Geschäftsstelle

Kommission
Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe
K-Drs. 209d

Kommission
Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe
gemäß § 3 Standortauswahlgesetz

Entwurf des Berichtsteils zu Teil B – Kapitel 6.5.4 bis 6.5.6 (Geowissenschaftliche Ausschluss-, Mindest- und Abwägungskriterien)

Vorlage der Vorsitzenden der AG 3 für die 31. Sitzung der Kommission am 15. Juni 2016

DRITTE LESUNG
BEARBEITUNGSSTAND: 09.06.2016

Bearbeitungsstand: Nach 30. Sitzung der Kommission am 02.06.2016

Stand 09.06.2016

Inhaltsverzeichnis

1.	**6.5.3 Unterschiedliche Kriterien und ihre Funktion im Auswahlverfahren**	Fehler! Textmarke nicht definiert.	
2.	**6.5.4 Geowissenschaftliche Ausschlusskriterien**	**5**	
2.1.	**6.5.4.1 Großräumige Vertikalbewegungen**	**5**	
2.2.	**6.5.4.2 Aktive Störungszonen**	**5**	
2.3.	**6.5.4.3 Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit**	**5**	
2.4.	**6.5.4.4 Seismische Aktivität**	**6**	
2.5.	**6.5.4.5 Vulkanische Aktivität**	**6**	
2.6.	**6.5.4.6 Grundwasseralter**	**6**	
3.	**6.5.5 Geowissenschaftliche Mindestanforderungen**	**6**	
3.1.	**6.5.5.1 Gebirgsdurchlässigkeit**	**6**	
3.2.	**6.5.5.2 Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs**	**7**	
3.3.	**6.5.5.3 Minimale Tiefe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs**	**7**	
3.4.	**6.5.5.4 Maximale Tiefe des Einlagerungsbereichs**	**8**	
3.5.	**6.5.5.5 Fläche des Endlagers**	**8**	
3.6.	**6.5.5.6 Erkenntnisse zum einschlusswirksamen Gebirgsbereich hinsichtlich des Nachweiszeitraums**	**9**	
4.	**6.5.6 Geowissenschaftliche Abwägungskriterien**	**10**	
4.1.	**6.5.6.1 Gewichtungsgruppe 1: Güte des Isolationsvermögens und Zuverlässigkeit des Nachweises**	**12**	
4.1.1.	6.5.6.1.1 Anforderung 1: Kein oder langsamer Transport durch Grundwasser im einschlusswirksamen Gebirgsbereich	12	
4.1.2.	6.5.6.1.2 Anforderung 2: Günstige Konfiguration der Gesteinskörper, insbesondere von Wirtsgestein und einschlusswirksamem Gebirgsbereich	15	
4.1.3.	6.5.6.1.3 Anforderung 3: Gute räumliche Charakterisierbarkeit	22	
4.1.4.	6.5.6.1.4 Anforderung 4: Gute Prognostizierbarkeit der langfristigen Stabilität der günstigen Verhältnisse	23	
4.2.	**6.5.6.2 Gewichtungsgruppe 2: Absicherung des Isolationsvermögens**	**25**	
4.2.1.	6.5.6.2.1 Anforderung 5: Günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen	25	
4.2.2.	6.5.6.2.2 Anforderung 6: Geringe Neigung zur Bildung von Wasserwegsamkeiten in Wirtsgesteinskörper / einschlusswirksamem Gebirgsbereich	26	
4.3.	**6.5.6.3 Gewichtungsgruppe 3: Weitere sicherheitsrelevante Eigenschaften**	**29**	
4.3.1.	6.5.6.3.1 Anforderung 7: Gute Bedingungen zur Vermeidung bzw. Minimierung der Gasbildung	29	
4.3.2.	6.5.6.3.2 Anforderung 8: Gute Temperaturverträglichkeit	30	
4.3.3.	6.5.6.3.3 Anforderung 9: Hohes Rückhaltevermögen der Gesteine des einschlusswirksamen Gebirgsbereich gegenüber Radionukliden	32	

4.3.4. 6.5.6.3.4 Anforderung 10: Günstige hydrochemische Verhältnisse 34
4.4. Zusätzliche weitere Abwägungskriterien 36
4.4.1. 6.5.6.3.5 Anforderung 11 :Hohes Rückhaltevermögen der Gesteine im Deckgebirge von Salzstöcken gegenüber Radionukliden 36
4.4.2. 6.5.6.3.6 Anforderung 12: Schützender Aufbau des Deckgebirges 36

1. 6.5.4 Geowissenschaftliche Ausschlusskriterien

1.1. 6.5.4.1 Großräumige Vertikalbewegungen

Eine Standortregion mit einer zu erwartenden großräumigen geogenen Hebung von im Mittel mehr als 1 mm pro Jahr im Nachweiszeitraum (~1 Mio. Jahre) wird ausgeschlossen. Eine Standortregion soll möglichst geringe tektonisch bedingte großräumige Hebungen aufweisen.

Erläuterung: Großräumige Hebungen eines Gebirgsbereiches in dem ein Endlager eingebettet ist, könnten dazu führen, dass an der Geländeoberfläche verstärkt Erosion auftritt, die die notwendige Schutzwirkung der Überdeckung des Endlagers beeinträchtigen kann[1].

1.2. 6.5.4.2 Aktive Störungszonen

Im einschlusswirksamen Gebirgsbereich inklusive eines Sicherheitsabstands dürfen keine geologisch aktiven Störungszonen vorhanden sein, die das Endlagersystem und insbesondere den einschlusswirksamen Gebirgsbereich sowie die technischen und geotechnischen Barrieren beeinträchtigen können. Unter einer „aktiven Störungszone“ werden sowohl Verwerfungen mit deutlichem Gesteinsversatz als auch Zerrüttungszonen mit tektonischer Entstehung verstanden. Als "aktive Störungen" mit Sicherheitsrelevanz für ein Endlager werden Verwerfungen angesehen, an denen nachweislich oder mit großer Wahrscheinlichkeit im Zeitraum Rupel (ein geologischer Zeitraum, der vor etwa 34 Mio. Jahren beginnt) bis heute Bewegungen stattgefunden haben. Atektonische bzw. aseismische Vorgänge (also Vorgänge, die nicht aus den Gesetzen der Tektonik abgeleitet werden können oder nicht auf seismische Aktivitäten zurückzuführen sind), die zu ähnlichen sicherheitlichen Konsequenzen wie tektonische Störungen führen können, sind wie diese zu behandeln[2].

Erläuterung: Die mutmaßlichen Breiten von Störungszonen sind individuell abzuschätzen. Da eine exakte Zonenbreite in der Regel nicht festlegbar ist, sollte für eine Ausweisung von Gebieten mit besonders ungünstigen Verhältnissen ein "Sicherheitsaufschlag" von einigen Kilometern beidseits der erkannten Zone festgelegt werden[3].

1.3. 6.5.4.3 Einflüsse aus gegenwärtiger oder früherer bergbaulicher Tätigkeit

In der Standortregion darf das Gebirge nicht durch gegenwärtige oder frühere bergbauliche Tätigkeit so geschädigt sein, dass daraus negative Einflüsse auf den Spannungszustand und die Permeabilität des Gebirges im Bereich des Endlagers und insbesondere des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches zu besorgen sind. Erkundungsmaßnahmen im Rahmen des Standortauswahlverfahrens sind so zu planen und durchzuführen, dass der einschlusswirksame Gebirgsbereich nur im für den erforderlichen Informationsgewinn unvermeidlichen Ausmaß verritzt und seine Integrität nicht gefährdet wird.
Das Endlager muss in einem neu aufzufahrenden Bergwerk errichtet werden. Vorhandene alte Bohrungen dürfen den umgebenden einschlusswirksamen Gebirgsbereich in seiner Einschlussfunktion nachweislich nicht beeinträchtigen
Auffahrung, Betrieb und Offenhaltung des Erkundungsbergwerkes Gorleben bleiben davon unberührt.

Erläuterung: Da im ersten Schritt des Standortauswahlverfahrens noch keine gebirgsmechanischen Standsicherheitsberechnungen erfolgen, müssen die Einflüsse aus gegenwärtiger und früherer bergbaulicher Tätigkeit zunächst qualitativ abgeschätzt werden.

---

[1] Vgl. AkEnd (2002). Auswahlverfahren für Endlagerstandorte. K-MAT 1, S. 86-87.
[2] Vgl. AkEnd (2002). Auswahlverfahren für Endlagerstandorte. K-MAT 1, S. 87-88.
[3] Vgl. AkEnd (2002). Auswahlverfahren für Endlagerstandorte. K-MAT 1, S. 88.

1.4. 6.5.4.4 Seismische Aktivität

In der Standortregion dürfen die zu erwartenden seismischen Aktivitäten nicht größer sein als in Erdbebenzone 1[4] nach DIN EN 1998-1 / NA 2011-01.

1.5. 6.5.4.5 Vulkanische Aktivität

In der Standortregion darf kein quartärer oder zukünftig zu erwartender Vulkanismus vorliegen.

Erläuterung[5]: Ein Magmenzutritt in das Endlager ist zu vermeiden, da Temperatur-spannungen, vulkanische Beben und induzierte Bewegungen an Störungen die Integrität des Endlagers beeinträchtigen und über den Zutritt von Grundwasser die Barriere-Wirkung verringern können. Beim Ausschluss von Gebieten mit vulkanischer Aktivität ist zusätzlich ein Sicherheitssaum von 10 km um potenziell gefährdete Bereiche zu berücksichtigen.
Der AKEnd kam zur Einschätzung der vulkanischen Gefährdung in Deutschland auf Grundlage einer Expertenumfrage[6] zu dem Ergebnis, dass in Deutschland außer den Gebieten Eifel und Vogtland/Egergraben keine weiteren Gebiete mit einer vulkanischen Gefährdung benannt werden müssen. Das Wiederaufleben des Vulkanismus in der Eifel im Prognosezeitraum in der Größenordnung von einer Million Jahren ist als sicher anzunehmen. Anzeichen einer bevorstehenden Eruption sollten sich in einem Zeitraum von ca. ein bis zwei Jahren zuvor ankündigen. Im Bereich des Vogtlands und in der angrenzen-den Region Nordwestböhmens besteht nach dem vorliegenden Kenntnisstand eine Wahrscheinlichkeit von etwa 50 % für das Wiederaufleben des Vulkanismus im westlichen Teil des Egergrabens.

1.6. 6.5.4.6 Grundwasseralter

Im einschlusswirksamen Gebirgsbereich bzw. im Einlagerungsbereich dürfen keine jungen Grundwässer vorliegen. In diesen Grundwässern dürfen daher Tritium und Kohlenstoff-14 nicht in Konzentrationen über dem natürlichen Hintergrundniveau nachweisbar sein.

Erläuterung: Junge Grundwässer deuten auf eine Teilnahme des Grundwassers am hydrologischen Kreislauf hin. Die auf Grund der Tritium-/Kohlenstoff-14-Konzentrationen errechneten Grundwasseralter müssen dabei validiert und ggfs. durch weitere geochemische und isotopen-hydrogeologische Hinweise überprüft werden[7].

2. 6.5.5 Geowissenschaftliche Mindestanforderungen

2.1. 6.5.5.1 Gebirgsdurchlässigkeit

Im einschlusswirksamen Gebirgsbereich muss die Gebirgsdurchlässigkeit k_f weniger als 10^{-10} m/s betragen. Sofern ein direkter Nachweis in der ersten und zweiten Phase der Standortsuche noch nicht möglich ist, muss nachgewiesen werden, dass der einschlusswirksame Gebirgsbereich aus Gesteinstypen besteht, denen eine Gebirgsdurchlässigkeit kleiner als 10^{-10} m/s zugeordnet werden kann.
Die Erfüllung des Kriteriums kann auch durch überlagernde Schichten nachgewiesen werden. Der einschlusswirksame Gebirgsbereich befindet sich damit außerhalb des Wirtsgesteins (Fall Bb nach AK End[8]).

---

[4] Vgl. AkEnd (2002). Auswahlverfahren für Endlagerstandorte. K-MAT 1, S. 89-91.

[5] Vgl. AkEnd (2002). Auswahlverfahren für Endlagerstandorte. K-MAT 1, S. 91-93.

[6] Vgl. JENTZSCH, G. (2001). Vulkanische Gefährdung in Deutschland. Entwicklung eines Kriteriums zum Ausschluss von Gebieten für die weitere Untersuchung hinsichtlich der Eignung als Standort eines Endlagers für radioaktive Abfälle. K-Mat 12-14.

[7] Vgl. AkEnd (2002). Auswahlverfahren für Endlagerstandorte. K-MAT 1, S. 94-95.

[8] Vgl. AkEnd (2002). Auswahlverfahren für Endlagerstandorte. K-MAT 1, S. 131-135.

Erläuterung: Grundsätzlich gilt, dass die Gebirgsdurchlässigkeit möglichst gering sein soll, damit ein advektiver Flüssigkeitstransport vermieden wird und allenfalls ein diffusiver Stofftransport erfolgt[9].
Kristallingesteine können zwar über homogene Bereiche mit sehr geringen Gesteinsdurchlässigkeiten (k_f < 10^{-10} m/s) verfügen, die Gebirgsdurchlässigkeit über Trennflächen (Klüfte, Verwerfungen) kann jedoch deutlich erhöht sein. Demnach sind bei der Erkundung Homogenbereiche auszuweisen, in denen mächtige, hydraulisch aktive Störungszonen nicht vorhanden sind. Zwischen eventuell auftretenden, hydrogeologisch relevanten Störungszonen müssen unter Beachtung von Sicherheitsabständen möglichst homogene und minimal deformierte Gesteinsblöcke geringer Durchlässigkeit ausgewiesen werden. Deshalb ist für den Nachweis der Standorteignung eine detaillierte Erfassung und hydrogeologische Bewertung des strukturellen Inventars erforderlich[10]*. Günstig für eine Radionuklidrückhaltung ist das Vorkommen alterierter Gesteinsvarietäten mit guten Sorptionseigenschaften in diesen Gebieten. Die Gesteine sollten demnach im Nah- und Fernfeld des Endlagers über gut ausgebildete Isolations- bzw. Radionuklidfixierungseigenschaften verfügen.*
Der Kenntnisstand wird jedoch zu Beginn des Auswahlverfahrens noch nicht vollständig zur genauen Abgrenzung dieser Bereiche ausreichen. Wenn für Kristallingesteinsformationen geologische Informationen (z.B. ein entsprechend hoher Durchtrennungsgrad, hydrogeologisch relevante oder hydraulisch aktive Störungszonen) vorliegen die erwarten lassen, dass die Gebirgsdurchlässigkeit größer ist als 10^{-10} m/s, werden diese Kristallingesteinsformationen ausgeschlossen.
Der Nachweis der Isolation kann auch durch überlagernde dichte Gesteine (Ton/Salz) erfolgen[11]*. Der einschlusswirksame Gebirgsbereich liegt dabei außerhalb des Wirtsgesteins (Fall Bb nach AK End*[12]*).*

2.2. 6.5.5.2 Mächtigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs

Der einschlusswirksame Gebirgsbereich muss mindestens 100 m mächtig sein[13].

Kommentiert [JSe1]: Min Wenzel macht ergänzenden Satz zu Kristallin.

