entsprechenden Gebirgsformationen geschlossen werden kann (AwK-6.1b):

- 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

Die abgefragten Erfahrungsbereiche werden hinsichtlich der Veränderbarkeit der vorhandenen Gebirgsdurchlässigkeit bewertet. Bewertungsgrundlage ist die Einordnung der Gebirgsformation / des Gesteinstyps anhand einer oder mehrerer der oben genannten Erfahrungsbereiche in gering durchlässig bis geologisch dicht (Wertungsgruppe „günstig“) oder in nicht hinreichend gering durchlässig („weniger günstig“). Ist die Gebirgsformation / der Gesteinstyp mangels Erfahrung und Kenntnissen nicht unmittelbar/mittelbar als gering durchlässig bis geologisch dicht zu charakterisieren, ist der Indikator in die Wertungsgruppe „bedingt günstig“ einzuordnen.

Bei den durch diesen Indikator zu bewertenden Gesteinen handelt es sich um weit-räumig gefasste Gesteinsabfolgen, namentlich um Gebirgsformationen oder, noch umfassender, um Gesteinstypen. Zur Bewertung des Indikators AwK-6.1b hinsichtlich der Durchlässigkeit des jeweiligen Gesteins soll ausdrücklich auf Erfahrungen zugegriffen werden. Standortspezifische Kenntnisse oder Parameter sind nicht gefragt. Der Indikator AwK-6.1b zielt somit auf die grundsätzliche Übertragung von vorliegenden Erfahrungen auf die zu bewertende Gebirgsformation bzw. den Gesteinstyp ab (EL-KOM 2016). Diese Erfahrungen können nicht unmittelbar in allen zu erkundenden Gebieten vorliegen. Im Folgenden wird der Indikator AwK-6.1b als unterstützendes Argument verstanden, welches neben den weiteren Indikatoren bzw. Bewertungsgrößen, die auf standortspezifischen Erhebungen beruhen, grundsätzliche Erfahrungswerte in die Bewertung des Kriteriums einbezieht. Eine Herleitung direkter Erkundungsziele für diesen Indikator wird daher im vorliegenden Bericht nicht verfolgt.

Quellen für Erfahrungen über grundsätzliche Barrierewirksamkeiten mit den relevanten Gebirgsformationen können nach Beushausen et al. (2019) geowissenschaftliche Abhandlungen, möglichst mit Bezug zu regionalen Verhältnissen, sein.

Direkte Erkundungsziele:

- Keine

Zur Ergänzung der Erfahrungswerte bei nicht hinreichend bekannten geologischen Gegebenheiten („mangels Erfahrung“) sollten Informationen über die Barrierewirksamkeit der Gebirgsformationen in den genannten Erfahrungsbereichen durch zusätzliche Untersuchungen abgesichert werden. Für ein standortbezogenes Erkundungsprogramm können insbesondere die folgenden ergänzenden Erkundungsziele von Relevanz sein.

Ergänzende Erkundungsziele:

- Vorkommen wasserlöslicher Gesteine in den Gebirgsformationen
- Vorkommen von fossilen Fluideinschlüssen
- Ausweisung von Kohlenwasserstoffvorkommen (flüssig und gasförmig) im Liegenden des ewG

4.6.1.3 Duktilität des Gesteins (AwK-6.1c)

Der dritte Indikator umfasst die Duktilität des Gesteins (AwK-6.1c). Da es keine festgelegte Grenze gibt, ab welcher Bruchverformung ein Gestein als duktil bzw. spröde anzusprechen ist, soll dieses Kriterium laut StandAG nur bei einem Vergleich von Standorten angewandt werden. In diesem Zusammenhang ergeben sich für die übertägige Erkundung keine direkten Erkundungsziele.

Bewertungsgrundlage ist das Verhalten bei mechanischer Belastung: „günstig“ (duktil / plastisch-viskoses Materialverhalten), „bedingt günstig“ (spröd-duktil bis elasto-viskoplastisches Materialverhalten), „weniger günstig“ (spröd, linear-elastisches Materialverhalten).

Direkte Erkundungsziele:

- Keine

Für die Einengung von Standorten für die untertägige Erkundung kann dieser Indikator auf der Basis der Ergebnisse der übertägigen Erkundung als auch für die Anforderungen an die vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen zur Bewertung herangezogen werden. Daraus ergeben sich ergänzende Erkundungsziele.

Ergänzende Erkundungsziele:

- Duktilität und Sprödigkeit des Gesteins
- Kriechverhalten
- Dilatanzgrenze
- Bruchgrenze

4.6.2 Rückbildbarkeit von Rissen (AwK-6.2)

Diese bewertungsrelevante Eigenschaft beinhaltet die Indikatoren „Rückbildung der Sekundärpermeabilität durch Risssschließung“ (AwK-6.2a) sowie „Rückbildung der mechanischen Eigenschaften durch Rissverheilung“ (AwK-6.2b).

4.6.2.1 Rückbildung der Sekundärpermeabilität durch Risssschließung (AwK-6.2a)

Der Indikator AwK-6.2a bewertet, durch welche Materialeigenschaften und Prozesse sich die Sekundärpermeabilität durch Risssschließung im Wirtsgestein zurückbildet. Dies geschieht in Abhängigkeit von bestimmten physikalischen bzw. mechanischen Gesteinseigenschaften.

Direkte Erkundungsziele:

- Duktilität und Sprödigkeit des Gesteins
- Kriechverhalten
- Verfestigungsgrad, Quelfähigkeit, Art der Zementation (für Tonstein)

Für eine weitergehende Bewertung der Risssschließung und des Materialverhaltens der Gesteine des ewG können die folgenden ergänzenden Erkundungsziele von Relevanz sein.

Ergänzende Erkundungsziele:

- Auffinden geschlossener und offener Risse/Klüfte
- Dilatanzgrenze

4.6.2.2 Rückbildung der mechanischen Eigenschaften durch Rissverheilung (AwK-6.2b)

Der Indikator AwK-6.2b bewertet, inwieweit und durch welche geochemisch geprägte Prozesse Risse im Wirtsgestein verheilen und dadurch die ursprünglichen mechanischen Eigenschaften wiederhergestellt werden (Aktivierung atomarer Bindungskräfte im Rissflächenbereich). Hierfür sind Kenntnisse zu den mineralogisch-geochemischen Randbedingungen in Gesteinen und ggf. vorkommenden Lösungen von Bedeutung.

Direkte Erkundungsziele:

- Geochemie des Porenfluids („Lösungszusammensetzungen“)
- Mineralogie/Geochemie der Gesteine des ewG („Gesteinszusammensetzungen“)
- Gebirgstemperaturen
- Dichte, pH- und Eh-Werte von Lösungen
- Art der Zementation (für Tonstein)

Hinsichtlich einer „weniger günstigen“ Bewertung in diesem Kriterium durch geogene Zuführung und Auskristallisation von Sekundärmineralen (mineralisierte Poren- und Kluftwässer) können die folgenden ergänzenden Erkundungsziele von Relevanz sein.

Ergänzende Erkundungsziele:

- Auffinden verheilter und offener Risse/Klüfte
- Stoffliche Charakterisierung möglicher Kluftbeläge und ggf. von Lösungen oder Gasen

4.6.3 Zusammenfassende Beurteilung der Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten (AwK-6.3)

Für diesen Indikator ergibt sich kein eigenes Erkundungsziel, da es sich um eine zusammenfassende Beurteilung der einzelnen, oben genannten bewertungsrelevanten Eigenschaften/Indikatoren gemäß Anlage 6 StandAG handelt.

Direkte Erkundungsziele:

- Keine (zusammenfassende Beurteilung)

4.7 Gasbildung (AwK-7)

Gasbildung gehört zu den in § 24 Abs. 5 StandAG genannten Abwägungskriterien für weitere sicherheitsrelevante Eigenschaften. Gemäß Anlage 7 soll die Gasbildung unter Endlagerbedingungen möglichst gering sein. Als einziger Indikator wird das Wasserangebot im Einlagerungsbereich genannt (Tab. 10). Gasbildung kann zu einem Druckaufbau im ewG führen und damit die Integrität der Barriere gefährden (AkEnd 2002).

Tab. 10: Bewertungsrelevante Eigenschaften und Indikatoren des Abwägungskriteriums „Bewertung der Gasbildung“

Geowiss. Abwägungskriterium	Bewertungsrelevante Eigenschaft	Indikator
AwK-7 Gasbildung	AwK-7.1 Gasbildung	AwK-7.1a Wasserangebot im Einlagerungsbereich

Zur Gasbildung kann es durch Korrosion von Metallen (eingelagerte Behälter) und Brennstoffmatrix, Radiolyse, Zersetzung organischer Bestandteile, thermochemische Sulfatreduktion und Verdampfen von Wasser kommen (Wolf et al. 2012). Dabei ist zu erwarten, dass die Korrosion von Metallen das größte Gasvolumen bilden wird, gegenüber dem die Gasbildung durch die anderen Prozesse vernachlässigt werden kann (Rübel & Mönig 2007). Die Voraussetzung für die Gasbildung durch Metallkorrosion ist das Vorhandensein von Wasser im Einlagerungsbereich (Rübel & Mönig 2007, Wolf et al. 2012). Das Wasserangebot im Einlagerungsbereich (AwK-7.1a) setzt sich aus der vorhandenen Wassermenge und dem potenziellen Wasserzutritt zusammen. Ein Gestein ist als „feucht“ einzustufen, wenn „die zur Korrosion erforderliche Feuchtigkeit ansteht“, im anderen Fall als „trocken“ (AkEnd 2002).

Der potenzielle Wasserzutritt hängt von der Gebirgsdurchlässigkeit ab. Gesteine mit einer Gebirgsdurchlässigkeit $< 10^{-11}$ m/s gelten als dicht (Anlage 7 StandAG). Das Wirtsgestein Steinsalz kann in Salzstöcken als trocken angesehen werden, da es keinen durchströmbaren Porenraum besitzt (Herrmann & Knipping 1993, Jockwer 1981, Küster 2011, RESUS 2019). In allen anderen Fällen kann davon ausgegangen werden, dass die zur Korrosion des im Endlager vorhandenen Metallinventars erforderliche Wassermenge im Laufe des Betrachtungszeitraums von 1 Million Jahren zutreten wird und somit das Wirtsgestein prinzipiell als feucht angesehen werden muss. Im Falle eines feuchten Wirtsgesteins muss dessen Gebirgsdurchlässigkeit ermittelt werden, um eine Zuordnung zur Wertungsgruppe „bedingt günstig“ oder „weniger günstig“ vornehmen zu können.

Bewertungsgrundlage ist die Zuordnung des Wasserangebotes zu einer der Wertungsgruppen: „günstig“ (trocken), „bedingt günstig“ (feucht und dicht, Gebirgsdurchlässigkeit $< 10^{-11}$ m/s), „weniger günstig“ (feucht).

Direkte Erkundungsziele:

- Gebirgsdurchlässigkeit im ewG

Für Sicherheitsuntersuchungen können sämtliche Gasbildungsprozesse relevant sein, beispielsweise neben der Korrosion von Metall durch initial im ewG vorhandenes Wasser, die Zersetzung organischer Stoffe sowie mikrobielle Prozesse (RSK 2005).

Ergänzende Erkundungsziele:

- Gehalt an freiem Wasser im ewG
- Identifikation von Mikroorganismen und Bestimmung ihrer mikrobiellen Aktivität
- Gehalt an und Zusammensetzung von organischem Material

4.8 Temperaturverträglichkeit (AwK-8)

Nach Anlage 8 StandAG dürfen sich durch Temperaturänderungen infolge der Abfall-einlagerung keine Änderungen der Gesteinseigenschaften sowie Änderungen der thermomechanischen Gebirgsspannungen ergeben, die zu einem Festigkeitsverlust und der Bildung von Sekundärpermeabilitäten im Endlagerbereich führen (AwK-8.1a). Des Weiteren sind gemäß StandAG thermisch induzierte Mineralreaktionen im Wirtsgestein zu betrachten (AwK-8.1b), siehe Tab. 11.

Tab. 11: Bewertungsrelevante Eigenschaften und Indikatoren des Abwägungskriteriums „Bewertung der Temperaturverträglichkeit“

Geowiss. Abwägungskriterium	Bewertungsrelevante Eigenschaft	Indikator
AwK-8 Temperaturverträglichkeit	AwK-8.1 Temperaturbedingte Änderungen der Gesteinseigenschaften sowie Änderungen der thermomechanischen Gebirgsspannungen durch Einlagerung der radioaktiven Abfälle in den betroffenen Gesteinsformationen	AwK-8.1a Festigkeitsverlust / Neigung zur Bildung wärmeinduzierter Sekundärpermeabilitäten und ihre Ausdehnung im Endlagerbereich
		AwK-8.1b Temperaturstabilität des Wirtsgesteins hinsichtlich Mineralumwandlungen

Bei der Bewertung thermisch induzierter Veränderungen ist zwischen den Auswirkungen des gebirgsmechanischen Spannungszustands im ewG und des umgebenden Gebirges einerseits und den mineralogischen Veränderungen des Wirtsgesteins andererseits zu unterscheiden (EL-KOM 2016). Zur Beurteilung werden Informationen über das rezente, natürliche Temperatur- und Spannungsfeld benötigt. Temperaturänderungen haben zudem Einfluss auf zahlreiche petrophysikalische Parameter. Nach Jentzsch (2002) sind die wesentlichen Materialparameter, neben der spezifischen Wärmekapazität und der spezifischen Wärmeleitfähigkeit, die elastischen Module, die Viskosität/Plastizität sowie die Dichte und die Bruchfestigkeit. Die thermisch induzierten Spannungen können zu einer Auflockerung des Gebirges und zur Erhöhung der Gebirgsdurchlässigkeit führen. Diese ist von der Dilatanzgrenze des Gesteins abhängig (K-Drs 209j).