Erläuterung: Da der einschlusswirksame Gebirgsbereich eine Mächtigkeit von mindestens 100 m aufweisen soll, sind im Rahmen der Standortauswahl Wirtsgesteinsbereiche mit Barrierefunktion auszuweisen, die hinreichend mächtig sind um den einschlusswirksamen Gebirgsbereich aufzunehmen.
Die Herleitung der Mindestmächtigkeit durch den AkEnd beruht ursprünglich auf Überlegungen zu "Gesteinstypen mit sehr kleinen Gebirgsdurchlässigkeiten"[14]*, in denen das Konzept des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs über das gesamte Endlagervolumen uneingeschränkt gültig ist.*
Für potenzielle Standorte mit Kristallingestein ergibt sich hieraus einerseits der Anspruch, entsprechend große homogene Kristallinbereiche auszuweisen (s.a. Kapitel 6.5.4.1), andererseits sind auch Kristallinbereiche denkbar, in denen gemäß anderen Nachweiskonzepten entsprechend Kapitel 5.5.4 vorgegangen wird. In diesen Fällen ist aber auch das Barrierenkonzept im Kristallin mit einem langzeitsicherheitlichen Schwerpunkt auf der Kombinationswirkung aus Behälter und geotechnischer Barriere ein anderes (s.a. Kap. 6.8).

Kommentiert [MS2]: Text angepasst aufgrund der Diskussion in der Kommissionssitzung und den Ausführungen in Kapitel 5.5.4.

2.3. 6.5.5.3 Minimale Tiefe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs

Die Oberfläche des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs muss mindestens 300 m unter der Geländeoberfläche liegen. In Gebieten, in denen im Nachweiszeitraum mit exogenen Prozessen zu rechnen ist, deren direkte oder indirekte Auswirkungen zur Beeinträchtigung der Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs führen können, muss die Oberfläche des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs tiefer als die zu erwartende größte Tiefe der Auswirkungen liegen.

---

[9] Vgl. AkEnd (2002). Auswahlverfahren für Endlagerstandorte. K-MAT 1, S. 95 und S. 113-129.

[10] Vgl. Ziegenhagen, J., Hammer, J., Fahrenholz, C. et al. (2005). Anforderungen an die Standorterkundung für HAW-Endlager in Hartgesteinen (ASTER).- Abschlussbericht, BMWA, FKZ 02E9612 und 02E 9622.

[11] Vgl. Schreiber, U., Ewert, T. & Jentzsch, G. (2015). Geologische Potenziale zur Einlagerung von radioaktiven Abfallstoffen unterhalb von stratiformen Salzformationen.- Universität Duisburg-Essen. K-MAT 42.

[12] Vgl. AkEnd (2002). Auswahlverfahren für Endlagerstandorte. K-MAT 1, S. 131-135.

[13] Vgl. AkEnd (2002). Auswahlverfahren für Endlagerstandorte. K-MAT 1, S. 96.

[14] Vgl. AkEnd (2002). Auswahlverfahren für Endlagerstandorte. K-MAT 1, S. 96

Für den Endlagersystemtyp Steinsalz in steiler Lagerung (Salzstöcke) muss die Salzschwebe über dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich zur Berücksichtigung der möglichen zukünftigen Subrosion mindestens 300 m mächtig sein.
Für den Endlagersystemtyp Tonstein muss die nach Eintreten der zu erwartenden exogenen Prozesse verbleibende Deckgebirgsmächtigkeit ausreichen, um eine Beeinträchtigung der Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durch Dekompaktion ausschließen zu können.

Erläuterung (s.a. AkEnd-Bericht[15],): Durch die Festlegung der Mindesttiefe des ein-schlusswirksamen Gebirgsbereichs unter Berücksichtigung möglicherweise regional auftretender exogener Prozesse (insbesondere intensiver Erosion) soll verhindert werden, dass die Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durch deren direkte und indirekte Folgen (z.B. Freilegung bzw. Dekompaktion des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs bzw. des Wirtsgesteins, verstärkte Subrosion), beeinträchtigt wird. Beispielsweise muss im nord-deutschen Tiefland für künftige Eiszeiten die Entstehung tiefer subglazialer Rinnen angenommen werden. Die Oberfläche des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs muss hinreichenden Abstand zur erwartbaren tiefsten Basisposition solcher Rinnen aufweisen, abzuleiten aus der größten bekannten Rinnentiefe zuzüglich eines den prognostischen Ungewissheiten Rechnung tragenden Sicherheitsaufschlags.

2.4. 6.5.5.4 Maximale Tiefe des Einlagerungsbereichs

Diese Anforderung des AkEnd entfällt aus Sicht der Kommission.

Begründung: Die Tiefe eines Endlagerbergwerks ergibt sich aus der örtlichen geologischen Situation, dem Einlagerungskonzept, der bergtechnischen Machbarkeit und ggf. zusätzlichen Anforderungen an die Arbeitssicherheit unter Tage (e.g. Umgebungstemperatur). Die Suche nach einem Endlagerstandort sollte für eine Einlagerungstiefe zwischen 500 und 1000 m erfolgen. Je nach Einlagerungskonzept (z.B. vertikale Bohrlochlagerung) können auch größere Tiefen erreicht oder notwendig werden. Die an einem bestimmten Standort erforderliche Einlagerungstiefe kann also von Standort zu Standort sehr unterschiedlich sein. Unter diesen Randbedingungen ist die Kommission, abweichend vom Vorschlag des AkEnd, der Auffassung, dass es nicht sinnvoll ist, für die maximale Tiefe des Einlagerungsbereichs eine Mindestanforderung zu definieren.

2.5. 6.5.5.5 Fläche des Endlagers

Der einschlusswirksame Gebirgsbereich muss über eine Ausdehnung in der Fläche verfügen, die eine Realisierung des Endlagers ermöglicht.
In den Flächenbedarf des Endlagers eingeschlossen sind Flächen, die für die Realisierung von Maßnahmen zur Rückholung von Abfallbehältern oder zur späteren Auffahrung eines Bergungsbergwerks zur Bergung von Abfallbehältern erforderlich sind und verfügbar gehalten werden müssen.

Erläuterung: Im Rahmen der Auswahl der Standortregionen (1. Schritt des Auswahlverfahrens) ist der einschlusswirksame Gebirgsbereich eines Endlagers noch nicht bekannt. Für die Größe des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches einschließlich des gesamten Endlagerbergwerks wurde im AkEnd-Bericht für Salz von einer Fläche von 3 km^2 und für Tonstein von 10 km^2 ausgegangen[16]. Die Kommission hat diese Angaben zur erforderlichen Mindestfläche durch ein Gutachten überprüfen lassen[17]. Das Gutachten hat für die dort untersuchten Szenarien folgende Mindestflächenbedarfe errechnet:

[15] Vgl. AkEnd (2002). Auswahlverfahren für Endlagerstandorte. K-MAT 1, S. 96
[16] Vgl. AkEnd (2002). Auswahlverfahren für Endlagerstandorte. K-MAT 1, S. 96-97.
[17] Vgl. DBEtec (2016): Gutachten Flächenbedarf für ein Endlager für wärmeentwickelnde, hoch radioaktive Abfälle. K-MAT 58.

Tabelle XYZ01: Gesamtendlagerflächenbedarf entsprechend DBE (2016)

Endlagervariante / Flächenermittlung	Salz 200°C	Salz 100°C	Tonstein 100°C	Granit 100°C
Erforderliche Pfeilerbreite zwischen Einlagerungsstrecken	2,0 x Breite der Strecke	2,0 x Breite der Strecke	5,0 x Breite der Strecke	2,5 x Höhe der Strecke
Erforderliche Endlagerfläche für Gebinde (m²)	800.800	1.632.600	4.871.000	2.212.700
Erforderlicher Sicherheitsabstand (m)	50	50	40	100
Erforderliche Endlagerfläche aus Sicherheitsabstand (m²)	228.000	401.200	1.082.000	1.026.000
Erforderliche Fläche für Infrastrukturbereich (m²)	250.000	250.000	630.000	320.000
Gesamtendlagerfläche (m²)	**1.278.800**	**2.283.800**	**6.583.000**	**3.558.700**

Die Kommission nimmt das Gutachten als Orientierung zur Kenntnis, ist aber auch der Auffassung, dass der tatsächliche Flächenbedarf im Rahmen der Standortauswahl leicht deutlich größer sein kann, beispielsweise durch zusätzliche Sicherheitspfeiler oder zur Flexibilisierung der Endlagergeometrie.
Nach dem Bericht zum Nationalen Entsorgungsprogramm sollen zudem weitere Abfallmengen aus der Urananreicherung und aus dem Endlager Asse – sofern ein geeigneter Standort für ein Kombilager gefunden werden kann - in das Endlager für hoch radioaktive Abfälle aufgenommen werden sollen. Bei der Berechnung der Flächenausdehnung eines Endlagers muss auch das Lagerkonzept einschließlich der Zugangsstrecken, Untertagelabors, Verschlussbauwerke usw. beachtet werden.
Im Vergleich zu den in dem Gutachten errechneten Mindestflächenbedarfen können die Ansätze des AkEnd als konservativ angesehen werden. Sie eignen sich daher im Rahmen der Standortauswahl nach wie vor als Mindestanforderungen für den Standortauswahlprozess und können daher beibehalten werden.

2.6. 6.5.5.6 Erkenntnisse zum einschlusswirksamen Gebirgsbereich hinsichtlich des Nachweiszeitraums

Es dürfen keine Erkenntnisse oder Daten vorliegen, welche die Einhaltung der geowissenschaftlichen Mindestanforderungen zur Gebirgsdurchlässigkeit, Mächtigkeit und Ausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches und damit seine Integrität über einen Zeitraum von einer Million Jahren zweifelhaft erscheinen lassen[18].

[18] Vgl. AkEnd (2002). Auswahlverfahren für Endlagerstandorte. K-MAT 1, S. 97.

3. 6.5.6 Geowissenschaftliche Abwägungskriterien

Ziel des Standortauswahlverfahrens ist es, einen Standort zu finden, der die bestmögliche Sicherheit für eine Isolation der Abfälle von den Schutzgütern für einen Zeitraum von einer Million Jahren gewährleistet. Nachdem unter Anwendung der geowissenschaftlichen Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen geologische Suchräume ausgewiesen wurden, soll mit Hilfe der nachfolgend genannten Abwägungskriterien beurteilt werden, ob in einem Teilgebiet bzw. einer Standortregion eine insgesamt günstige geologische Gesamtsituation vorliegt. Dabei gilt grundsätzlich, dass ein einzelnes Abwägungskriterium nicht hinreichend ist, um die günstige geologische Gesamtsituation nachzuweisen oder auszuschließen. Die günstige geologische Gesamtsituation ergibt sich also nicht aus der besonders guten Erfüllung eines einzelnen Kriteriums, sondern aus der Summe der Erfüllung (bzw. Erfüllungsgrade) aller Anforderungen und deren Kriterien. Dabei sind nicht nur die im Folgenden quantifizierten Indikatoren Gegenstand der Prüfung, sondern die vollständige Beschreibung der jeweiligen Anforderung.
Eine günstige geologische Gesamtsituation ist ein Teilziel. Sie ist dem Gesamtziel, eine hinsichtlich der Sicherheit des Endlagers günstige Gesamtsituation zu erreichen untergeordnet. Die Sicherheit des Endlagers wird im Rahmen von Sicherheitsuntersuchungen beurteilt.

Die geowissenschaftlichen Abwägungskriterien sind im Folgenden in *[endgültige Anzahl]* Anforderungen und drei Gewichtungsgruppen gegliedert, die sich zunächst an der Bedeutung der Anforderung für das zentrale Ziel des Einschlusses im ewG orientieren:

Gewichtungsgruppe 1: Güte des Einschlussvermögens und Zuverlässigkeit des Nachweises

- Anforderung 1: Kein oder langsamer Transport durch Grundwasser im Endlagerniveau
- Anforderung 2: Günstige Konfiguration der Gesteinskörper, insbesondere von Wirtsgestein und einschlusswirksamem Gebirgsbereich
- Anforderung 3: Gute räumliche Charakterisierbarkeit
- Anforderung 4: Gute Prognostizierbarkeit der langfristigen Stabilität der günstigen Verhältnisse

Gewichtungsgruppe 2: Absicherung des Einschlussvermögens

- Anforderung 5: Günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen
- Anforderung 6: Geringe Neigung zur Bildung von Wasserwegsamkeiten in Wirtsgesteinskörper / einschlusswirksamem Gebirgsbereich

Gewichtungsgruppe 3: Weitere sicherheitsrelevante Eigenschaften

- Anforderung 7: Gute Bedingungen zur Vermeidung bzw. Minimierung der Gasbildung
- Anforderung 8: Gute Temperaturverträglichkeit
- Anforderung 9: Hohes Rückhaltevermögen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs gegenüber Radionukliden
- Anforderung 10: Günstige hydrochemische Verhältnisse

Es wird z. Zt. noch darüber diskutiert, den Katalog der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien um weitere Kriterien zu ergänzen, deren Einordnung in die zugehörigen Gewichtungsgruppe mit Verabschiedung dieser neuen Abwägungskriterien noch erfolgen muss. In der Diskussion stehen diesbezüglich:

- [Anforderung 11: Hohes Rückhaltevermögen der Gesteine im Deckgebirge gegenüber Radionukliden]
- [Anforderung 12: Schützender Aufbau des Deckgebirges]

Die geowissenschaftlichen Abwägungskriterien kommen erstmals in Schritt 2 der Phase 1 des Standortauswahlverfahrens zur Anwendung und gelten ab dann für den gesamten weiteren Abwägungsprozess bis zum Abschluss der Phase 3 mit der Auswahl des Endlagerstandorts.
Sie dienen in Schritt 2 der Phase 1 zunächst der Ausweisung von Teilgebieten mit günstigen geologischen Voraussetzungen. In Schritt 3 der Phase 1 sollen sie im Rahmen einer vertiefenden Abwägung zusammen mit repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen und der Anwendung planungswissenschaftlicher Kriterien, dazu dienen, Standortregionen für die übertägige Erkundung auszuweisen (Abschluss Phase 1).
In den Phasen 2 und 3 treten auf Basis der zunehmenden standortbezogenen Informationen aus der übertägigen und untertägigen Erkundung schrittweise Sicherheitsuntersuchungen (s.a. Kapitel 6.5.2) auf Basis noch generischer Endlagerkonzepte hinzu, die mit dem Kenntnisgewinn iterativ verfeinert und an die Standortverhältnisse angepasst werden. Aus dem Vergleich der jeweils betrachteten Standortregionen bzw. Standorte ergeben sich zum Abschluss der Phase 2 Vorschläge für die untertägige Erkundung und schlussendlich der Vorschlag für den Standort mit der bestmöglichen Sicherheit (Abschluss Phase 3).
Anhand der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien werden in diesem Prozess Unterschiede in der Standorteignung herausgearbeitet. Ihre Gruppierung verweist dabei auf die Bedeutung des jeweiligen Kriteriums beim Einschluss der radioaktiven Abfälle und gibt daher auch Auskunft über seinen Rang innerhalb des Abwägungsprozesses: Gewichtungsgruppe 1 hat die höchste Bedeutung, gefolgt von Gewichtungsgruppe 2; Gewichtungsgruppe 3 ist beim Vergleich von Standortregionen oder Standorten zwar ebenfalls wichtig, in der Abwägungsrangfolge aber nachgeordnet.

In die Gewichtungsgruppe 1 (Güte des Einschlussvermögens und Zuverlässigkeit des Nachweises) sind dabei diejenigen Abwägungskriterien eingeordnet, mit denen im Vergleich von Standortregionen oder Standorten untereinander die Qualität des Einschlusses der radioaktiven Stoffe am Ort ihrer Endlagerung, sowie die Zuverlässigkeit der Nachweisführung für den Nachweis der Langzeitsicherheit bewertet werden. Beides sind im Hinblick auf die Endlagerung zentrale Aspekte die darauf hinweisen, dass

a) am potenziellen Ort der Einlagerung ein langzeitsicherer Einschluss radioaktiver Stoffe möglich ist
b) dies auch im Rahmen eines Nachweisverfahrens mit hinreichender Gewissheit gezeigt und für den Nachweiszeitraum prognostiziert werden kann.