Die zu betrachtende maximale Temperatur an der Behälteroberfläche beträgt nach § 27 Abs. 4 StandAG aus Vorsorgegründen 100°C. Allerdings kann nach GRS (2019) dieser Wert nicht als Grenztemperatur verstanden werden, sondern ist eine vorsorgliche regulatorische Vorgabe, die sich aus bestehendem Forschungsbedarf begründet. Demnach kann diese Grenztemperatur wirtsgesteinsspezifisch zu einem späteren Zeitpunkt auch anders festgelegt werden (sowohl höher als auch niedriger), abhängig von den ausstehenden Forschungsergebnissen. Die Temperaturverträglichkeit bzw. das Verhalten eines Gesteinskörpers sowie die Abhängigkeit einzelner petrophysikalischer Parameter bei Temperaturänderung ist stark abhängig von dem betrachteten Wirtsgestein, der Versenkungsgeschichte und der dabei bereits erfahrenen Temperaturbelastung, der konkreten Gesteinszusammensetzung sowie den strukturellen Eigenschaften (z. B. Risse/Klüfte, Anisotropieflächen wie Schichtung bzw. Flaserung) (BGR 2016). Die maximale Temperatur, die das Gestein seit seiner Entstehung erfahren hat, kann über eine Rekonstruktion der regionalen Versenkungsgeschichte bestimmt werden.

Eine Erhöhung der Sekundärpermeabilität kann auch aufgrund von thermisch bedingten mineralogischen Veränderungen erfolgen (EL-KOM 2016). Im Rahmen der Erkundung sollten daher der Gehalt und die Verteilung von „temperaturkritischen“ Mineralen im Gestein bestimmt werden. Die Bildungstemperaturen für intakte (d. h. nicht gestörte oder geklüftete) kristalline Gesteine liegen derart über den zu erwartenden Endlagerbedingungen, dass für dieses Wirtsgestein keine temperaturinduzierten mineralogischen Umwandlungsprozesse zu erwarten sind (BGR 2016). Im Fall eines geklüfteten Gesteinskörpers sind die Kluff-mineralisationen zu untersuchen und zu bewerten.

Direkte Erkundungsziele:

- Thermischer Ausdehnungskoeffizient
- Spezifische Wärmekapazität
- Spezifische Wärmeleitfähigkeit
- Mineralogisch-geochemische Zusammensetzung des Gesteins und ggf. von Kluff-mineralisationen (insbesondere Gehalt und Verteilung von „temperaturkritischen“ Mineralen)
- Maximale Temperatur, die das Gestein seit seiner Entstehung erfahren hat (für Tongestein)
 - Illitkristallinität
 - Vitritreflexion
- Gesteinsdichte
- Rezent, natürliches Temperaturfeld
- Rezent, natürliches Spannungsfeld
- Mechanische Gesteinseigenschaften
 - Dilatanzgrenze
 - Bruchfestigkeit (Scher- und Zugfestigkeit)
 - E-Modul, Schermodul, Kompressionsmodul
 - Duktilität und Sprödigkeit des Gesteins

Eine große Zahl der petrophysikalischen Parameter und Kriterien, die in anderen Kriterien genannt sind (z. B. AwK-5, AwK-6, AwK-9 und AwK-10), ist temperaturabhängig. Dies ist bei der Erhebung der Daten zu berücksichtigen. Insbesondere ist zu beachten, dass das thermisch-mechanische Verhalten durch eine komplexe THMC-Kopplung beschrieben wird, die begleitende Modellberechnungen erfordert. Bei einem hohen Kerogenehalt im Tongestein kann es unter Wärmeeinwirkung zudem zu Gasbildungsprozessen kommen, die ggf. standortspezifisch zu beurteilen sind (Frieling et al. 2019).

Ergänzende Erkundungsziele:

- Temperaturabhängigkeit von
 - Kriechverhalten
 - Druckdiffusionskoeffizient
 - Lösungsgleichgewicht
 - Quellverhalten von Tongesteinen
 - Sorptionskoeffizient
 - Porenfluiddruck
- Gasbildungspotenzial
 - Identifikation von Mikroorganismen und Bestimmung ihrer Aktivität unter Temperatureinfluss
 - Vorkommen und Verteilung von Fluiden und Kohlenwasserstoffen

Die Neigung zur Bildung von sekundären Wegsamkeiten wird in den numerischen Berechnungen zur Integrität der geologischen Barriere durch das Dilatanz- und Fluiddruck-Kriterium unter Berücksichtigung der Einwirkung eines Endlagers, inklusive des Wärmepulses, geprüft (RESUS 2019). Zur Erfassung der betroffenen Gesteinsformationen ist eine numerische Modellberechnung der zeitlichen Entwicklung des Temperaturfeldes erforderlich.

4.9 Rückhaltevermögen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich (AwK-9)

Nach Anlage 9 StandAG sollen die barrierewirksamen Gesteine im ewG ein möglichst hohes Rückhaltevermögen gegenüber langzeitrelevanten Radionukliden besitzen, basierend auf den Gleichgewichts-Sorptionskoeffizienten sowie auf kolloidgetragenen Transporteigenschaften.

Indikatoren für das Rückhaltevermögen im ewG sind (siehe auch Tab. 12):

- a) die Sorptionsfähigkeit der Gesteine bzw. die Sorptionskoeffizienten von Radionukliden der folgenden Elemente: Cäsium, Chlor, Jod, Neptunium, Palladium, Plutonium, Protactinium, Technetium, Thorium, Uran, Zirkonium (AwK-9.1a);
- b) ein möglichst hoher Gehalt an Mineralphasen mit großer reaktiver Oberfläche wie Tonminerale, Eisen- und Mangan-Hydroxide und -Oxihydrate (AwK-9.1b);
- c) eine möglichst hohe Ionenstärke des Grundwassers in der geologischen Barriere (zur Einschränkung der Migration von Kolloiden sowie zum Zurückdrängen des Transportes anderer gelöster, geladener Komponenten) (AwK-9.1c);
- d) möglichst geringe Öffnungsweiten der Gesteinsporen, vorzugsweise im Nanometerbereich (zur Filtration von Kolloiden) (AwK-9.1d).

Tab. 12: Bewertungsrelevante Eigenschaften und Indikatoren des Abwägungskriteriums „Bewertung des Rückhaltevermögens im ewG“

Geowiss. Abwägungskriterium	Bewertungsrelevante Eigenschaft	Indikator
AwK-9 Rückhaltevermögen im ewG	AwK-9.1 Sorptionsfähigkeit der Gesteine des ewG	AwK-9.1a Sorptionskoeffizient der Gesteine (Kd-Wert für betreffende langzeitrelevante Radionuklide $\geq 0,001 \text{ m}^3/\text{kg}$)
		AwK-9.1b Gehalt an Mineralphasen mit großer reaktiver Oberfläche (Tonminerale, Fe- und Mn-Hydroxide u. -Oxihydrate)
		AwK-9.1c Ionenstärke des Grundwassers in der geologischen Barriere
		AwK-9.1d Öffnungsweiten der Gesteinsporen

Die Sorption verzögert sowohl den diffusiven als auch den advektiven Radionuklidtransport. Die Sorptionsfähigkeit der Gesteine ist mit dem Auftreten bestimmter Mineralphasen in den Gesteinen korreliert, wie z. B. Montmorillonit, Illit, Kaolinit, Pyrit. Falls mineralogische Analysen des Gesteins vorliegen, können daraus indirekt Rückschlüsse auf die Sorptionsfähigkeit des Gesteins gezogen werden. Dabei ist auch der Belag von Klüften und Störungen mit Sekundärmineralen von Bedeutung. Sorptionswerte sind standortspezifisch zu erheben, da sie beispielsweise von der lokalen Grundwasserzusammensetzung, dem Grundwasserchemismus (pH-Wert, Redoxpotenzial) und von sekundären Mineralphasen beeinflusst werden. Die Sorptionskoeffizienten sind zudem abhängig von den vorherrschenden Temperaturverhältnissen.

Puffert das Wirtsgestein eher niedrige Redoxpotenziale ab, dann werden die niedrigen Oxidationsstufen stabilisiert, welche bei fast allen Radionukliden stärker sorbieren bzw. sogar unlösliche Phasen bilden. Hat das Gestein eine Pufferkapazität für erhöhte pH-Werte, wird die Sorption von Kationen befördert und die von Anionen eingeschränkt. Bei fast allen Mineralen ist deren Oberflächenladung eine Funktion des pH-Wertes. Änderungen können die elektrostatische Anziehung verstärken oder abschwächen.

Direkte Erkundungsziele:

- Sorptionskoeffizienten (Kd-Wert) der Gesteine des ewG (gemäß Anlage 9 StandAG unter Berücksichtigung der Radionuklide der folgenden Elemente: Cäsium, Chlor, Jod, Neptunium, Palladium, Plutonium, Protactinium, Technetium, Thorium, Uran, Zirkonium)
- Gehalt an Mineralphasen mit großer reaktiver Oberfläche (Tonminerale, Eisen- und Mangan-Hydroxide und –Oxihydrate, Sekundärphasen an Klüften)
- Ionenstärke des Grundwassers in der geologischen Barriere
- Öffnungsweiten der Gesteinsporen, zum Nachweis, dass diese im Nanometerbereich liegen
- pH-Wert und Redoxpotenzial des Grundwassers
- Bestimmung der Gebirgstemperatur im ewG

Ergänzend zu den Sorptionskoeffizienten (Kd-Wert) der in Anlage 9 des StandAG genannten Elemente, können Sorptionskoeffizienten weiterer Elemente bestimmt werden, um z. B. in geochemischen Modellberechnungen und Laborversuchen das konkurrierende Sorptionsverhalten verschiedener Elemente/Nuklide zu untersuchen.

Zum anderen können weitere Elemente/Nuklide herangezogen werden, um das Sorptionsverhalten der im Gesetz genannten Radionuklide mit nicht radioaktiven Elemente/Nukliden abzubilden. Voraussetzung ist die Übertragbarkeit auf die in Anlage 9 des StandAG genannten Elemente.

Ergänzendes Erkundungsziel:

- Sorptionskoeffizienten (Kd-Wert) der Gesteine des ewG weiterer Elemente/Nuklide

4.10 Hydrochemische Verhältnisse (AwK-10)

Im Fokus des Kriteriums stehen Sachverhalte, die der Beurteilung der hydrochemischen Verhältnisse im ewG dienen. Nach Anlage 10 StandAG sollen sich die chemische Zusammensetzung der Tiefenwässer und die festen Mineralphasen des ewG 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 für die sicherheitsrelevante Eigenschaft sind (siehe auch Tab. 13):

- a) chemisches Gleichgewicht zwischen dem Wirtsgestein im Bereich des ewG und dem darin enthaltenen tiefen Grundwasser (AwK-10.1a),
- b) neutrale bis leicht alkalische Bedingungen (pH-Wert 7 bis 8) im Bereich des Tiefenwassers (AwK-10.1b),
- c) ein anoxisch-reduzierendes Milieu im Bereich des Tiefenwassers (AwK-10.1c),
- d) ein möglichst geringer Gehalt an Kolloiden und Komplexbildnern im Tiefenwasser (AwK-10.1d),
- e) eine geringe Karbonatkonzentration im Tiefenwasser (AwK-10.1e).

Tab. 13: Bewertungsrelevante Eigenschaften und Indikatoren des Abwägungskriteriums „Bewertung der hydrochemischen Verhältnisse“

Geowiss. Abwägungs-kriterium	Bewertungs-relevante Eigenschaft	Indikator
AwK-10 Hydrochemische Verhältnisse	AwK-10.1 Chemische Zusammensetzung der Tiefenwässer und der festen Mineralphasen des ewG wirken sich positiv auf die Rückhaltung der Radionuklide aus und greifen das Material technischer und geotechnischer Barrieren nicht an	AwK-10.1a Chemisches Gleichgewicht zwischen Wirtsgestein im Bereich des ewG und dem darin enthaltenen tiefen Grundwasser
		AwK-10.1b pH-Wert im Grundwasser (neutrale bis leicht alkalische Bedingungen (pH-Wert 7 bis 8) im Bereich des Tiefenwassers)
		AwK-10.1c Redoxpotential (anoxisch-reduzierendes Milieu im Bereich des Tiefenwassers)
		AwK-10.1d Gehalt an Kolloiden und Komplexbildnern
		AwK-10.1e Karbonatkonzentration

Zur Bewertung des chemischen Gleichgewichtes ist die Ermittlung der Sättigungsindizes für alle nachgewiesenen Mineralphasen notwendig. Dazu ist die Bestimmung der mineralogisch-geochemischen Zusammensetzung der Mineralphasen im ewG und des Chemismus der im ewG enthaltenen Grundwässer erforderlich.

Direkte Erkundungsziele:

- Mineralogisch-geochemische Zusammensetzung der Mineralphasen im ewG
- Chemismus der im ewG enthaltenen Grundwässer:
 - Geochemische Zusammensetzung
 - pH-Wert
 - Redoxpotenzial
 - Art und Gehalt an Kolloiden
 - Art und Gehalt an Komplexbildnern
 - Karbonatgehalt im Grundwasser

Für eine weitergehende Charakterisierung und insbesondere für die Durchführung geochemischer Modellberechnungen der Gleichgewichtsverhältnisse der im ewG enthaltenen Grundwässer können insbesondere die folgenden ergänzenden Erkundungsziele von Relevanz sein.

Ergänzende Erkundungsziele:

- Sauerstoffsättigung
- elektrische Leitfähigkeit
- Alkalinität
- Fluiddruck
- Temperatur
- Dichte

4.11 Schutz des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durch das Deckgebirge (AwK-11)

Nach Anlage 11 StandAG soll das Deckgebirge durch seine Mächtigkeit sowie seinen strukturellen Aufbau und seine Zusammensetzung möglichst langfristig zum Schutz des ewG gegen direkte oder indirekte Auswirkungen exogener Vorgänge beitragen. Indikatoren hierfür sind die Überdeckung des ewG 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 ewG ergeben können (Tab. 14).