Das Einschlussvermögen am Ort der Einlagerung, sei es durch Ausweisung und Nachweis eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (ggf. auch mehrerer) oder durch Zusammenwirken technischer, geotechnischer und geologischer Barrieren in einer langzeitstabilen Umgebung, ist die zentrale geologische Eigenschaft des gesamten Endlagersystems, und ist insofern das primäre Standortmerkmal nach dem im Auswahlverfahren gesucht wird. Die Gewichtungsgruppe 1 ist daher für den Auswahlprozess von größter Bedeutung. Im Rahmen der Abwägung geht es dabei um den Vergleich und die Rangfolgenbildung von Standortregionen oder Standorten, bei den das Einschlussvermögen gegenüber radioaktiven Abfällen grundsätzlich erwartet werden kann. Das Fehlen des Einschlussvermögens am Ort der Einlagerung würde zum Ausschluss aus dem Verfahren führen, daher wären derartige Standorte bereits nicht mehr Gegenstand der geowissenschaftlichen Abwägung.
Bei der Abwägung auftretende relative Nachteile beim Einschlussvermögen oder bei der Zuverlässigkeit der Nachweisführung können nicht durch Kriterien der anderen Gewichtungsgruppen kompensiert werden. Beispielsweise lässt sich ein fehlender oder im Vergleich schwächerer einschlusswirksamer Gebirgsbereich in der Abwägung nicht gleichwertig durch ein sorptionsfähiges Deckgebirge ersetzen.

Gewichtungsgruppe 2 (Absicherung des Einschlussvermögens) enthält Abwägungskriterien mit denen bewertet werden kann, wie gut das Gebirge sein Einschlussvermögen gegenüber Beanspruchungen aufrecht erhält, die bei Errichtung und Betrieb von untertägigen Hohlräumen des Endlagers entstehen. Günstige Eigenschaften sind eine hohe Tragfähigkeit des Gebirges, also eine hohe Stabilität der aufzufahrenden Hohlräume, eine möglichst geringe Neigung zur Gebirgsauflockerung, eine möglichst geringe Neigung zur Bildung neuer oder Reaktivierung fossiler Wasserwegsamkeiten im einschlusswirksamen Gebirgsbereich sowie die Fähigkeit, auf Rissbildung mit Selbstheilungsprozessen zu reagieren. Da diese Eigenschaften bis zu einem gewissen Grad durch geotechnische Maßnahmen beim Ausbau des Endlagers verbessert und daher Abwägungsnachteile ggf. technisch kompensiert werden können, sind sie als Gewichtungsgruppe 2 der ersten Gewichtungsgruppe nachgeordnet.

Gewichtungsgruppe 3 enthält Abwägungskriterien, mit denen die Robustheit des Endlagersystems bewertet wird. Sie verweisen darauf, dass die Funktion des Endlagers nicht mit dem Nachweiszeitraum endet, sondern dass der Einschluss nach menschlichem Ermessen zeitlich unbegrenzt erhalten bleiben soll, und das Eigenschaften, die dies unterstützen, in der Abwägung ansonsten gleichwertiger Standorte positiv zu werten sind. Günstige Eigenschaften in dieser Gewichtungsgruppe sind für den formalen Nachweis der Langzeitsicherheit eines Endlagers nicht zwingend erforderlich, stärken und erhöhen aber die Sicherheit das Gesamtsystems über das in den Gewichtungsgruppen 2 und 3 bewertete Einschlussvermögen hinaus, indem beispielsweise im Nahfeld der Abfälle ein günstiges Milieu zur Minimierung von Korrosion, und Gasbildung herrscht, oder die Wärme aus den Abfällen schnell und ohne Mineralumbildung in das Gestein abgeführt und dem Aufbau eines kritischen Gasdrucks entgegen gewirkt wird. Der Fähigkeit zum Radionuklidrückhalt im Gestein des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs limitiert oder verhindert den Radionuklidtransport in die Biosphäre für den Fall einer Freisetzung aus den Abfällen. Ein Deckgebirge, dass den einschlusswirksamen Gebirgsbereich zusätzlich vor ungünstigen Einwirkungen (z.B. Erosion, Subrosion, glaziale Rinnen) schützt und/oder zusätzlich Radionuklide zurückhalten kann, steigert die Robustheit des Endlagersystems ebenfalls.
In der Zuordnung der Abwägungskriterien zu einer der Gewichtungsgruppen kommt also zum Ausdruck, dass die Abwägungskriterien im Hinblick auf die Sicherheit des auszuwählenden Standorts unterschiedliche Bedeutung haben, die z.T. auch konzept- und wirtsgesteinsspezifisch unterschiedlich sein kann. Die Unterschiede sind bei der Abwägung zwischen Standortregionen oder Standorten zu berücksichtigen. Auch Kombinationswirkungen können abwägungsrelevant sein. Aus diesem Grund sind in jedem Prozessschritt für die darin betrachteten Standortregionen oder Standorte alle Anforderungen mit ihren zugehörigen Abwägungskriterien entsprechend dem jeweiligen Informationsstand zu betrachten und abzuprüfen. Es kann auch grundsätzlich keine der Anforderungen unter Verweis auf andere Anforderungen in der Betrachtung entfallen.

Für Bewertung und Vergleich der jeweils zu betrachtenden Standortregionen bzw. Standorte ist ein verbal-argumentativer Abwägungsprozess erforderlich. Formale Aggregationsregeln, insbesondere solche mit kompensatorischer Aggregierung der Einzelergebnisse der Kriterienanwendung, hält die Kommission nicht für zielführend. Die abwägende vergleichende Gesamtbetrachtung aller Anforderungen erfolgt mit dem Ziel, Standortregionen bzw. Standorte mit möglichst günstiger Gesamtausprägung ihrer sicherheitsgerichteten geologischen Merkmale auszuweisen, Unterschiede anhand sicherheitsbezogener Vorteile und Nachteile der Standortregionen bzw. Standort transparent zu machen und hieraus eine Auswahl für den jeweils folgenden Prozessschritt abzuleiten. In jedem Schritt können auf Basis vorhandener Kenntnisse und des erzielten Kenntnisgewinns die Vorteile und Nachteile sowie die daraus ableitbare Sicherheit der Standorte iterativ überprüft und bewertet werden. Im Verlauf dieses Prozesses gewinnen die Ergebnisse der detaillierter werdenden Sicherheitsuntersuchungen gegenüber den Abwägungskriterien an Bedeutung. Über Sensitivitätsanalysen können robustere von weniger robusten Merkmalskombinationen unterschieden werden. Dabei sind auch Änderungen in der anfänglichen Rangfolge sowie Rücksprungmöglichkeiten zu zunächst zurückgestellten Standorten mit zu bedenken.

3.1. 6.5.6.1 Gewichtungsgruppe 1: Güte des Isolationsvermögens und Zuverlässigkeit des Nachweises

3.1.1. 6.5.6.1.1 Anforderung 1: Kein oder langsamer Transport durch Grundwasser im einschlusswirksamen Gebirgsbereich

Die Anforderung "kein oder langsamer Transport durch Grundwasser im Endlagerniveau" charakterisiert für die sichere Endlagerung radioaktiver Abfälle günstige hydrogeologische Verhältnisse. Als günstig werden diese dann bezeichnet, wenn sowohl das Grundwasserangebot an die Abfälle als auch die Grundwasserbewegung im einschlusswirksamen Gebirgsbereich gering ist: Ein geringes Grundwasserangebot begrenzt u.a. die Korrosion der Abfallbehälter und damit die Freisetzung von Radionukliden aus den Abfällen. Eine geringe Grundwasserbewegung ist Bedingung für einen langsamen advektiven Transport von Schadstoffen aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich. Als Bewertungsgröße dafür wird die Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers herangezogen. Diese errechnet sich aus der Entfernung, die das Grundwasser in einer Zeiteinheit zurücklegt. Unter stagnierenden Grundwasserbedingungen kommt lediglich Diffusion als Transportmechanismus in Frage.

Zugehörige Kriterien:

- Die Grundwasserströmung im einschlusswirksamen Gebirgsbereich, ausgedrückt als Abstandsgeschwindigkeit, sollte möglichst gering, d. h. deutlich kleiner als 1 mm pro Jahr sein.
- Das **Grundwasserangebot** im einschlusswirksamen Gebirgsbereich sollte möglichst gering sein. Der einschlusswirksame Gebirgsbereich sollte daher aus Gesteinstypen bestehen, die erfahrungsgemäß eine geringe Gebirgsdurchlässigkeit aufweisen.
- Die **Diffusionsgeschwindigkeit** im einschlusswirksamen Gebirgsbereich, erfasst durch den effektiven Diffusionskoeffizienten, sollte möglichst gering (kleiner 10^{-11} m²/s) sein.

Zu den Bewertungsgrößen dieser Kriterien liegen in der ersten Phase des Auswahlverfahrens voraussichtlich keine ausreichenden Informationen vor. Solange diese Situation Bestand hat, kommen ersatzweise folgende Indikatoren zur Anwendung:
Als Indikator für die Beurteilung von Grundwasserströmung und Grundwasserangebot werden die charakteristischen Gebirgsdurchlässigkeiten der Wirtsgesteinstypen Steinsalz, Tonstein und Kristallin benutzt[19]. Da zunächst auch dazu keine Informationen vorliegen werden, kommt der Gesteinstyp selbst als Indikator für die Gebirgsdurchlässigkeit zum Einsatz[20]:

Indikator: "Gesteinstyp" für Gebirgsdurchlässigkeit, Abstandsgeschwindigkeit und Grundwasserangebot

Zugehöriges Kriterium:

Der einschlusswirksame Gebirgsbereich sollte aus Gesteinstypen bestehen, die erfahrungsgemäß geringe Gebirgsdurchlässigkeiten aufweisen (die dafür in der unten stehenden Tabelle XYZ02 für die Bewertungsgröße Grundwasserangebot angegebenen Werte gelten auch für die Bewertungsgröße Abstandsgeschwindigkeit).
Von den potenziellen Wirtsgesteinstypen kann das jeweilige Vorhandensein von Steinsalz und Tonstein als Indikatoren für geringe Gebirgsdurchlässigkeit angesehen werden, weil die Wahrscheinlichkeit, dass Gesteinskörper dieser Gesteinstypen die geforderte geringe Gebirgsdurchlässigkeit aufweisen, relativ groß ist. Allerdings ist im Rahmen des weiteren Auswahlverfahrens zu zeigen, dass grundsätzlich nicht ausschließbare durchlässigkeitserhöhende Eigenschaften, wie Inhomogenitäten oder wassergängige Trennfugen, bei einem betrachteten Gesteinskörper nicht ausgeprägt sind bzw. keine das Einschlussvermögen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs gefährdende Bedeutung haben.
Das Vorhandensein von Kristallingestein eignet sich nur eingeschränkt als Indikator für geringe Gebirgsdurchlässigkeit, weil Gesteinskörper dieses Gesteinstyps typischerweise durchlässigkeitserhöhende Trennfugen oder Klüfte aufweisen. Das macht die Existenz von Gesteinskörpern mit geringer Gebirgsdurchlässigkeit weniger wahrscheinlich (schließt sie aber, wie Beispiele zeigen, nicht aus) und führt ggf. zu einem anderen Sicherheitskonzept.

Mögliche weitere Indikatoren für das Fehlen einer Grundwasserbewegung bzw. für eine nur geringe Grundwasserbewegung im einschlusswirksamen Gebirgsbereich, für die der AkEnd keine Kriterien abgeleitet wurden, sind:

- auf Dauer "trockenes" Gestein[21]
- Temperaturverteilung im tiefen Untergrund[22]
- teufenabhängige Zunahme der Grundwasserdichte[23]
- "tatsächliches" Alter des Grundwassers im einschlusswirksamen Gebirgsbereich

[19] Vgl. AkEnd (2002). Auswahlverfahren für Endlagerstandorte. K-MAT 1, S. 114ff.
[20] Vgl. AkEnd (2002). Auswahlverfahren für Endlagerstandorte. K-MAT 1, S. 121.
[21] Vgl. AkEnd (2002). Auswahlverfahren für Endlagerstandorte. K-MAT 1, S. 113.
[22] Vgl. AkEnd (2002). Auswahlverfahren für Endlagerstandorte. K-MAT 1, S. 121ff.
[23] Vgl. AkEnd (2002). Auswahlverfahren für Endlagerstandorte. K-MAT 1, S. 126.

In Phase 1 des Auswahlverfahrens sind die mit diesen Indikatoren verbundenen Sachverhalte im Rahmen der vertiefenden Abwägung zu betrachten, soweit entsprechende Informationen vorliegen.

Diffusion in wassergesättigten Gesteinen ist gegenüber der in freiem Wasser eingeschränkt. In den die Diffusionsgeschwindigkeit charakterisierenden effektiven Diffusionskoeffizienten gehen neben dem begrenzten Porenvolumen zusätzlich die eingeschränkte Zugänglichkeit von Poren geringer Öffnungsweite (Konstriktivität) und besonders die zur Verlängerung der Migrationsweges führende gewundene Form von Poren (Tortuosität) ein.

Im Hinblick auf den diffusiven Stofftransport durch den einschlusswirksamen Gebirgsbereich ist sicher zu stellen, dass die Migrationszeiten von Radionukliden möglichst dem geforderten Isolationszeitraum entsprechen[24]. Daher muss die Ausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs auf die Diffusionsgeschwindigkeit der Radionuklide abgestimmt werden: Dazu wird als Modell eine 50 m mächtige Barriere angenommen, die einseitig mit einer erhöhten Ausgangskonzentration eines idealen Tracers beaufschlagt wird. Die geforderte geringe Diffusionsgeschwindigkeit bedeutet, dass die Konzentration des Tracers bei Austritt aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich über einen Zeitraum von einer Million Jahren unterhalb von 1 % der Ausgangskonzentration verbleibt. Dies ist bei einem effektiven Diffusionskoeffizienten < 10^{-11} m^2/s der Fall (Zuweisung der Werte zu den Wertungsgruppen in der nachfolgenden Tabelle XYZ02)[25].

Tabelle XYZ02: Transport durch Grundwasser: Eigenschaften, Bewertungsgrößen bzw. Indikatoren und Erfüllungsfunktionen der Kriterien

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße bzw. Indikator des Kriteriums [Dimension]	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig
Grundwasserströmung	**Abstandsgeschwindigkeit** des Grundwassers [mm/a]	< 0,1	0,1 - 1	> 1
Grundwasserangebot	Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit des Gesteinstyps [m/s]	< 10^{-12}	10^{-12} - 10^{-10}	
Diffusionsgeschwindigkeit	Charakteristischer effektiver Diffusionskoeffizient des Gesteinstyps für tritiiertes Wasser (HTO) bei 25°C [m^2/s]	< 10^{-11}	10^{-11} - 10^{-10}	> 10^{-10}

Zum effektiven Diffusionskoeffizienten liegen als Maß für die Diffusionsgeschwindigkeit in konkreten Gesteinsvorkommen zu Beginn des Standortauswahlverfahrens keine ausreichenden Information 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[26]). Hier nehmen Diffusionsgeschwindigkeit und effektiver Diffusionskoeffizient wie die Porosität mit zunehmendem Kompaktions- bzw. Verfestigungsgrad des Gesteins generell ab, so dass beide Eigenschaften als Indikatoren in Frage kommen:

[24] Vgl. AkEnd (2002). Auswahlverfahren für Endlagerstandorte. K-MAT 1, S. 127ff.