Tab. 14: Bewertungsrelevante Eigenschaften und Indikatoren des Abwägungskriteriums
„Bewertung des Schutzes des ewG durch das Deckgebirge“

Geowiss. Abwägungskriterium	Bewertungs- relevante Eigenschaft	Indikator
AwK-11 Schutz des ewG durch das Deckgebirge	AwK-11.1 Schutz des ewG durch günsti- gen Aufbau des Deckgebirges gegen Erosion und Subrosion sowie ihre Folgen (insbesondere Dekompaktion)	AwK-11.1a Überdeckung des ewG mit grund- wasserhemmenden Gesteinen, Verbreitung und Mächtigkeit grund- wasserhemmender Gesteine im Deckgebirge
		AwK-11.1b Verbreitung und Mächtigkeit ero- sionshemmender Gesteine im Deckgebirge des ewG
		AwK-11.1c Strukturelle Komplikation im Deckgebirge (keine Ausprägung struktureller Komplikationen (z.B. Störungen, Scheitelgräben, Karststrukturen) im Deckgebirge, aus denen sich subrosive, hy- draulische oder mechanische Beeinträchtigungen für den ewG er- geben könnten)

Gemäß § 2 StandAG ist das Deckgebirge der Teil des Gebirges oberhalb des ewG und bei Endlagersystemen, die auf technischen und geotechnischen Barrieren beruhen, oberhalb des Einlagerungsbereichs.

4.11.1 Überdeckung des ewG mit grundwasserhemmenden Gesteinen (AwK-11.1a)

Der Indikator bewertet qualitativ (z. B. „vollständig“, „lückenhaft“, „unvollständig“, „fehlend“) die Mächtigkeit und die räumliche Verbreitung grundwasserhemmender Gesteine im Deckgebirge.

Den Festlegungen im Vorhaben RESUS entsprechend wird der Begriff grundwasserhemmend mit dem Begriff geringleitend gleichgesetzt (vgl. auch Beushausen et al. 2019). Die Grenze zwischen Grundwasserleiter und Grundwassergeringleiter liegt bei einem k_f -Wert von $1 \cdot 10^{-5}$ m/s (Grimmelmann et al. 1997).

Bewertungsgrundlage ist die Zuordnung des Überdeckungsgrades des ewG mit grundwasserhemmenden Gesteinen im Deckgebirge und ihrer Verbreitung zu einer der Wertungsgruppen: „günstig“ (mächtige vollständige Überdeckung, geschlossene Verbreitung), „bedingt günstig“ (flächenhafte, aber lückenhafte bzw. unvollständige Überdeckung; flächenhafte, aber lückenhafte bzw. unvollständige Verbreitung), „ungünstig“ (fehlende Überdeckung, Fehlen grundwasserhemmender Gesteine).

Direkte Erkundungsziele:

- Gebirgsdurchlässigkeiten der Deckgebirgsschichten und ihre räumliche Variabilität
- Räumliche Ausdehnung (Mächtigkeit und Verbreitung) von grundwasserhemmenden Gesteinen im Deckgebirge

4.11.2 Verbreitung und Mächtigkeit erosionshemmender Gesteine im Deckgebirge des ewG (AwK-11.1b)

Der Indikator bewertet qualitativ („vollständig“, „lückenhaft“, „unvollständig“, „fehlend“) den Grad der Überdeckung des ewG durch erosionshemmende Gesteine im Gebirgsverband und die Mächtigkeit dieser Einheiten in der Schichtenfolge des Deckgebirges.

Bewertungsgrundlage ist die Zuordnung des Überdeckungsgrades und der Verbreitung besonders erosionshemmender Gesteine im Deckgebirge zu einer der Wertungsgruppen: „günstig“ (mächtige vollständige Überdeckung, weiträumige geschlossene Verbreitung), „bedingt günstig“ (flächenhafte, aber lückenhafte bzw. unvollständige Überdeckung; flächenhafte, aber lückenhafte bzw. unvollständige Verbreitung), „ungünstig“ (fehlende Überdeckung, Fehlen erosionshemmender Gesteine).

Direkte Erkundungsziele:

- Räumliche Ausdehnung (Mächtigkeit und Verbreitung) von erosionshemmenden Gesteinen im Deckgebirge
- Physikalische Widerstandsfähigkeit:
 - Gesteinsfestigkeit
 - Trennflächengefüge
 - Homogenität des Gesteins
- Chemische Widerstandsfähigkeit (Löslichkeit)

4.11.3 Strukturelle Komplikationen im Deckgebirge (AwK-11.1c)

Der Indikator bewertet das Ausmaß der Veränderungen der ursprünglichen Struktur der Gesteinstypen im Deckgebirge hinsichtlich subrosiver, hydraulischer oder mechanischer Beeinträchtigungen für den ewG. Als Beispiele für strukturelle Komplikationen werden im StandAG (2017) Störungen, Scheitelgräben und Karststrukturen im Deckgebirge genannt. Ergänzend dazu werden im Folgenden auch glaziale Rinnen als strukturelle Komplikationen verstanden.

Bewertungsgrundlage ist die Zuordnung der Ausprägung struktureller Komplikationen im Deckgebirge zu einer der Wertungsgruppen: „günstig“ (Deckgebirge mit ungestörtem Aufbau), „bedingt günstig“ (strukturelle Komplikationen, aber ohne erkennbare hydraulische Wirksamkeit), „ungünstig“ (strukturelle Komplikationen mit potenzieller hydraulischer Wirksamkeit).

Direkte Erkundungsziele:

- Identifikation von Störungen, Scheitelgräben, Karststrukturen sowie glaziale Rinnen, deren räumliche Ausdehnung und hydraulische Wirksamkeit
- Vorkommen wasserlöslicher Gesteinstypen

Im Falle des Wirtsgesteins Steinsalz kann zusätzlich durch die Untersuchung von Subrosionserscheinungen auf strukturelle Komplikationen im Deckgebirge geschlossen werden.

Ergänzende Erkundungsziele:

- Subrosion am Salzspiegel (Wirtsgestein Steinsalz)
 - Tiefenlage des rezenten Salzspiegels
 - Räumliche Ausdehnung (Mächtigkeit und Verbreitung) und Durchlässigkeit des Hutgesteins
 - Rezente Subrosionsrate

5 Erkundungsziele zur Durchführung vorläufiger Sicherheitsuntersuchungen gemäß § 16 Abs. 1 und § 18 Abs. 1 StandAG

Nach § 14 Abs. 1 StandAG sind für die Standortregionen standortbezogene übertägige Erkundungsprogramme zu entwickeln und zwar nach Maßgabe sowohl der Anforderungen und Kriterien nach §§ 22 bis 24 als auch für die Durchführung der weiterentwickelten vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen nach § 16 Abs. 1 StandAG.

Mit einem Sicherheitsnachweis in einem Genehmigungsverfahren für ein Endlager nach § 9b i. V. m. 9a AtG ist mit einer für die Genehmigung erforderlichen, ausreichenden Gewissheit nachzuweisen, dass die nach Stand von Wissenschaft und Technik erforderliche Vorsorge gegen Schäden am Endlagerstandort durch die Errichtung, den Betrieb und die Stilllegung des Endlagers getroffen ist. Gegenüber eines Sicherheitsnachweises kann eine vorläufige Sicherheitsuntersuchung gemäß StandAG auch mit Annahmen arbeiten, solange entsprechende standortspezifische Kenntnisse nicht vorliegen, sondern erst später ermittelt werden.

In den vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen wird das Endlagersystem in seiner Gesamtheit betrachtet, wobei ihr geowissenschaftlicher Detaillierungsgrad aufgrund des Erkenntnisgewinns durch die Erkundungen von Phase zu Phase zunimmt. Zur Ableitung von Erkundungszielen für die übertägige Erkundung sind, neben den Kriterien und Anforderungen, auch diejenigen Sachverhalte relevant, die sich aus den Ergebnissen der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen für die Durchführung von weiterentwickelten vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen ergeben.

Grundlage für die Durchführung von vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß § 27 StandAG sind die durch Rechtsverordnungen festzulegenden „Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle“ (Endlagersicherheitsanforderungsverordnung – EndlSiAnfV) und die „Anforderungen an die Durchführung der vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen im Standortauswahlverfahren für die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle“ (Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung – EndlSiUntV). Diese Verordnungen befinden sich mit Entwurfsstand vom Juli 2019 (BMU 2019) derzeit in der Erarbeitung³ und sollen spätestens zum Zeitpunkt der Durchführung repräsentativer vorläufiger Sicherheitsuntersuchungen nach § 14 Abs. 1 Satz 2 StandAG vorliegen, welche im Anschluss an die Veröffentlichung des Zwischenberichts der BGE zu den Teilgebieten stattfinden (§ 13 Abs. 2 Satz 3 StandAG). Die Ergebnisse der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen liegen zum Ende der Phase 1 (vgl. Abb. 1) des Auswahlverfahrens vor (§ 14 StandAG).

³ Mit Stand vom Mai 2020 liegt die vom BMU zu erlassene Endlagersicherheitsanforderungsverordnung (EndlSiAnfV) sowie die Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung (EndlSiUntV) in einer aktuellen Fassung vor. Aufgrund der Aufgabenstellung des Arbeitspaketes sowie der inhaltlich abgeschlossenen Bearbeitung des vorliegenden Berichts blieben die Verordnungen bei der Zielebestimmung unberücksichtigt.

Da zum jetzigen Zeitpunkt die genannten Grundlagen fehlen, um umfassend mögliche Erkundungsziele aus den Ergebnissen der (repräsentativen) vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen und den an sie gestellten Anforderungen abzuleiten, finden diese keine systematische Berücksichtigung in der vorliegenden Zusammenstellung der Erkundungsziele.

Sofern jedoch zu einzelnen Kriterien und Anforderungen nach §§ 22 bis 24 StandAG Bedarfe auf Basis von Erfahrungen aus Langzeitsicherheitsnachweisen und geowissenschaftlichen Erkundungsprogrammen im Rahmen bisheriger Endlagerprojekte absehbar sind, wurden diese in den vorlaufenden Kapiteln als „ergänzende“ Erkundungsziele aufgenommen.

Die ergänzenden Erkundungsziele erheben, aufgrund der ausstehenden Vorgaben zur Durchführung von vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen, keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Sie können sich auf Erkundungsräume beziehen, die über die gesetzlich vorgegebenen räumlichen Geltungsbereiche (vgl. Tab. 6) hinausgehen. Die Erkundungsräume der ergänzenden Ziele lassen sich aus dem Kontext des jeweiligen Kriteriums bzw. der jeweiligen Anforderung und dem darin gesetzlich vorgegebenen räumlichen Geltungsbereich in den meisten Fällen plausibel ableiten.

Die Ungewissheit bei der Ableitung von ergänzenden Erkundungszielen aus den noch unbestimmten Anforderungen zur Durchführung weiterentwickelter vorläufiger Sicherheitsuntersuchungen zeigt sich beispielsweise daran, inwieweit sich aus der Durchführung von modellbasierten Radionuklidtransport-Prognoserechnungen zur Integrität der geologischen Barriere die Notwendigkeit ergibt, Sorptionskoeffizienten auch für die den ewG überlagernden Barrieren zu ermitteln. Dies ist durch das Abwägungskriterium zur Bewertung des Rückhaltevermögens des ewG (Anlage 9 des StandAG) nicht explizit mit abgedeckt und wird daher nicht als ergänzendes Erkundungsziel abgeleitet.

Zudem verfolgt das Prinzip „Sicherer Einschluss der radioaktiven Abfälle“ gemäß § 4 Abs. 1 EndlSiAnfV-Entwurf das Ziel, die einzulagernden radioaktiven Abfälle im Endlager-System zu konzentrieren und sicher einzuschließen sowie die darin enthaltenen Radionuklide mindestens im Nachweiszeitraum von der Biosphäre fernzuhalten. Der sichere Einschluss muss gemäß § 4 Abs. 4 EndlSiAnfV-Entwurf innerhalb der wesentlichen Barrieren nach § 4 Abs. 3 EndlSiAnfV-Entwurf so erfolgen, dass die Radionuklide aus den radioaktiven Abfällen weitestgehend am Ort ihrer ursprünglichen Einlagerung verbleiben. Der Entwurf zur EndlSiAnfV definiert wesentliche Barrieren als ein oder mehrere einschlusswirksame Gebirgsbereiche, die im Zusammenwirken mit den technischen und geotechnischen Verschlüssen den sicheren Einschluss gewährleisten. Damit wird gemäß Verordnungsbegründung verhindert, dass im Sicherheitsnachweis das radiologische Schutzziel nach § 7 EndlSiAnfV-Entwurf durch eine Verdünnung und Rückhaltung ausgetretener Radionuklide im Deckgebirge erreicht werden kann.

Aus diesem Ansatz heraus ist die Erhebung von Sorptionswerten für die den ewG überlagernden Barrieren nicht direkt ableitbar. Inwieweit sich diesbezüglich ergänzende Erkundungsziele im Zuge der Durchführung der Sicherheitsuntersuchungen, basierend auf einem Sicherheits-Nachweis-Konzept, Szenarienbetrachtungen, etc. dennoch ergeben, ist zum jetzigen Zeitpunkt nicht belastbar absehbar.

6 Zusammenfassung

Im Rahmen der Arbeitspakete GeoMePS und ZuBeMERk wird, basierend auf einer Auswertung von Literatur und von Erfahrungen in Standorterkundungsprogrammen und bisherigen Endlagerprojekten, der aktuelle Stand der Technik zu den übertägig und in Bohrungen einsetzbaren geowissenschaftlichen und geophysikalischen Untersuchungsmethoden erarbeitet und in Form einer relationalen Datenbank dokumentiert.

Im vorliegenden Bericht wurden Erkundungsziele für die übertägige Erkundung gemäß § 16 StandAG, für deren Bearbeitung geowissenschaftliche Methoden herangezogen werden können, zusammengestellt. Die Bestimmung „direkter“ Erkundungsziele berücksichtigt die Ausschlusskriterien (§ 22), Mindestanforderungen (§ 23) und geowissenschaftlichen Abwägungskriterien (§ 24). „Ergänzende“ Erkundungsziele ergeben sich aus absehbaren Anforderungen an die vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß StandAG sowie auf der Grundlage von Erfahrungen aus geowissenschaftlichen Erkundungsprogrammen und Langzeitsicherheitsnachweisen in bisherigen Endlagerprojekten. Die sich daraus ergebenden Erkundungsziele für die übertägige Standorterkundung wurden in den vorhergehenden Kapiteln aufgelistet.