[25] Wichtige Aspekte der sicherheitlichen Beurteilung von Diffusion, die im Rahmen von Sicherheitsuntersuchungen zu behandeln sind (u.a. Abhängigkeit des Diffusionskoeffizienten vom diffundierenden Ion, von der Temperatur und vom Gesteinsgefüge sowie die Interaktion mit Sorption), werden hier nicht berücksichtigt.

[26] Umfassende Darstellung der Ableitung und Anwendung von Indikatoren bei: MAZUREK, M., GAUTSCHI, A., MARSCHALL, P., VIGNERON, G., LEBON, P., DELAY, J. (2008): Transferability of geoscientific information from various sources (study

Indikatoren: "Absolute Porosität" und "Verfestigungsgrad" für Diffusionsgeschwindigkeit bzw. effektiven Diffusionskoeffizienten bei Tonstein

Zugehöriges Kriterium:

Der einschlusswirksame Gebirgsbereich sollte aus Gestein(en) mit geringer absoluter Porosität und hohem diagenetischen Verfestigungsgrad bestehen (s. Tabelle XYZ03).

Tabelle XYZ03: Transport durch Grundwasser: Bewertungsgrößen der Diffusionsgeschwindigkeit für den Wirtsgesteinstyp Tonstein

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße bzw. Indikator des Kriteriums [Dimension]	Wertungsgruppe[27])		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig
Diffusionsgeschwindigkeit	Absolute Porosität	< 20 %	20 % - 40 %	> 40 %
	Verfestigungsgrad	Tonstein	fester Ton	halbfester Ton

Die Abhängigkeit von Diffusionsgeschwindigkeit bzw. effektivem Diffusionskoeffizienten (auch der Durchlässigkeit) von der Porosität ist grundsätzlich auch bei kristallinen Gesteinen erkennbar. Quantitative Zusammenhänge zwischen den Parametern sind allerdings nicht immer deutlich, selbst wenn eine Korrelation zwischen dem effektiven Diffusionskoeffizienten und der Durchlässigkeit festgestellt wird[28]. Belastbare Aussagen zur Unterscheidung und Abgrenzung unterschiedlich günstiger Gesteinskörper im Hinblick auf die Diffusionsgeschwindigkeit sind daher allein auf Basis von Indikatoren, also ohne gezielte Erhebung der effektiven Diffusionskoeffizienten, nicht möglich.
Bei unversehrtem Steinsalz ist die Diffusionsgeschwindigkeit gelöster (und gasförmiger) Stoffe wegen der sehr geringen Porosität sehr gering. Damit liegen für diesen Fall günstige Voraussetzungen für die Standortauswahl vor.

3.1.2. 6.5.6.1.2 Anforderung 2: Günstige Konfiguration der Gesteinskörper, insbesondere von Wirtsgestein und einschlusswirksamem Gebirgsbereich

Unter dem Begriff "Konfiguration" werden in erster Linie die Ausdehnung und Funktion des eine günstige geologische Gesamtsituation bestimmenden Gesteinskörpers oder - bei mehreren Gesteinskörpern - die geometrische Anordnung der durch Ausdehnung und Funktion charakterisierten beteiligten Gesteinskörper verstanden. Hinzu kommen die Tiefenlage des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs innerhalb der Geosphäre sowie die mögliche Beeinträchtigung seiner Barrierewirkung durch die Nähe zu Gesteinskörpern mit erhöhtem hydraulischem Potenzial.
Ausdehnung, Anordnung und Tiefenlage von Gesteinskörpern sind in der Regel einfacher erhebbar als bestimmte Gesteinseigenschaften oder die hydraulischen und hydrochemischen Standortverhältnisse. Daher kommt der Konfiguration sicherheitsrelevanter Gesteinskörper in der geologischen Barriere als früh erkennbarem Merkmal einer "günstigen geologischen Gesamtsituation" im Rahmen des Auswahlverfahrens besondere Bedeutung zu.

---

sites, underground rock laboratories, natural analogues) to support safety cases for radioactive waste repositories in argillaceous formations.- Physics and Chemistry of the Earth 33 (2008), S. 95-105, Elsevier Ltd.

[27] Die für die absolute Porosität festgelegten Grenzen zwischen den Wertungsgruppen sind als näherungsweise gültige Angaben zu verstehen, in strengem quantitativen Sinn treffen sie aber nicht für alle Tonsteinformationen zu.

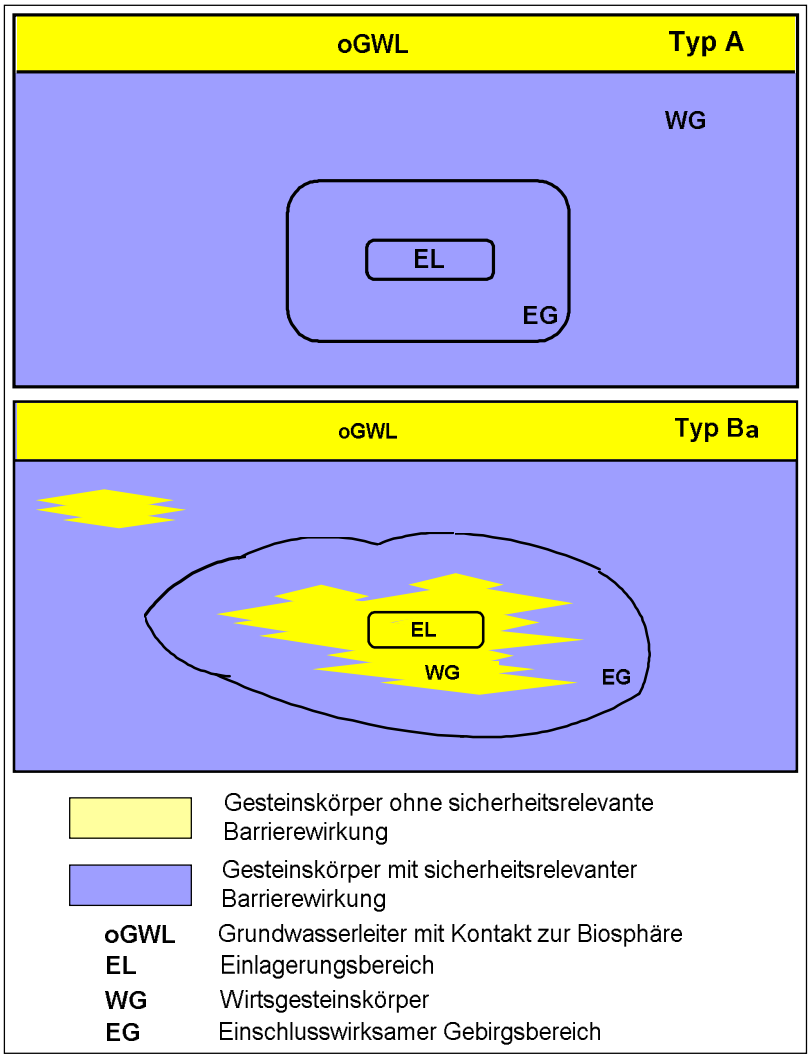
[28] Kuva, J., Voutilainen, M., Kekäläinen, P., Siitari-Kauppi, M., Timonen, J. & Koskinen, L. (2014): Gas Phase Measurements of Porosity, Diffusion Coefficient, and Permeability in Rock Samples from Olkiluoto Bedrock, Finland.- Transp Porous Med, DOI 10.1007/s11242-014-0432-2, Springer Science+Business Media.-

Zugehörige Kriterien:

- Die **barrierewirksamen Gesteine des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs** müssen über eine **Mächtigkeit** verfügen, die eine Isolation der Radionuklide über einen Zeitraum einer Million Jahren bewirkt (rechnerische Ableitung unter Voraussetzung idealer Barrierewirkung).
- Der **Endlagerbereich** (Konfigurationstyp A[29], siehe auch Abbildung XYZ1) **bzw.** der **Wirtsgesteinskörper** (Konfigurationstyp Ba[30], siehe auch Abbildung XYZ1) **sollte** von den barrierewirksamen Gesteinen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs **umschlossen sein.**
  Handelt es sich bei Wirtsgestein und einschlusswirksamem Gebirgsbereich um unterschiedliche Gesteinskörper und wird der Wirtsgesteinskörper nicht vollständig vom einschlusswirksamen Gebirgsbereich umschlossen (Konfigurationstyp Bb[31] siehe auch Abbildung XYZ2), dann kann die Anordnung beider Einheiten allein selbst dann keinen ausreichenden Beitrag zu einer "günstigen geologischen Gesamtsituation" leisten, wenn sie die geforderten Gesteinseigenschaften aufweisen.
  Zumindest kann die Qualität der barrierewirksamen Funktion des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches aus Anordnung und Ausdehnung der beteiligten Gesteinskörper nicht ohne weiteres abgeleitet werden. In erster Näherung dürfte die einschließende Wirkung einer solchen Konfiguration davon abhängig sein, wie weitgehend das Wirtsgestein vom einschlusswirksamen Gebirgsbereich umschlossen ist und in welcher hydraulischen Position sich (eine oder mehrere) konfigurationsbedingte Fehlstellen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich befinden, durch die das Grundwasser im Wirtsgestein auf Grund der Konfiguration in die regionale Grundwasserbewegung einbezogen sein kann.
  Eine "günstige geologische Gesamtsituation" muss sich umso mehr aus konfigurationsunabhängigen Gegebenheiten einer Region bzw. eines Standortes ergeben, je "offener" die Anordnung von Wirtsgesteinskörper und einschlusswirksamem Gebirgsbereich ist. Denn dann müssen andere Gegebenheiten, wie beispielsweise große Tiefe und günstige hydraulische und hydrochemische Bedingungen im Einlagerungsbereich des Endlagers für den Einschluss der Abfälle im Endlager sorgen. Eine solche, dem Konfigurationstyp "Bb" entsprechende Situation könnte beispielsweise bei einer weiträumigen Überlagerung von tief liegendem kristallinem Wirtsgestein durch barrierewirksame Salz- oder Tonsteinfolgen gegeben sein (siehe auch Abbildung XYZ2 oben).

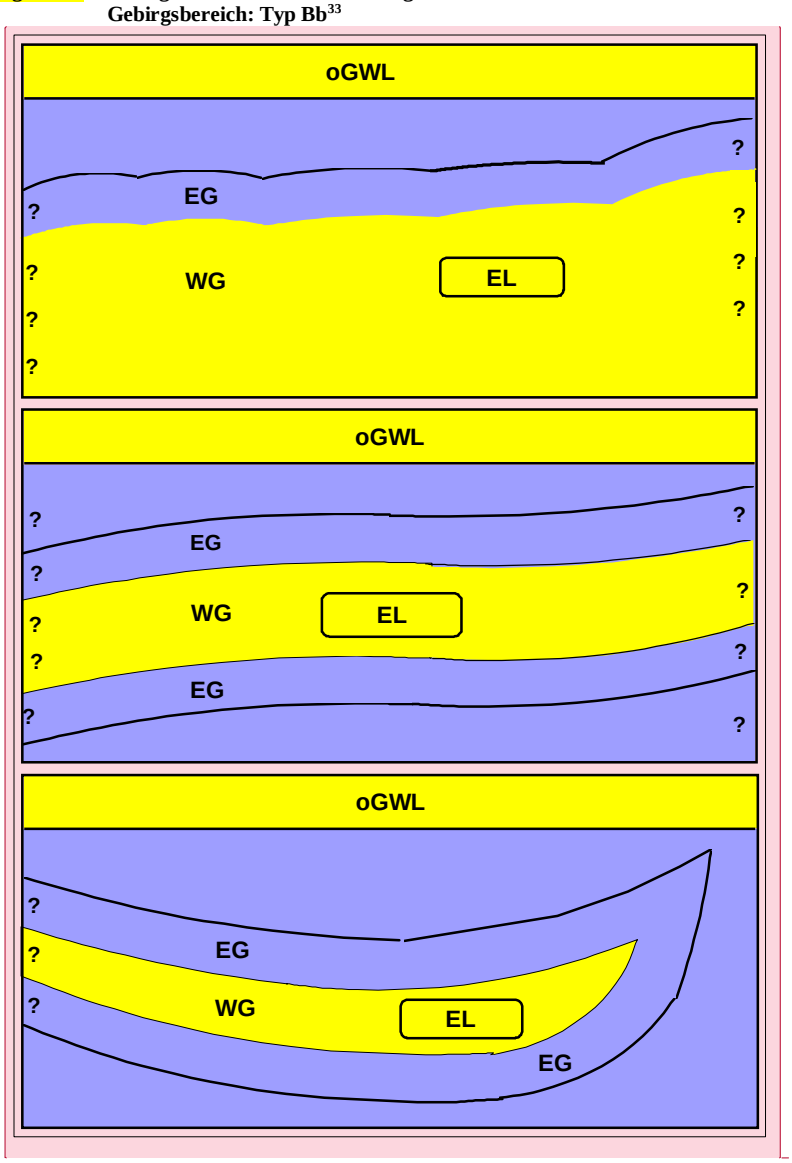
[29] Vgl. AkEnd (2002). Auswahlverfahren für Endlagerstandorte. K-MAT 1, S. 130ff.
[30] Vgl. AkEnd (2002). Auswahlverfahren für Endlagerstandorte. K-MAT 1, S. 130ff.
[31] Vgl. AkEnd (2002). Auswahlverfahren für Endlagerstandorte. K-MAT 1, S. 130ff.

Abbildung XYZ1: Konfigurationen zwischen Wirtsgestein und einschlusswirksamem Gebirgsbereich: Typ A und Typ Ba[32]



[32] Vgl. AkEnd (2002). Auswahlverfahren für Endlagerstandorte. K-MAT 1, S. 134.
Erläuterung zu Abbildung XYZ1 Typ A: Der einschlusswirksame Gebirgsbereich ist Teil eines Wirtsgesteinskörpers mit sicherheitsrelevanter Barrierewirkung. Typ B: Der Wirtsgesteinskörper hat keine sicherheitsrelevante Barrierewirkung und bildet mit dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich unterschiedliche Konfigurationen. Die Darstellung entspricht dabei dem Typ Ba: Das Wirtsgestein ist vollständig vom einschlusswirksamen Gebirgsbereich umschlossen. Die Darstellung ist schematisch und ohne Maßstab.

Abbildung XYZ2: Konfigurationen zwischen Wirtsgestein und einschlusswirksamem Gebirgsbereich: Typ Bb[33]



Kommentiert [JSe3]: „Typ Bb" in Grafik aufnehmen.

[33] Vgl. AkEnd (2002). Auswahlverfahren für Endlagerstandorte. K-MAT 1, S. 135.
Erläuterung zu Abbildung XYZ2:Konfigurationstyp Bb: Geologische Strukturen mit unterschiedlicher Anordnung von Wirtsgesteinskörper und einschlusswirksamem Gebirgsbereich. Die Darstellung ist schematisch und ohne Maßstab, „?" bedeutet „weitere Ausdehnung noch zu erkunden". Legende siehe Abbildung XYZ1.