Da zum jetzigen Zeitpunkt die Grundlagen fehlen, um umfassend die Erkundungsziele abzuleiten, die sich für die weiterentwickelten vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen ergeben könnten, finden diese keine systematische Berücksichtigung in der vorliegenden Zusammenstellung der Erkundungsziele.

Literaturverzeichnis

- AkEnd (2002): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte. Empfehlungen des AkEnd – Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte: 260 S.; Köln.
- Appel, D. & 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. Ausarbeitung für den Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte – AkEnd: 257 S.
- Beushausen, M., Bebiolka, A., Kloke, R., Kuhlmann, G., Noack, V., Reinhold, K., Röhling, S. & Sönnke, J. (2019): Konzept zur generellen Vorgehensweise zur Anwendung der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien – Schritt 2. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Abschlussbericht: 110 S.; Hannover/Berlin.
- BT-Drs. 18/11398: Entwurf eines Gesetzes zur Fortentwicklung des Gesetzes zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnder radioaktive Abfälle und anderer Gesetze. Einschließlich Begründung. Drucksache des Deutschen Bundestages 18/11398 vom 17.03.2017: 80 S.; Berlin.
- BGE (2019): Bericht der BGE mbH über die Durchführung des Standortauswahlverfahrens, II. Quartal 2019. Geschäftszeichen: SG01101/2-4/3-2019#4. Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE), Bericht: 21 S.; Peine.
- BGR (2016): Beratung der Endlagerkommission 9S2014010000. Antworten der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe zum Pflichtenheft „Literaturstudie Wärmeentwicklung-Gesteinsverträglichkeit“. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Bericht: 67 S.; Hannover.
- BMU (2019): Referentenentwurf „Verordnung über die sicherheitstechnischen Anforderungen an die Entsorgung hochradioaktiver Abfälle“. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, Bearbeitungsstand: 11.07.2019: 49 S; Berlin.
- Cartwright, I., Cendón, D., Currell, M. & Meredieth, K. (2017): A review of radioactive isotopes and other residence time tracers in understanding groundwater recharge: Possibilities, challenges, and limitations. *Journal of Hydrology*, 555: S. 797-811.
- Clark, I.D. & Fritz, P. (1997): *Environmental isotopes in hydrogeology*. CRC Press/Lewis Publishers: 328 S.; Boca Raton, USA.

- DIN EN 1998-1/NA 2011-01 (2011): Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter– Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben–Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbauten. Beuth Verlag GmbH: 31 S.; Berlin.
- EL-KOM (2016): Verantwortung für die Zukunft. Ein faires und transparentes Verfahren für die Auswahl eines nationalen Endlagerstandortes. Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, Abschlussbericht K-Drs. 268: 683 S.; Berlin.
- Frieling, G., Eckel, J. & Seher, H. (2019): THM-Prozessentwicklung von Tonstein unter Endlagerbedingungen. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-521, 165 S.; Braunschweig.
- Fröhlich, K. (1990): On dating of old groundwater. Isotopenpraxis, 26: S. 557-560.
- Grimmelmann, W., Hannemann, M., Hecht, G., Müller, A., Plum, H., Pretschold, H.-H., Scharpff, H.-J. & Schlimm, W. (1997): Hydrogeologische Kartieranleitung - Informationen aus den Bund/Länder-Arbeitsgruppen der Staatlichen Geologischen Dienste. Geologisches Jahrbuch, G 2: 157 S.; Hannover.
- GRS (2019): Untersuchungen zu den „maximalen physikalisch möglichen Temperaturen“ gemäß § 27 StandAG im Hinblick auf die Grenztemperatur an der Außenfläche von Abfallbehältern – Vorhaben 4717E03241. Ressortforschungsberichte zur Sicherheit der nuklearen Entsorgung. Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit: 370 S.; urn:nbn:de:0221-2019111520402.
- Herrmann, A. G. & Knipping, B. (1993): Fluide Komponenten als Teile des Stoffbestandes der Evaporite im Salzstock Gorleben. Vorkommen, Herkunft, Entstehung und Wechselwirkungen mit den Salzgesteinen. Institut für Mineralogie und mineralische Rohstoffe, Technische Universität Clausthal, Bericht: 140 S.; Clausthal-Zellerfeld.
- Jähne-Klingberg, F., Stück, H., Bebiolka, A., Bense, F. & Stark., L. (2019): Prognosemöglichkeiten von großräumigen Vertikalbewegungen für Deutschland. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Abschlussbericht: 139 S.; Hannover.
- Jentzsch, G. (2002): Temperaturverträglichkeit der Gesteine - Neigung zur Ausbildung von Wasserwegsamkeiten. Institut für Geowissenschaften, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Bericht: 28 S.; Jena.

- Jockwer, N. (1981): Laboratory investigation of water content within rock salt and its behavior in a temperature field of disposed high-level waste. In Moore, J.G. (Hrsg.), Scientific basis for nuclear waste management - Volume 3. Plenum Press: S. 35-42; New York.
- K-Drs. 209j (2016): Entwurf des Berichtsteils zu Teil B – Kapitel 6.5.4 bis 6.5.6 (Geowissenschaftliche Ausschluss-, Mindest- und Abwägungskriterien). Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, Kommissionsdrucksache K-Drs. 209j: 6 S.; Berlin.
- Kaiser, D. & Spies, T. (2020): Anwendung des Ausschlusskriteriums Seismische Aktivität. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Zwischenbericht: 23 S., B3.1/B50161-15/2020-0003/001; Hannover.
- Keller, S. (2009): Eiszeitliche Rinnensysteme und ihre Bedeutung für die Langzeitsicherheit möglicher Endlagerstandorte mit hochradioaktiven Abfällen in Norddeutschland. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Abschlussbericht: 24 S.; Hannover.
- Kockel, F., Krull, P., Fischer, M., Frisch, U., Heßmann, W. & Stiewe, H. (1995): Endlagerung stark wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands – Untersuchung und Bewertung von Salzformationen. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Abschlussbericht; 66 S.; Hannover.
- Küster, Y. (2011): Bromide characteristics and deformation mechanisms of naturally deformed rock salt of the German Zechstein Basin. Dissertation, Georg-August-Universität Göttingen: 221 S.; Göttingen.
- Lippmann, J., Rübel, A., Osenbrück, K. & Sonntag, S. (1998): Dating porewater in rock samples from fresh drilling cores. Depth profiles of stable isotopes, noble gases and chloride in hydraulically impermeable geological formations. Proceedings from Isotope Techniques in the Study of Environmental Change, IAEA-SM-349/36: S. 465-472; Wien.
- May, F. (2019): Möglichkeiten der Prognose zukünftiger vulkanischer Aktivität in Deutschland. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Kurzbericht: 87 S.; Hannover.
- Menpes, R. (1997): Tertiary uplift and its implications for the tectonic evolution of sedimentary basins, offshore south-west United Kingdom. Dissertation, University of Adelaide: 178 S.; Adelaide, Australien.