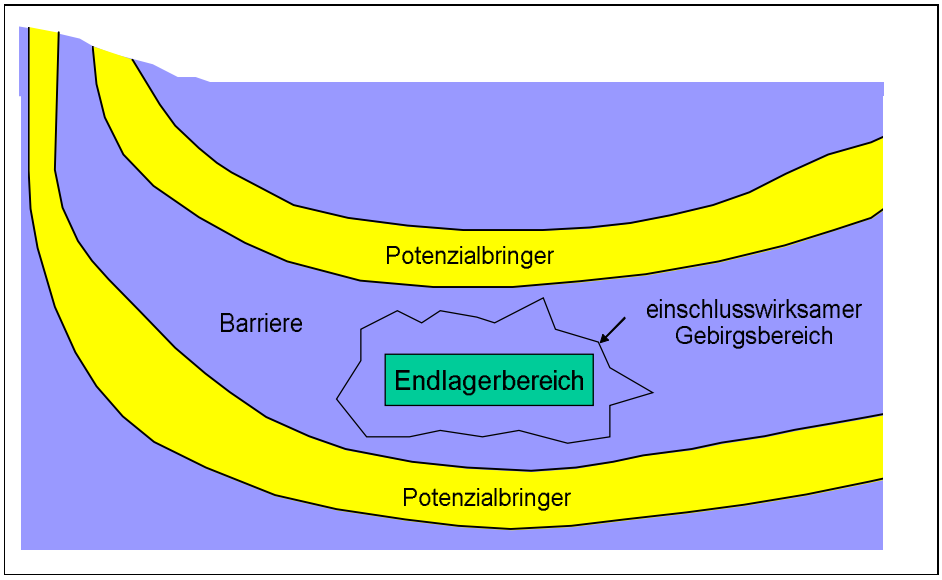
- Die **Teufe der Oberfläche des** erforderlichen **einschlusswirksamen Gebirgsbereichs** sollte unter einschränkender Beachtung tiefenabhängiger gebirgsmechanischer Risiken möglichst groß sein, um die **Robustheit** des Endlagersystems gegenüber natürlichen Einwirkungen auf den einschlusswirksamen Gebirgsbereich von außen und **Sicherheitsreserven** zu gewährleisten.
  Tiefenabhängige **gebirgsmechanische Risiken** bestehen **insbesondere beim Wirtsgesteinstyp Ton / Tonstein**. Sie werden außer durch die tiefenabhängige Gebirgsdruck- und Temperaturzunahme auch durch die petrographische und mineralogische Zusammensetzung, den Grad der Konsolidierung des Gesteins und die örtlichen Gebirgsspannungsverhältnisse beeinflusst.
  Bei der Anwendung der Kriterien sind gegebenenfalls regionsspezifische Einwirkungsszenarien zu beachten. Deren etwaigen nachteiligen Auswirkungen auf den Einschluss ist dann gegebenenfalls durch die **rechtzeitig abgestimmte Vorgabe** einer regionsbezogenen maximalen Tiefe und bei der bewertungsrelevanten Eigenschaft "Robustheit und Sicherheitsreserven" in Tabelle XYZ durch die Vorgabe einer abweichenden **regionsbezogenen Mindesttiefe** zu begegnen. Ein Beispiel hierfür ist die für eine künftige Eiszeit zu besorgende Entstehung tiefer subglazialer Rinnen in Teilgebieten der norddeutschen Tiefebene.
- Der **einschlusswirksame Gebirgsbereich** muss über eine **räumliche Ausdehnung** verfügen, die größer ist als das für das Endlager rechnerisch erforderliche Volumen. Damit besteht Spielraum für eine flexible Endlagerauslegung, u. a. um Platz brauchende Rückholungskonzepte berücksichtigen zu können, einschließlich Sicherheitsabständen. Eingangsgröße für die Abwägung ist die bei einsöhliger Lagerung benötigte Fläche.
- Bei potenziellen Endlagerstandorten mit Tonstein als Wirtsgestein kann der einschlusswirksame Gebirgsbereich von wasserleitenden Formationen mit erhöhtem hydraulischem Potenzial ("Potenzialbringer") unter- und/oder überlagert werden (s. Abbildung. XYZ3). Ein dadurch verursachter hydraulischer Gradient kann unter Umständen zur **Induzierung bzw. Verstärkung der Grundwasserströmung** und damit auch des Radionuklidtransports **im einschlusswirksamen Gebirgsbereich** führen. Die daraus resultierende Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers im einschlusswirksamen Gebirgsbereich 1 mm/a nicht überschreiten (s. Kriterium Grundwasserströmung in Kapitel 6.5.6.1.1).
  Sind mögliche Potenzialbringer vorhanden, ist daher der Einfluss des resultierenden Gradienten auf Grundwasserbewegung und Radionuklidtransport im einschlusswirksamen Gebirgsbereich zu beurteilen:
  Eine quantitative Beurteilung der möglicherweise induzierten Abstandsgeschwindigkeit kann erfahrungsgemäß aber erst im Rahmen vorläufiger Sicherheitsuntersuchungen erfolgen, wenn entsprechende Informationen vorliegen. Bis dahin können - bei geeigneter Datenlage - für die (vorläufige) Beurteilung einer möglichen Induzierung bzw. Verstärkung der Grundwasserbewegung im einschlusswirksamen Gebirgsbereich und den abwägenden Vergleich von Standortregionen / Standorten ersatzweise folgende Indikatoren eingesetzt werden:

Indikator: "Potenzialbringer"

Anschluss von wasserleitenden Schichten in Nachbarschaft zu einem einschlusswirksamen Gebirgsbereich aus Tonstein an ein hohes hydraulisches Potenzial verursachendes Gebiet[34] (siehe unten stehende Abbildung XYZ3.

[34] Vgl. AkEnd (2002). Auswahlverfahren für Endlagerstandorte. K-MAT 1, S. 144.

Abbildung XYZ3: Schematische Darstellung von Potenzialgebieten und Endlagerbereich[35]



Zugehörige Kriterien:

- Ein Anschluss an ein hohes hydraulisches Potenzial sollte möglichst nicht gegeben sein. Das ist insbesondere dann der Fall, wenn in unmittelbarer Nähe unterhalb und oberhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs bzw. des Wirtsgesteinskörpers keine wasserleitenden Schichten mit hohem Potenzial (bzw. hoher Potenzialdifferenz zwischen ihnen) vorhanden sind.
- Der hydraulische Widerstand der wasserleitenden Schicht(en) zwischen dem das hohe Potenzial verursachenden Gebiet und der Endlagerposition sollte groß sein, d. h. der Abstand sollte groß und die Gebirgsdurchlässigkeit klein sein.

Indikator: Auffällige hydraulische Potenziale

Hydraulische Potenziale im einschlusswirksamen Gebirgsbereich bzw. Wirtsgesteinskörper aus Tonstein, die auffällig von der zu erwartenden hydrostatischen Potenzialverteilung abweichen und / oder deutliche Unterschiede zu benachbarten Grundwasser leitenden Gesteinskörpern aufweisen, können ein Hinweis auf geringe Gebirgsdurchlässigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs bzw. Wirtsgesteinskörpers und damit auf günstige hydraulische Barrierewirkung sein.
Das gilt dann, wenn gezeigt werden kann, dass die aktuell und in der jüngeren geologischen Vergangenheit bestehenden hydraulischen Verhältnisse (hydraulische Eigenschaften der Gesteinskörper, Potenzialdifferenzen) nicht ausgereicht haben, um in fernerer geologischer Vergangenheit verursachte anomale Potenziale bzw. Potenzialunterschiede abzubauen. Voraussetzung für eine solche Interpretation-- ist, dass die Auffälligkeiten für die gesamte geforderte Fläche des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs gelten und die Ursachen dafür plausibel abgeleitet werden können.

[35] Vgl. AkEnd (2002). Auswahlverfahren für Endlagerstandorte. K-MAT 1, S. 143.

Tabelle XYZ04: Günstige Konfiguration der Gesteinskörper: Eigenschaften, Bewertungsgrößen bzw. Indikatoren und Erfüllungsfunktionen der Kriterien

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	**Bewertungsgröße bzw. Indikator des Kriteriums** [Dimension]	**Wertungsgruppe**		
		günstig	**bedingt günstig**	**weniger günstig**
Barrierenwirksamkeit	Barrieren**mächtigkeit** [m]	> 150	100 – 150	50 -100
	Grad der **Umschließung** des Endlagerbereichs bzw. des Wirtsgesteinskörpers durch den einschlusswirksamen Gebirgsbereich	Vollständig, Typ A und Ba, s. Beispiel in Abbildung XYZ1	Unvollständig, Typ Bb, kleinere, Fehlstellen, in unkritischer Position s. Beispiel in Abbildung XYZ2 Unten	Unvollständig; Typ Bb, größere Fehlstellen, in unsicherer Position s. Beispiel in Abbildung XYZ2 Oben und Mitte
Robustheit und Sicherheitsreserven (über die Mindestanforderung aus Kap. 6.5.5 hinaus.	**Teufe** der oberen Begrenzung des erforderlichen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs [m unter Geländeoberfläche]	> 500	300 – 500	
Volumen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs	**Fläche**nhafte Ausdehnung bei gegebener Mächtigkeit [Vielfaches des Mindest-flächenbedarfs (z. B. für Salz 3 km^2 und Ton 10 km^2)] [36]	>> 2-fach	etwa 2-fach	<< 2-fach
Indikator "Potenzialbringer" bei <u>Tonstein</u> Anschluss von wasserleitenden Schichten in unmittelbarer Nähe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs bzw. des Wirtsgesteinskörpers an ein hohes hydraulisches Potenzial verursachendes Gebiet	Vorhandensein von Gesteinsschichten mit hydraulischen Eigenschaften und hydraulischem Potenzial, die die Induzierung bzw. Verstärkung der Grundwasserbewegung im Einschlusswirksamen Gebirgsbereich ermöglichen können.	Keine Grundwasser-leiter als mögliche Potenzial-bringer in unmittelbarer Nachbarschaft zum Wirtsgestein / einschluss-wirksamen Gebirgs-bereich vorhanden		Grundwasser-leiter in Nachbarschaft zum Wirtsgestein / einschluss-wirksamen Gebirgs-bereich vorhanden

[36] Die genauen Flächenbedarfe sind noch festzulegen!

3.1.3. 6.5.6.1.3 Anforderung 3: Gute räumliche Charakterisierbarkeit

Die zuverlässige räumliche Charakterisierung der wesentlichen direkt oder indirekt für den Einschluss der Abfälle zuständigen geologischen Barrieren, insbesondere des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs bzw. des Wirtsgesteinskörpers, ist Voraussetzung für belastbare Abwägungsentscheidungen im Rahmen des Auswahlverfahrens sowie für zuverlässige spätere Sicherheitsbewertungen.
Die räumliche Charakterisierbarkeit beruht auf der **Ermittelbarkeit** der relevanten Gesteinstypen und ihrer Eigenschaften und der **Übertragbarkeit** dieser Eigenschaften durch Extrapolation bzw. Interpolation. Beide hängen maßgeblich von Entstehungsbedingungen der Gesteinstypen oder / und ihrer späteren Überprägung ab.

Zugehörige Kriterien:

Ermittelbarkeit

- Die **charakteristischen Eigenschaften** der den einschlusswirksamen Gebirgsbereich bzw. den Wirtsgesteinskörper[37] aufbauenden **Gesteinstypen** sollten eine **geringe Variationsbreite** aufweisen und **räumlich möglichst gleichmäßig verteilt** sein.
- **Bei tektonisch überprägten geologischen Einheiten** sollte **die Überprägung möglichst gering sein.** Das Ausmaß der Überprägung wird abgeleitet aus den Lagerungsverhältnissen unter Berücksichtigung von **Bruch- und Faltentektonik**. **Salzstrukturen** sollten möglichst großräumige Verfaltungen von solchen Schichten aufweisen, die unterschiedliche mechanische und hydraulische Eigenschaften haben.

Übertragbarkeit

- **Günstige Verhältnisse** sind dadurch gekennzeichnet, dass die Gesteine des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs bzw. des Wirtsgesteinskörpers **großräumig einheitlich oder sehr ähnlich ausgebildet** sind.

  Im Hinblick auf die Einheitlichkeit der Gesteinsausbildung bestehen zwischen den verschiedenen genetischen Gesteinsgruppen (Sedimentgesteine, magmatische Gesteine und metamorphe Gesteine) deutliche Unterschiede. Zu ihrer genaueren Bewertung bedarf es daher unterschiedlicher Bewertungsmaßstäbe. Deren abschließende Spezifizierung ist erst nach Kenntnis des Gesteinstyps des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und gegebenenfalls des Wirtsgesteins möglich. Insofern ist die Festlegung der Wertungsgruppen für Sedimentgesteine und metamorphe Gesteine auf Basis des Fazies-Begriffs vorläufig.

[37] Bei der Endlagerung hoch radioaktiver Abfälle in Salzstöcken des norddeutschen Tieflands wird das Wirtsgestein vom "Hauptsalz" der Staßfurt-Folge gebildet.

Tabelle XYZ05: Gute räumliche Charakterisierbarkeit: Eigenschaften, Bewertungsgrößen bzw. Indikatoren und Erfüllungsfunktionen der Kriterien

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

3.1.4. 6.5.6.1.4 Anforderung 4: Gute Prognostizierbarkeit der langfristigen Stabilität der günstigen Verhältnisse

Bei der Beurteilung günstiger geologischer Gesamtsituationen genügt es nicht, die aktuellen Verhältnisse zu ermitteln und räumlich zu charakterisieren; vielmehr müssen zur Identifizierung und Einschätzung sicherheitsrelevanter Langzeitveränderungen auch verlässliche Voraussagen über die zukünftige Entwicklung der **geologischen** Verhältnisse möglich sein. Die Anforderung der guten Prognostizierbarkeit ist daher eine wesentliche Voraussetzung für den Nachweis der langfristigen Stabilität der günstigen geologischen Verhältnisse. Sie bezieht sich auf das gesamte Endlagersystem. Sie gilt also nicht nur bei Einzelkriterien, sondern übergreifend bei der Gesamtheit der geowissenschaftlichen Kriterien.
Prognosen über den geforderten Isolationszeitraum von einer Million Jahren erfordern eine rückblickende Betrachtung über weit mehr als eine Million Jahre. Im Hinblick auf Prognostizierbarkeit günstig sind geologische Gesamtsituationen, deren Entwicklungsgeschichte sich über lange Zeiträume zurückverfolgen lässt und bei denen insbesondere keine wesentliche Veränderung der sicherheitsrelevanten Merkmale „Mächtigkeit“, „Ausdehnung“ und „Gebirgsdurchlässigkeit“ des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs zu verzeichnen ist.

Zugehöriges Kriterium:

- Die für die langfriste Stabilität der günstigen Verhältnisse wichtigen sicherheitlichen Merkmale, insbesondere "Mächtigkeit", flächenhafte bzw. räumliche "Ausdehnung" und "Gebirgsdurchlässigkeit"

des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, sollten sich seit einigen Millionen Jahren nicht wesentlich verändert haben.

Tabelle XYZ06: Gute Prognostizierbarkeit der langfristigen Stabilität: Eigenschaften, Bewertungsgrößen bzw. Indikatoren und Erfüllungsfunktionen der Kriterien

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	**Bewertungsgröße bzw. Indikator des Kriteriums**	**Wertungsgruppe**		
		günstig	**bedingt günstig**	**Ungünstig**
Langfristige Stabilität der günstigen Verhältnisse	Veränderung der wesentlichen sicherheitstragenden Merkmale: „Mächtigkeit“ des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs	keine wesentliche Veränderung der Betrachtungsmerkmale in der Vergangenheit über einen Zeitraum > 10 Mio. Jahre	keine wesentliche Veränderung der Betrachtungsmerkmale in der Vergangenheit über den Zeitraum von 1 bis 10 Mio. Jahre	keine wesentliche Veränderung der Betrachtungsmerkmale in der Vergangenheit über einen Zeitraum bis 1 Mio. Jahre
	Veränderung der wesentlichen sicherheitstragenden Merkmale: „Ausdehnung“ des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs	keine wesentliche Veränderung der Betrachtungsmerkmale in der Vergangenheit über einen Zeitraum > 10 Mio. Jahre	keine wesentliche Veränderung der Betrachtungsmerkmale in der Vergangenheit über den Zeitraum von 1 bis 10 Mio. Jahre	keine wesentliche Veränderung der Betrachtungsmerkmale in der Vergangenheit über einen Zeitraum bis 1 Mio. Jahre
	Veränderung der wesentlichen sicherheitstragenden Merkmale, hier: „Gebirgsdurchlässigkeit“ des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs	keine wesentliche Veränderung der Betrachtungsmerkmale in der Vergangenheit über einen Zeitraum > 10 Mio. Jahre	keine wesentliche Veränderung der Betrachtungsmerkmale in der Vergangenheit über den Zeitraum von 1 bis 10 Mio. Jahre	keine wesentliche Veränderung der Betrachtungsmerkmale in der Vergangenheit über einen Zeitraum bis 1 Mio. Jahre

3.2. 6.5.6.2 Gewichtungsgruppe 2: Absicherung des Isolationsvermögens

3.2.1. 6.5.6.2.1 Anforderung 5: Günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen

Die mit der Forderung nach günstigen gebirgsmechanischen Voraussetzungen verbundene Zielsetzung besteht aus geotechnischer bzw. gebirgsmechanischer Sicht darin, im anstehenden Gebirge ein standsicheres Grubengebäude mit Infrastrukturgrubenbauen und Endlagerungshohlräumen ohne nachhaltige Schädigung des umgebenden Gebirges (Rissbildung) sowie mit möglichst geringem Aufwand an technischen Sicherungsmitteln (kein tragender Ausbau) für die jeweilig vorgesehene Betriebszeit auslegen zu können.
Darüber hinaus sollten durch anthropogene Einwirkungen in der Betriebszeit und in der Nachbetriebszeit keine für den Erhalt der Barrierenintegrität nachteiligen mechanischen, thermischen oder hydraulischen Prozesse induziert werden (z. B. mechanisch oder thermisch bedingte Rissbildungen, Fluidströmungen). Insbesondere sollen **geotechnische Barrieren,** wie z. B. Streckendammbauwerken oder Schachtverschlussbauwerke, **später** entsprechend dem jeweiligen Stilllegungskonzept **funktionsfähig so hergestellt werden können**, dass die Langzeitsicherheit gewährleistet ist
Daher ist eine geomechanische Situation anzustreben, bei der im Lauf der Zeit die Folgewirkungen des anthropogenen Eingriffs (Schacht- und Streckenauffahrung) in das Gebirge mit Entfestigung und Auflockerung des Gesteinsgefüges und Ausbildung von Sekundärpermeabilitäten in der Bau- und Betriebszeit möglichst gering sind und darüber hinaus im Bereich von geotechnischen Barrieren längerfristig nach der Stilllegung wieder vermindert und schließlich bei jederzeitigem Erhalt der Barrierenintegrität eliminiert werden. Für die Ableitung von Beurteilungsgrößen bzw. Indikatoren zur Überprüfung der Einhaltung der Forderung nach günstigen gebirgsmechanischen Voraussetzungen werden zunächst Sachverhalte identifiziert, die eine im Sinne eines sicheren Einschlusses günstige Situation charakterisieren und zur Identifizierung der entsprechenden Gebirgsverhältnisse herangezogen werden können:

- Über eine Kontursicherung hinausgehend sollte kein tragender Ausbau erforderlich sein, um mit der Eigentragfähigkeit des Gebirges zusammen standsichere Grubenbaue zu erhalten.
- In den geologischen Barrieren sollten durch die Auffahrung des Endlagers und den Ausbau keine die Langzeitsicherheit beeinträchtigenden Sekundärpermeabilitäten erzeugt werden
- Die Funktionstüchtigkeit von geotechnischen Barrieren (z. B. Querschnittsabdichtungen) sollte durch konturnahe Gebirgsentfestigung nicht über ein unvermeidbares Maß hinaus herabgesetzt werden

Ausgehend von diesen Sachverhalten[38] werden zwei Indikatoren für das Vorliegen von in diesem Sinne günstigen geomechanischen Verhältnissen formuliert, auf die die unten genannten Kriterien ausgerichtet sind:

Indikator 1: Das Gebirge wirkt geomechanisch als Haupttragelement.

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

Indikator 2: Es liegt keine mechanisch bedingte Sekundärpermeabilität außerhalb einer (unvermeidbaren) konturnah entfestigten Auflockerungszone vor.

Außerhalb einer konturnahen Auflockerungszone sind Sekundärpermeabilitäten ohne erhebliche Eingriffe in das Gebirge nicht **detektierbar** und bedingen daher zusätzliche, aber bei entsprechender Planung grundsätzlich vermeidbare Unsicherheiten in späteren Sicherheitsbetrachtungen. Die Prognostizierbarkeit der geohydraulischen Situation im barrierewirksamen Teil des Gebirges wird dadurch herabgesetzt.

[38] Die Option, die Probleme größerer Tiefe (massiver Ausbau und mögliche Folgen für Langzeitsicherheit) zugunsten größerer Einlagerungstiefe in Kauf zu nehmen, wurde vom AkEnd nicht betrachtet.

Bei der planmäßigen Beschränkung der Gebirgsentfestigung und Gebirgsauflockerung auf konturnahe Bereiche ist die intakte geologische Barriere in ihrer räumlichen Ausdehnung zumindest für den Ist-Zustand eindeutig charakterisierbar (durch Berechnungen) und exemplarisch belegbar (durch Felduntersuchungen).
Eine über den Konturbereich hinausgehende Gebirgsentfestigung muss durch entsprechende Endlagerplanung zwingend vermieden werden.

Zugehöriges Kriterium:

- Die Neigung zur Ausbildung mechanisch induzierter Sekundärpermeabilitäten im Wirtsgestein / im einschlusswirksamen Gebirgsbereich außerhalb einer konturnahen entfestigten Auflockerungszone um die Endlagerhohlräume sollte möglichst gering sein.

Das Vorgehen bei der Kriterienentwicklung und die Herleitung der Beurteilungsmaßstäbe wird im AkEnd-Bericht[39] bzw. in den dort zugrunde gelegten Arbeiten ausführlich beschrieben. Danach besteht bei Berücksichtigung bestimmter **gebirgsartbezogener** Vorgaben ein Zusammenhang zwischen Teufenlage eines Grubenbaus und der Gebirgsfestigkeit, die zur Beurteilung der Neigung zur Ausbildung von Sekundärpermeabilitäten genutzt werden kann. Bei der Anwendung des Abwägungskriteriums wird zwischen Gesteinen mit elastisch-sprödem und elastisch-gering plastischem / gering kriechfähigem Materialverhalten einerseits und Gesteinen mit ausgeprägtem Kriechverhalten andererseits unterschieden.

3.2.2. 6.5.6.2.2 Anforderung 6: Geringe Neigung zur Bildung von Wasserwegsamkeiten in Wirtsgesteinskörper / einschlusswirksamem Gebirgsbereich

Schadstofffreisetzung aus dem tiefen geologischen Untergrund in die Biosphäre kann insbesondere über die Migration fluider Phasen erfolgen, und zwar auf im Gebirge primär bereits vorhandenen Wegsamkeiten, auf sekundär durch den anthropogenen Eingriff (Bau und Betrieb des Endlagers) bedingten Wegsamkeiten oder auf durch zukünftige geogene Einwirkungen induzierten Wegsamkeiten.
Eine günstige geologische Gesamtsituation ist daher u. a. dann gegeben, wenn der einschlusswirksame Gebirgsbereich grundsätzlich eine nur geringe Neigung zur Ausbildung von Wegsamkeiten aufweist.
Mechanismen für die Ausbildung von Wegsamkeiten können Gefügeauflockerungen infolge thermomechanischer Beanspruchung (Rissaufweitungen, Rissbildungen) und selektiver Auflösung von Gesteinspartien infolge Einwirkung lösungsfähiger Wässer (geochemisch reaktives Milieu im Rissbereich) sein. Hier bleibt die Kriterienentwicklung auf den Mechanismus mechanisch bedingter Rissaufweitung / Rissbildung beschränkt. Die **selektive Auflösung von Gesteinspartien** infolge Einwirkung lösungsfähiger Wässer (geochemisch reaktives Milieu im Rissbereich) wird hier nicht betrachtet.
Zur weiteren Spezifizierung dieser Anforderung erscheint es plausibel, davon auszugehen, dass sowohl grundsätzliche Gesteinseigenschaften als auch die Relation zwischen schädigungsfreier Gesteinsbeanspruchbarkeit und vorhandener bzw. zu erwartender Gesteinsbeanspruchung in Betracht zu ziehen sind. Ausgangspunkt für die weiteren Betrachtungen ist der Ansatz, dass auch in derzeit gering permeablen bis impermeablen Gebirgsformationen zusätzliche Risssysteme entstehen können und zwar dann, wenn unter der Einwirkung zukünftiger geogener und/oder anthropogener Beanspruchungen

- die Gesteine nicht hinreichend tragfähig sind, um die aufgeprägten Beanspruchungen ohne Überschreitung der Zug- sowie Dilatanz- bzw. Bruchfestigkeit aufzunehmen,
- die Gesteine kein hinreichendes Spannungsrelaxationsvermögen aufweisen, um bruchlos durch einen deformationsbegleiteten Spannungsumlagerungsprozess mit Beanspruchungsabbau die äußeren Lasten aufzunehmen,
- die Gesteine trotz eines ausgeprägt plastisch-viskosen Verhaltens beanspruchungs- und deformationsbedingt Gefügeauflockerungen und Gefügeentfestigungen erfahren.

In allen diesen Fällen reagieren die Gesteine auf die äußeren Lasten mit der Ausbildung von neuen bzw. der Weiterentwicklung von schon bestehenden Fissuren (Mikro- bis Makrorissen). Diese Sekundärrisse führen

[39] Vgl. AkEnd (2002). Auswahlverfahren für Endlagerstandorte. K-MAT 1.

dann auch bei einem primär gering permeablen bzw. impermeablen Gestein nach einer hinreichenden Vernetzung zur Ausbildung einer möglicherweise unvertretbar großen Sekundärpermeabilität.
Da die Anforderung „geringe Neigung zur Rissbildung“ nicht unmittelbar in ein an Maß und Zahl orientiertes und damit einer Abwägung zugängliches Kriterium umgesetzt werden kann, werden zunächst Eigenschaften abgeleitet, die jeweils einzelne Aspekte dieser zentralen Anforderung erfassen und für die dann nachfolgend Kriterien formuliert werden können. Vorhandene generelle Kenntnisse zu Gesteins- und Gebirgseigenschaften unter geotektonischer und endlagerrelevanter Beanspruchung legen zur näheren Ausformung der Anforderung die thesenartige Formulierung folgender Sachverhalte als Eigenschaften nahe:

Zugehörige Kriterien

- Die **Veränderbarkeit der Gebirgsdurchlässigkeit** sollte **möglichst gering** sein. Dazu sollte die repräsentative Gebirgsdurchlässigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs gleich der repräsentativen Gesteinsdurchlässigkeit sein[40].
- Die **Barrierenwirkung** der Gebirgsformation gegenüber der Migration von Flüssigkeiten oder Gasen (unter geogener und auch teilweise anthropogener Beanspruchung) sollte **aus** geowissenschaftlicher**, geotechnischer oder bergbaulicher Erfahrung ableitbar** sein. Folgende Sachverhalte können zur Einschätzung verwendet werden:
  - 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
- Das Gestein sollte unter in situ-Bedingungen geogen eine plastisch-viskose Deformationsfähigkeit ohne Dilatanz aufweisen (Bewertungsgröße: Duktilität des Gesteins).
- Risse/Risssysteme im Gestein sollten bei Beanspruchungsinversion (zunehmende isotrope Beanspruchung und abnehmende deviatorische Beanspruchung) geohydraulisch wirksam verschlossen werden (Bewertungsgröße: Rückbildung der Sekundärpermeabilität durch Rissschließung).
- Risse/Risssysteme im Gestein sollten nach der Rissschließung geomechanisch wirksam verheilt sein (Bewertungsgröße: Rückbildung der mechanischen Eigenschaften durch Rissverheilung).

Tabelle XYZ07: Geringe Neigung zur Bildung von Wasserwegsamkeiten: Eigenschaften, Bewertungsgrößen bzw. Indikatoren und Erfüllungsfunktionen des Kriteriums

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	**Bewertungsgröße bzw. Indikator des Kriteriums** [Dimension]	**Wertungsgruppe**		
		günstig	**bedingt günstig**	**weniger günstig**
Veränderbarkeit der vorhandenen Gebirgsdurchlässigkeit	Verhältnis repräsentative Gebirgsdurchlässigkeit / repräsentative Gesteins-durchlässigkeit [m/s]	< 10	≤ 100	> 100
	Erfahrungen über die Barrierewirksamkeit der Gebirgsformationen	Die Gebirgs-formation / der Gesteinstyp wird un-mittelbar /	Die Gebirgs-formation / der Gesteinstyp ist man-gels Erfah-rung	Die Gebirgs-formation / der Gesteins-typ wird unmittelbar/

[40] Dies bedeutet, dass das Gebirge keine bei der Bestimmung der Gesteinsfestigkeit nicht erfassbare Trennfugen / Klüfte aufweisen darf.