- Neukum, C., Seibert, S., Post, V., Königer, P., Bäumle, R., Desens, A. & Houben, G. (2020): Ausschlusskriterium Grundwasseralter. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Zwischenbericht: in Vorb.; Hannover.
- Osenbrück, K., Lippmann, J. & Sonntag, C. (1998): Dating very old pore waters in impermeable rocks by noble gas isotopes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62: S. 3041-3045.
- RESUS (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) gGmbH, Unveröffentlichter interner Zwischenbericht: 131 S.; Hannover, Peine, Braunschweig.
- RSK (2005): Gase im Endlager. Stellungnahme der Reaktorsicherheitskommission (RSK) vom 27.01.2005 (379. Sitzung). RSK/ESK-Geschäftsstelle beim Bundesamt für Strahlenschutz: 20 S., Bonn.
- Rübel, A.P., Sonntag, C., Lippmann, J., Pearson, F.J. & Gautschi, A. (2002): Solute transport in formations of very low permeability: Profiles of stable isotopes and dissolved noble gas contents of pore water in Opalinus Clay, Mont Terri, Switzerland. *Geochimica and Cosmochimica Acta*, 88: S. 1311-1321.
- Rübel, A. & Mönig, J. (2008): Gase in Endlagern im Salz - Workshop der GRS in Zusammenarbeit mit PTKA-WTE. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-242: 191 S.; Braunschweig.
- Rufer, D., Waber, H.N., Eichinger, F. & Pitkänen, P. (2017): Helium in porewater and rocks of crystalline bedrock from the Fennoscandian Shield, Olkiluoto (Finland). *Procedia Earth and Planetary Science*, 17: S. 762-765.
- Schlosser, P., Stute, M., Dörr, H., Sonntag, C. & Münnich, K.O. (1988): Tritium/³He dating of shallow groundwater. *Earth and Planetary Science Letters*, 89: S. 353-362.
- StandAG (2017): Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle. 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 (Standortauswahlgesetz - StandAG).

- Stück, H., Bense, F., Frenzel, B., Henneberg, M., Kneuker, T., Lang, J., Mertineit, M., Noack, V. & Pollok, L. (2020): Ausschlusskriterium „Aktive Störungszonen“. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Abschlussbericht; 115 S.; Hannover.
- Stuiver, M. & Polach, H.A. (1977): Discussion: Reporting of ^{14}C data. Radiocarbon, 19: S. 355-363.
- Sültenfuß, J. & Massmann, G. (2004): Datierung mit der ^3He -Tritium-Methode am Beispiel der Uferfiltration im Oderbruch. Grundwasser, 9: S. 221-234.
- Tolstikhin, I.N. & Kamensky, I.L. (1969): Determination of groundwater ages by the T- ^3He method. Geochemistry International, 6: S. 810-811.
- van Rensbergen, P. & Morley, C. K. (2000): 3D seismic study of a shale expulsion syncline at the base of the Champion delta, offshore Brunei and its implications for the early structural evolution of large delta systems. Marine and Petroleum Geology, 17: S. 861-872.
- Weitkamp, A. & Bebiolka, A.C. (2017): Subglaziale Rinnen – Darstellung und Bewertung des Kenntnisstands. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Abschlussbericht: 35 S.; Hannover.
- WHG (2018): Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz - WHG) vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585), zuletzt geändert durch Artikel 2 des Gesetzes vom 4. Dezember 2018 (BGBl. I S. 2254).
- Wolf, J., Behlau, J., Beuth, T., Bracke, G., Bube, C., Buhmann, D., Dresbach, C., Hammer, J., Keller, S., Kienzler, B., Klinge, H., Krone, J., Lommerzheim, A., Metz, V., Mönig, J., Mrugalla, S., Popp, T., Rübél, A. & Weber, J.R. (2012): FEP-Katalog für die VSG – Dokumentation. Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-283: 848 S., Braunschweig.

Abkürzungsverzeichnis

Abs.	Absatz
AK	Ausschlusskriterium
AkEnd	Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte
AtG	Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz)
AwK	Abwägungskriterium
BGE	Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
EL-KOM	Endlagerkommission
EndISiAnfV	Endlagersicherheitsanforderungsverordnung
EndISiUntV	Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung
ewG	Einschlusswirksamer Gebirgsbereich
GeoMePS	Zusammenstellung und Bewertung von geowissenschaftlichen Methoden und Programmen für die übertägige Standorterkundung
GOK	Geländeoberkante
GRS	Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH
Gz.	Geschäftszeichen
MA	Mindestanforderung
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
StandAG	Standortauswahlgesetz
ZuBeMERk	Zusammenstellung und Bewertung von geophysikalischen Methoden zur übertägigen Erkundung

Tabellenverzeichnis	Seite
Tab. 1: Ausschlusskriterien gemäß § 22 StandAG	11
Tab. 2: Mindestanforderungen gemäß § 23 StandAG	20
Tab. 3: Bewertungsrelevante Eigenschaften und Indikatoren des Abwägungs- kriteriums „Transport radioaktiver Stoffe durch Grundwasserbewegungen im ewG“	27
Tab. 4: Bewertungsrelevante Eigenschaften und Indikatoren des Abwägungs- kriteriums „Bewertung der Konfiguration der Gesteinskörper“	31
Tab. 5: Bewertungsrelevante Eigenschaften und Indikatoren des Abwägungs- kriteriums „Bewertung der räumlichen Charakterisierbarkeit“	36
Tab. 6: Räumlicher Geltungsbereich der Abwägungskriterien gemäß den Anlagen 1 bis 11 des StandAG	38
Tab. 7: Bewertungsrelevante Eigenschaften und Indikatoren des Abwä- gungskriteriums „Bewertung der langfristigen Stabilität der günstigen Verhältnisse“	43
Tab. 8: Bewertungsrelevante Eigenschaften und Indikatoren des Abwägungs- kriteriums „Bewertung der günstigen gebirgsmechanischen Eigen- schaften“	47
Tab. 9: Bewertungsrelevante Eigenschaften und Indikatoren des Abwägungs- kriteriums „Bewertung der Neigung zur Bildung von Fluidwegsamkeiten“ ...	49
Tab. 10: Bewertungsrelevante Eigenschaften und Indikatoren des Abwägungs- kriteriums „Bewertung der Gasbildung“	55
Tab. 11: Bewertungsrelevante Eigenschaften und Indikatoren des Abwägungs- kriteriums „Bewertung der Temperaturverträglichkeit“	57
Tab. 12: Bewertungsrelevante Eigenschaften und Indikatoren des Abwägungs- kriteriums „Bewertung des Rückhaltevermögens im ewG“	60
Tab. 13: Bewertungsrelevante Eigenschaften und Indikatoren des Abwägungs- kriteriums „Bewertung der hydrochemischen Verhältnisse“	63
Tab. 14: Bewertungsrelevante Eigenschaften und Indikatoren des Abwägungs- kriteriums „Bewertung des Schutzes des ewG durch das Deckgebirge“	65

Abbildungsverzeichnis	Seite
Abb. 1: Schematische Darstellung vom Ablauf des Standortauswahlverfahrens (BGE 2019)	6
Abb. 2: Grundlagen für die übertägige Erkundung	9
Abb. 3: Grundlagen für die untertägige Erkundung (nicht Gegenstand dieses Berichts)	10