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	**Bewertungsgröße bzw. Indikator des Kriteriums** [Dimension]	**Wertungsgruppe**		
		günstig	**bedingt günstig**	**weniger günstig**
		mittelbar anhand eines oder mehrerer der o.g. Sachverhalte Erfahrungsbereiche als gering durchlässig bis geologisch dicht identfiziert, auch unter geogener / technogener Beanspruchung.	nicht unmittelbar / mittelbar als gering durchlässig bis geologisch dicht zu charakterisieren.	mittelbar anhand eines Erfahrungsbereichs als nicht hinreichend gering durchlässig identfiziert.
	Duktilität des Gesteins (da es keine festgelegten Grenzen gibt, ab welcher Bruchverformung ein Gestein duktil oder spröde ist, soll dieses Kriterium nur bei einem Vergleich von Standorten angewandt werden.)	Duktil / plastisch-viskos ausgeprägt	spröde-duktil bis elasto-viskoplastisch wenig ausgeprägt	spröde, linear-elastisch
Rückbildbarkeit von Rissen	Rückbildung der Sekundärpermeabilität durch Rissschließung	Die Rissschließung erfolgt aufgrund duktilen Materialverhaltens unter Ausgleich von Oberflächenrauhigkeiten im Grundsatz vollständig.	Die Rissschließung erfolgt durch mechanische Rissweitenverringerung in Verbindung mit sekundären Mechanismen, z. B. Quelldeformationen.	Die Rissschließung erfolgt nur in beschränktem Maße (z. B. bei sprödem Materialverhalten, Oberflächenrauhigkeiten, Brückenbildung).
	Rückbildung der mechanischen Eigenschaften **durch Rissverheilung**	Rissverheilung durch geochemisch geprägte Prozesse mit erneuter Aktivierung atomarer Bindungskräfte im Rissflächenbereich		Rissverheilung nur durch geogene Zuführung und Auskristallisation von Sekundärmineralen (mineralisierte Poren- und Kluftwässer, Sekundärmineralisation)
Zusammenfassende Beurteilung der Neigung zur		Bewertung	Bewertung	**Bewertung**

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße bzw. Indikator des Kriteriums [Dimension]	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig
Bildung von Wasserwegsamkeiten auf Grund der Bewertung der einzelnen Indikatoren:		überwiegend "günstig": Keine bis marginale Neigung zur Bildung von Wasserweg-samkeiten	überwiegend "bedingt gün-stig": Geringe Neigung zur Bildung von dauerhaften Wasserweg-samkeiten	überwiegend "weniger günstig": Bildung von dauerhaften sekundären Wasserwegsa mkeiten zu erwarten

3.3. 6.5.6.3 Gewichtungsgruppe 3: Weitere sicherheitsrelevante Eigenschaften

3.3.1. 6.5.6.3.1 Anforderung 7: Gute Bedingungen zur Vermeidung bzw. Minimierung der Gasbildung

Endgelagerte radioaktive Abfälle können bei Kontakt mit Wasser oder Lösungen durch Korrosion und Radiolyse Gase bilden. In der Nachbetriebsphase eines Endlagers kann es zur Gasbildung kommen, wenn Flüssigkeit an die Abfallbehälter gelangt und diese korrodieren. Die Gasbildung kann zu einem Druckaufbau im einschlusswirksamen Gebirgsbereich führen. Die Gasmengen und die Gasbildungsraten müssen im Rahmen der Szenarienanalyse abgeschätzt werden. Durch den Gasdruckaufbau kann die Integrität der geologischen Barriere gefährdet werden, wenn der Gasdruck den Frac-Druck überschreitet.
Im Rahmen von Sicherheitsbetrachtungen sind auch Auswirkungen des Zweiphasenflusses auf die Radionuklidmigration und Migration radioaktiver Gase zu beachten. Im Rahmen von Sicherheitsbetrachtungen sind auch Auswirkungen des Zweiphasenflusses auf die Radionuklidmigration, dilatanzgesteuerte Gasmigration sowie die Migration radioaktiver Gase zu beachten.
Zur Beurteilung der Auswirkung der Gasbildung auf die Sicherheit des Endlagers, insbesondere auf die Einschlussfunktion von einschlusswirksamem Gebirgsbereich und zugehörigen geotechnischen Barrieren, sind die maximal mögliche Gasmenge, die unter Endlagerungsbedingungen aus dem Abfall gebildet werden kann, sowie die Gasbildungsrate (Volumen pro Jahr) von Bedeutung. Die Gasmenge wird im Wesentlichen von der Art und den Inhaltstoffen der Abfälle, durch die Feuchte in den Abfallgebinden sowie durch das Grundwasser- bzw. Salzlösungsdargebot an die Gebinde bestimmt. Die Gasbildungsrate hängt ab von der Temperatur, der Feuchte und dem chemischen Milieu am Einlagerungsort bzw. im Gebinde.

Zugehöriges Kriterium:

- Die Gasbildung der Abfälle sollte unter Endlagerbedingungen möglichst gering sein.

Tabelle XYZ08: Gute Bedingungen zur Vermeidung bzw. Minimierung der Gasbildung: Eigenschaften, Bewertungsgrößen bzw. Indikatoren und Erfüllungsfunktionen des Kriteriums

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße bzw. Indikator des Kriteriums	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig
Gasbildung	Wasserangebot im Wirts-gestein	trocken	feucht und dicht (Gebirgsdurchl ässigkeit < 10^{-11} m/s)	feucht

3.3.2. 6.5.6.3.2 Anforderung 8: Gute Temperaturverträglichkeit [2. Lesung!]

Kommentiert [JSe4]: Dr. Appel + Min. Wenzel machen gemeinsamen Vorschlag (ggf. mit eckigen Klammern) zu Anforderung 8. Der Vorschlag soll als konkretes Temperaturkriterium zur Übernahme in Kapitel 6.5.6.3.2 geeignet sein.

In der Sitzung der Kommission am 23./24.05.2016 konnte zu diesem Kriterium keine Einigung erfolgen. Deshalb wurden in dieser Sitzung Dr. Appel und Min. Wenzel gebeten, jeweils eine neue Formulierung, die ihren Standpunkt darstellt, zu übermitteln. Diese beiden Formulierungen sind im nachfolgenden aufgeführt; sie befinden sich naturgemäß in eckigen Klammern. Die Schlusspassagen einschließlich der Tabelle sind in beiden Formulierungen identisch und werden daher unten im Anschluss an die separaten Formulierungen nur einmal abgedruckt.

Formulierung Dr. Appel

[Die mit der Einbringung wärmeentwickelnder Abfälle in ein Endlager verbundene Temperaturerhöhung (und die daraus resultierenden Temperaturgradienten) in den die Abfallbehälter umgebenden geotechnischen Barrieren und im diese umgebenden Gebirge können in Abhängigkeit vom Ausmaß des Wärmeeintrags, vom Wirtsgesteinstyp und von dessen Erscheinungsform bzw. standortspezifischer Ausprägung, vom verfolgten Sicherheits- und Lagerkonzept und von weiteren standortspezifischen Randbedingungen komplexe und nach Art, Intensität und Reichweite positive und negative sicherheitliche Auswirkungen haben. Beispielsweise verbinden sich positive Erwartungen damit, dass die Temperaturerhöhung beim Wirtsgesteinstyp Steinsalz zur Beschleunigung der Konvergenz und damit zum rascheren Einschluss der Abfälle im ewG führt. Andererseits verursachen Temperaturerhöhung im Gebirge und nachfolgende Abkühlung Gebirgsspannungen, die zur Entstehung oder Wiederbelebung von Wegsamkeiten im ewG und seiner Umgebung führen und so das Einschlussvermögen beeinträchtigen können.
Im Wesentlichen ist bei der Beurteilung thermisch induzierter Veränderungen zwischen den Auswirkungen auf den gebirgsmechanischen Spannungszustand im ewG und das umgebenden Gebirge einerseits und mineralogischen Veränderungen des Wirtsgesteins andererseits zu unterscheiden[41]:
Die Beurteilung des Wirtsgesteins bzw. des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs im Hinblick auf die Bedeutung **thermisch induzierter Gebirgsspannungen** ist eng verbunden mit der Frage nach der Bildung von Wasserwegsamkeiten im ewG und damit nach seiner Integrität innerhalb des Nachweiszeitraums. Modellrechnungen, die für die Entwicklung des vom AkEnd (2002) vorgeschlagenen Auswahlverfahrens durchgeführt worden sind, gestatten die Abschätzung des räumlichen und zeitlichen Verlaufs der Spannungen im Bereich von Wärmequellen unterschiedlicher räumlicher Ausdehnung[42]. Die Berücksichtigung von Materialeigenschaften, wie Zugfestigkeit, ermöglicht die Angabe derjenigen Bereiche um eine Wärmequelle, in denen für die zugrunde gelegten Randbedingungen Brüche zu erwarten sind (s. Tab. 5-8). Umgekehrt lassen sich unter der Randbedingung des vorgegebenen Wärmeeintrags Anforderungen an das Gestein ableiten, die erfüllt sein müssen, wenn die Entstehung von Wegsamkeiten verhindert bzw. die betroffene Zone auf die unmittelbare Umgebung des Endlagers beschränkt sein soll, um eine Beeinträchtigung der Barrierewirkung von einschlusswirksamem Gebirgsbereich bzw. Wirtsgestein zu vermeiden.
Temperaturerhöhungen können **Mineralumwandlungen** (insbesondere Abgabe von Kristallwasser, bei Tonmineralen von an Partikeloberflächen bzw. Zwischenschichten gebundenem Wasser) beschleunigen bzw. hervorrufen, die zur Veränderung sicherheitsrelevanter Gesteinseigenschaften und damit zur Beeinträchtigung der Barrierewirkung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs bzw. des weiteren Wirtsgesteinskörpers führen können. Dies gilt insbesondere für Ton / Tonstein und geotechnische Barrieren aus Material mit hohem Tonmineralanteil (Bentonit). Dieser Aspekt ist aber - wegen des Sicherheits- und Lagerkonzepts mit barrierewirksamem Bentonit-Buffer zwischen Abfallbehälter und Wirtsgestein - auch für den Wirtsgesteinstyp Kristallin von Bedeutung, obwohl das vornehmlich betrachtete Kristallingestein selbst (Granit) in dem relevanten Temperaturbereich von solchen Vorgängen nur ausnahmsweise bzw. nur in geringem Maße betroffen sein kann. Die aus mineralogischer Sicht auf Grund guter Temperaturverträglichkeit für Kristallin zu erwartenden Vorteile können also in diesem Punkt nicht ausgenutzt werden. Davon abgesehen können ohnehin hohe thermische Spannungen auftreten, die auch in Granit nur dann nicht zu Brüchen führen, wenn bestimmte Zugfestigkeiten nicht unterschritten werden.

[41] s. dazu AkEnd (2002), S. 177ff

[42] JENTZSCH, G. (2002): Temperaturempfindlichkeit der Gesteine

Kriterienableitung

Da durch die Temperaturerhöhung in geotechnischen Barrieren und umgebendem Gebirge Prozesse mit unterschiedlichen negativen oder positiven Konsequenzen für die Endlagersicherheit ausgelöst, beschleunigt oder verstärkt werden können, sind Festlegungen von wirtsgesteinsspezifisch oder gar allgemein gültigen Grenztemperaturen und ihre Anwendung zur zuverlässigen Vermeidung nachteiliger Konsequenzen für die Endlagersicherheit nur bedingt geeignet. In der Praxis werden daher im Rahmen von im Verfahrensablauf standortspezifisch zu verfeinernden vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen modellmäßige Betrachtungen bzw. (gekoppelte) Modellrechnungen zu Intensität und Reichweite der thermischen, mechanischen und hydraulischen Auswirkungen des Wärmeeintrags durchzuführen sein, um auf der Basis der Ergebnisse den Wärmeeintrag mit den Abfällen steuern und seine Auswirkungen beherrschen zu können[43]. Andererseits muss im Rahmen der Standortauswahl nachvollziehbar sicher gestellt werden, dass der ewG und das überlagernde Deckgebirge (einschließlich des Nebengebirges, soweit möglicherweise betroffen) so beschaffen sind, dass temperaturbedingte Änderungen der Gesteinseigenschaften sowie thermomechanische Spannungen einschließlich wärmeinduzierter Expansion der Gesteine und ihrer Fluide nicht zu einem Festigkeitsverlust oder zur Bildung von Wasserwegsamkeiten führen können.

Für die Temperaturverträglichkeit der in Frage kommenden Wirtsgesteine sind hohe und isotrope Wärmeleitfähigkeit, hohe Wärmekapazität und geringer Wärmeausdehnungskoeffizient sowie eine hohe Zugfestigkeit und hohes Relaxationsvermögen der Gesteine positive Eigenschaften. Durch die Erfüllung der Forderung, dass die gesuchte günstige geologische Gesamtsituation für die Errichtung eines Endlagers ausreichende Ausdehnung aufweisen muss, ist zu gewährleisten, dass eine mittlere Wärmeproduktion im Endlagerbereich von 0,1 W/m³ und eine Temperatur von 100 °C an der Kontur der Endlagerhohlräume unterschritten werden können.

Aus den geschilderten Zusammenhängen lassen sich auf Basis der genannten Randbedingungen und der Ergebnissen der Modellrechnungen in JENTZSCH (2002) folgende Kriterien ableiten:]

Formulierung Min. Wenzel

[Die Beurteilung des Wirtsgesteins bzw. des Gesteins des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs im Hinblick auf Temperaturspannungen ist eng verbunden mit der Frage nach der Bildung von Wasserwegsamkeiten im Barrieregestein und damit nach der Integrität des Endlagers.

Das Wirtsgestein und insbesondere der ewG sollen daher so beschaffen sein, dass temperaturbedingte Änderungen der Gesteinseigenschaften, thermomechanische Spannungen und wärmeinduzierte Expansion der Gesteine und ihrer Fluide nicht zu einem Festigkeitsverlust oder zur Bildung von Wasserwegsamkeiten führen können.

Im Allgemeinen wird in den Wirtsgesteinen Ton und Kristallin (im Letzteren auf Grund der Bentonitbarriere) eine Einlagerungstemperatur empfohlen, bei der die durch die Abfallwärme hervorgerufene Temperatur innerhalb der geotechnischen Barriere 100 °C bis 120 °C nicht überschreitet. Diese Begrenzung ist vor allem den Materialeigenschaften des Bentonits/Tongesteins und der Siedetemperatur von Lösungen (z.B. Vermeidung von Ausfällung von Salzen) geschuldet, um die Integrität des ewG während des anfänglichen Wärmeeintrags nach Einlagerung zu erhalten.

In Salzgesteinen ist bei höheren Temperaturen (Grenztemperatur ist zurzeit mit 200°C angegeben) die Auswirkung von thermisch oder radiolytisch induzierter Gasbildung und Druckaufbau sowie die Migration von Lösungen/Wasserdampf („Thermomigration“) unter erhöhtem Feuchteeintrag (z.B. durch Salzgrusversatz; Lösungseinschlüsse) kritisch zu bewerten. Die Anwesenheit von inhomogenen Bereichen im Salz (Salztonlagen, Anhydritvorkommen, Carnallititeinschlüssen etc.) kann die thermische Belastbarkeit des Salzgesteins negativ beeinflussen. Niedrigere Temperaturen als ca. 120°C würden zudem die Ausbildung eines temperatur- und druckbedingten Porennetzwerkes nicht erwarten lassen. Gebirgstemperaturen von 200°C liegen weit oberhalb der Bedingungen des konventionellen Bergbaus und würden damit eine Rückholbarkeit deutlich erschweren.

[43] Die Einhaltung von in bergbaulichen Verordnungen und Regeln festgelegten Sicherheitsabstände um Bergwerkshohlräume ist hiervon nicht berührt.

Daher wird für die Einlagerung eine Grenztemperatur von 100°C für alle Wirtsgesteine festgelegt.
Modellrechnungen gestatten die Abschätzung des räumlichen und zeitlichen Verlaufs der Spannungen im Bereich von Wärmequellen unterschiedlicher räumlicher Ausdehnungen. Die Berücksichtigung von Materialeigenschaften, wie der Zugfestigkeit, ermöglicht die Angabe der Bereiche um eine Wärmequelle, in denen Brüche zu erwarten sind.
Umgekehrt lassen sich daraus unter der Randbedingung des vorgegebenen Wärmeeintrags Anforderungen an das Gestein ableiten, die erfüllt sein müssen, wenn die Bruchzone auf die unmittelbare Umgebung des Endlagers beschränkt sein soll, um eine Beeinträchtigung der Barrierewirkung von einschlusswirksamem Gebirgsbereich bzw. Wirtsgestein zu vermeiden.
Temperaturerhöhungen können außerdem mineralogische Auswirkungen hervorrufen und so zur Beeinträchtigung der Barrierewirkung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs bzw. des Wirtsgesteins führen. Insbesondere Tonstein und geotechnische Barrieren können von solchen Veränderungen betroffen sein. Aus diesen Zusammenhängen lassen sich folgende Kriterien (bzw. auslegungsrelevante Anforderungen) ableiten:]

Zugehörige Kriterien

In beiden Formulierungen identischer Text am Schluss:

- Im unmittelbar um die Einlagerungshohlräume liegenden Gestein darf es bei Temperaturen kleiner 100°C nicht zu Mineralumwandlungen kommen, welche die Barrierewirkung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs unzulässig beeinflussen.
- Die Neigung zu thermomechanisch bedingter Sekundärpermeabilität außerhalb einer konturnahen entfestigten Auflockerungszone sollte räumlich möglichst eng begrenzt sein.

Tabelle XYZ09: Gute Temperaturverträglichkeit: Eigenschaften, Bewertungsgrößen bzw. Indikatoren und Erfüllungsfunktionen des Kriteriums

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße bzw. Indikator des Kriteriums	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig
Temperaturstabilität des Gesteins	Temperatur, bei der es zu Mineralumwandlungen in den Gesteinen kommt [°C]	> 120	100 - 120	< 100

3.3.3. 6.5.6.3.3 Anforderung 9: Hohes Rückhaltevermögen der Gesteine des einschlusswirksamen Gebirgsbereich gegenüber Radionukliden

Für eine Retardation (Rückhaltung) von Radionukliden in der Geosphäre sind die Ionenstärke bzw. die Konzentrationen von Komplexbildnern und Kolloiden im tiefen Grundwasser und der Mineralbestand des Gesteins entscheidend. Weitere retardierende Eigenschaften einer Formation sind Matrixdiffusion (und Sorption an Matrixpartikeln) sowie Filterwirkung gegenüber Kolloiden.
Das Ausmaß der Sorption hängt sowohl von der mineralogischen Zusammensetzung der durchströmten Gesteine als auch vom hydrochemischen Milieu des Tiefenwassers ab. Tonminerale, Mangan-, Eisen- und Aluminium-Oxide, -Hydroxide und -Oxihydrate sowie organische Substanz (z.B. Kohle, Torf) stellen - zumindest unter bestimmten hydrochemischen Milieubedingungen - gute Sorbenten dar. Von den hier interessierenden Gesteinstypen, die als Wirtsgestein bzw. einschlusswirksamer Gebirgsbereich in Frage kommen, trifft das – im Hinblick auf die Zusammensetzung - vor allem auf Tonstein zu. Granit und vergleichbare kristalline Gesteinstypen, aber auch Steinsalz und die meisten damit vergesellschafteten Gesteinstypen weisen hingegen ein generell schwaches Sorptionsvermögen auf, während sie in anderer Hinsicht Vorteile gegenüber anderen Gesteinstypen aufweisen können. Die Bedeutung des Rückhaltevermögens ist daher im Rahmen der abwägenden Gesamtbetrachtung von Endlagersystemen zu beurteilen.

Hinsichtlich des Ausmaßes von Sorption bestehen zwischen den nuklid-, gesteins- und milieuspezifischen Faktoren komplexe Beziehungen, die über die Benennung der geschilderten allgemeinen Zusammenhänge hinaus die Ableitung eines pauschal anwendbaren quantitativen Kriteriums nicht erlauben. Die Definition und Beurteilung günstiger geochemischer Verhältnisse für Sorptionsvorgänge muss vielmehr im Rahmen einer komplexen gesteins-, nuklid- und milieu-spezifischen Fallunterscheidung in späteren Verfahrensschritten vorgenommen werden.
In Sicherheitsbetrachtungen wird als Maß für die Beurteilung des Sorptionsvermögens üblicherweise der lineare Sorptionskoeffizient Kd herangezogen. Ein Kd-Wert von 0,001 m^3/kg bedeutet bei einer absoluten Porosität des Gesteins von 0,15, dass der Transport von Radionukliden im Grundwasser gegenüber der Abstandsgeschwindigkeit um etwa einen Faktor 10 - 20 verzögert wird. Im Zusammenhang mit der Endlagerung hoch radioaktiver Abfälle sind solche Gesteinstypen vorteilhaft, die ein Sorptionsvermögen für langlebige Radionuklide aufweisen.
Vor dem Hintergrund dieser Zusammenhänge lässt sich für die Rückhaltung von Radionukliden ableiten (s.a. Tabelle XYZ10):

Zugehöriges Kriterium:

- Die **Sorptionsfähigkeit** der Gesteine sollte **möglichst groß** sein; der Sorptionskoeffizient (Kd-Wert) sollte für die Mehrzahl der langzeitrelevanten Radionuklide größer oder gleich 0,001 m^3/kg sein.
- Die Gesteine des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs sollten möglichst hohe Gehalte an **Mineralphasen mit** großer **reaktiver Oberfläche** aufweisen.
- Um die Migration von an Kolloiden sorbierten Radionukliden einzuschränken bzw. zu verhindern, sollten die **Ionenstärke des Grundwassers** im einschlusswirksamen Gebirgsbereich **möglichst hoch** sein und die **Öffnungsweiten der Gesteinsporen im Nanometerbereich** liegen.

~~Für die Filterung von Kolloiden lässt sich kein Kriterium ableiten.~~

Tabelle XYZ10: Hohes Rückhaltevermögen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich: Eigenschaften, Bewertungsgrößen bzw. Indikatoren und Erfüllungsfunktionen des Kriteriums

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße bzw. Indikator des Kriteriums [Dimension]	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig
Sorptionsfähigkeit der Gesteine des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs	Kd-Wert für folgende langzeitrelevante Radionuklide ≥ 0,001 [m^3/kg]	Uran, Protactinium, Thorium, Plutonium, Neptunium, Zirkonium, Technetium, Palladium, Jod, Cäsium, Chlor	Uran, Plutonium, Neptunium, Zirkonium, Technetium, Cäsium	--
	Mineralphasen mit großer reaktiver Oberfläche	Hohe Gehalte an Mineralphasen mit großer reaktiver Oberfläche, wie Tonminerale, Fe- und Mn-Hydroxide und -Oxihydrate		

3.3.4. 6.5.6.3.4 Anforderung 10: Günstige hydrochemische Verhältnisse

Eine wissenschaftlich nachvollziehbare geochemische Bewertung von potenziellen Endlagerformationen zielt vorrangig auf den Einfluss der lokal/regional auftretenden Tiefenwässer und der festen Mineralphasen der Gesteine auf die Löslichkeit der Radionuklide und damit ihre Freisetzung und Migration bzw. Rückhaltung z. B. durch Sorption und Immobilisierung. Hinzu kommen Fragen möglicher chemischer Angriffe auf das Material technischer und geotechnischer Barrieren und der möglicher Veränderungen der hydrochemischen Bedingungen für Radionuklidfreisetzung und -transport durch eingebrachtes Behälter- und Ausbaumaterial.

Günstige hydrochemische Verhältnisse in einer geologischen Formation werden unter anderem durch ein reduzierendes geochemisches Milieu, geringe Konzentrationen an Komplexbildnern und Kolloiden sowie neutrale bis leicht alkalische pH-Bedingungen bei niedrigem CO_2-Partialdruck charakterisiert. Unter derartigen Bedingungen sind geringe Löslichkeiten von Radionukliden zu erwarten.

Als mögliche Indikatoren zur Identifizierung günstiger hydrochemischer Verhältnisse gelten der Eh-Wert, das Vorliegen reduzierter Festphasen, der Gehalt an organischen Substanzen und das Fehlen freien Sauerstoffs im Grundwasser sowie darüber hinaus der pH-Wert und die Pufferung durch vorhandene karbonathaltige Gesteine. Für eine Retardation von Radionukliden sind die Konzentrationen von Komplexbildnern und Kolloiden (z. B. Karbonatkomplexe oder Huminstoffkolloide) im Tiefenwasser und das Vorhandensein von Sorptionsplätzen an Mineralphasen im Gestein entscheidend (s. dazu Anforderung 9). Ein weiterer wichtiger Indikator für günstige hydrochemische Verhältnisse ist das Vorliegen eines geochemischen Gleichgewichtes zwischen Tiefenwasser und Gestein.

Im Zuge der Kriterienentwicklung hat der AkEnd[44] geprüft, inwieweit sich auf der Basis damals zugänglicher Daten quantitative bzw. qualitative Kriterien für die genannten Indikatoren ableiten lassen.

[44] Vgl. AkEnd (2002). Auswahlverfahren für Endlagerstandorte. K-MAT 1.

Dabei wurden auch das schrittweise Vorgehen bei einer Standortauswahl und die beim jeweiligen Verfahrensschritt voraussichtlich vorliegenden Kenntnisse und Daten berücksichtigt.
Der gegenwärtige Kenntnisstand zum Chemismus von Tiefenwässern in Deutschland und die heterogene Verbreitung verschiedener Grundwassertypen auf engem Raum lässt allerdings keine flächendeckenden Aussagen zur Charakterisierung und Beurteilung von Standortregionen und Standorten auf der Basis hydrochemischer Kriterien zu. Insbesondere bei Grundwässern im für die Errichtung eines Endlagers vorgesehenen Tiefenbereich ist das Wissen über die hydrochemischen Verhältnisse dafür zu lückenhaft. Zuverlässige Aussagen sind daher erst bei genauerer regionaler bzw. standortspezifischer Betrachtung auf Basis entsprechender Daten möglich.
Andererseits können folgende hydro- und geochemische Parameter mit Einfluss auf Löslichkeit und Transportverhalten von Radionukliden als Indikatoren für günstige hydrochemische Bedingungen hinsichtlich Radionuklidlöslichkeit und -transport herangezogen werden. Folgende Zusammenhänge lassen sich benennen:

- Das tiefe Grundwasser in Wirtsgestein / im einschlusswirksamen Gebirgsbereich soll sich mit den Gesteinen im chemischen Gleichgewicht befinden.
- Im Bereich des Tiefenwassers sollte ein pH-Wert von 7-8 vorliegen.
- Im Bereich des Tiefenwassers sollten günstige Redoxbedingungen (anoxisch-reduzierendes Milieu) vorliegen.
- Der Gehalt an Kolloiden im Tiefenwasser sollte möglichst gering sein.
- Der Gehalt an Komplexbildnern und die Karbonatkonzentration im Tiefenwasser sollten gering sein.

Zusammenfassend gilt aber, dass zur Ermittlung der Eigenschaft „günstige hydrochemische Verhältnisse“ standortspezifische Kenntnisse und Angaben zur Endlagerkonzeption vorliegen müssen, die in späten Verfahrensschritten bereitgestellt werden können.

3.4. Zusätzliche weitere Abwägungskriterien

Es wird z. Zt. noch darüber diskutiert, den Katalog der geowissenschaftlichen Abwägungskriterien um weitere Kriterien zu ergänzen, deren Einordnung in die zugehörigen Gewichtungsgruppe mit Verabschiedung dieser neuen Abwägungskriterien noch erfolgen muss. Die im Folgenden genannten Abwägungskriterien bedürfen daher noch der weiteren Beratung.

3.4.1. 6.5.6.3.5 Anforderung 11 :Hohes Rückhaltevermögen der Gesteine im Deckgebirge von Salzstöcken gegenüber Radionukliden [2. Lesung!]

Zu dieser Anforderung gibt es in der AG 3 unterschiedliche Auffassungen.
Zur Anforderung "Hohes Rückhaltevermögen des Deckgebirges gegenüber Radionukliden" (Gewichtungsgruppe 3) und zugehöriges neues Abwägungskriterium "Hohe Sorptionsfähigkeit der Gesteine des Deckgebirges" haben Herr Dr. Fischer und Herr MdB Kanitz wie folgt Stellung genommen:

[Kurzstellungnahme zu Beratungsunterlage K-Drs. /AG 3-70 von Herrn Dr. Fischer und Herrn MdB Kanitz (K.-Drs. /AG3-72 vom 21.12.2015) (ergänzt am **06.05.16**)

Zur neuen Anforderung "Hohes Rückhaltevermögen des Deckgebirges von Salzstöcken gegenüber Radionukliden" (Gewichtungsgruppe 3) und zugehöriges neues Abwägungskriterium "Hohe Sorptionsfähigkeit der Gesteine des Deckgebirges":
Die Einführung des Kriteriums steht im Widerspruch zum sicherheitskonzeptionellen Ansatz des sicheren Einschlusses der Abfälle im ewG, der auch der gesamten Methodik der Standortauswahl zugrunde liegt, da es auf eine Rückhaltung außerhalb des ewG abstellt. Das ewG-Konzept basiert aber auf dem Nachweis, dass es in den nächsten 1 Mio. Jahren nicht zur Radionuklidfreisetzung außerhalb des ewG kommt.
Dies wird aber ebenfalls Gegenstand der Sicherheitsbetrachtungen und letztendlich des Sicherheitsnachweises bei der Genehmigung sein. Eine darüber hinausgehende Forderung einer zusätzlichen Sorptionsfähigkeit macht keinen Sinn, denn es würde das gesamte Sicherheitskonzept des ewG in Frage stellen.

Unser Vorschlag lautet: ***Ein zusätzliches Abwägungskriterium „Hohes Rückhaltevermögen des Deckgebirges von Salzstöcken" sollte nicht aufgenommen werden.***
]

3.4.2. 6.5.6.3.6 Anforderung 12: Schützender Aufbau des Deckgebirges [2. Lesung!]

Zu dieser Anforderung wurde in der Kommissionsitzung am 13./24.05.2016 beschlossen, dass ein neuer Anlauf für eine gemeinsame Formulierung gestartet wird. Das Ergebnis soll in der Kommission auf ihrer Sitzung am 02.06.2016 vorgelegt und diskutiert werden. Das Ergebnis lag zum Redaktionsschluss dieses Papiers noch nicht vor und müsste ergänzt werden.

Nachrichtlich werden im Folgenden die bisher dokumentierten unterschiedlichen Auffassungen aus K.-Drs. 209b abgedruckt

Zu dieser Anforderung gibt es in der AG 3 drei unterschiedliche Auffassungen.

[Vorschlag Dr. Appel (K.-Drs. AG3-134, 27.04.2016)

Vorschlag für eine Anforderung
Schützender Aufbau des Deckgebirges zur orientierenden Bewertung der Schutzfunktion des Deckgebirges von Endlagersystemen gegenüber dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG) und zugehörige Kriterien

Zwischen den zu betrachtenden Endlagersystemtypen bestehen hinsichtlich der für das benötigte Schutzpotenzial des Deckgebirges maßgeblichen Eigenschaften deutliche Unter- schiede. Sie machen die nach Endlagersystemtypen differenzierte Beurteilung erforderlich. Mit Ausnahme des Endlagersystemtyps "Steinsalz in steiler Lagerung (Salzstöcke)", für das systemspezifische Abwägungskriterien bereits abgeleitet worden sind (K-Drs. AG3-70), liegen die für die Entwicklung entsprechender Abwägungskriterien erforderlichen Kenntnisse und Informationen derzeit nicht zu allen Endlagersystemtypen oder nicht mit ausreichender Aussagekraft vor. In verschiedenen Projekten und Forschungsprogrammen wird derzeit an endlagersystembezogenen Themen gearbeitet, deren Ergebnisse für die Entwicklung der differenzierten Abwägungskriterien genutzt werden können bzw. sogar Voraussetzung dafür sind.

Die Anforderung "Schützender Aufbau des Deckgebirges (orientierende Bewertung)", das zugehörige Kriterium und die zugehörigen Kriterien sollen die orientierende Beurteilung Endlagersystemen im Hinblick auf den Schutz des ewG durch das Deckgebirge erlauben, so- lange differenzierte Kriterien noch nicht vorliegen.

Anforderung "Schützender Aufbau des Deckgebirges (orientierende Bewertung)"

Das Deckgebirge von Endlagersystemen sollte so aufgebaut sein, dass es den einschluss- wirksamen Gebirgsbereich nachhaltig gegen die direkten und indirekten Auswirkungen exogener Prozesse schützt. Zur Erfüllung des zugehörigen Kriteriums "Schutz des einschluss- wirksamen Gebirgsbereiches (ewG) durch das Deckgebirge" sollten folgende Sachverhalte gegeben sein (siehe unten stehende. Tabelle XYZ11):

- Möglichst mächtige **vollständige Überdeckung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs mit grundwasserhemmenden / erosionshemmenden Gesteinen,**
- möglichst **geschlossene Verbreitung grundwasserhemmender / erosionshemmender Gesteine** im Deckgebirge,
- möglichst **keine strukturellen Komplikationen im Deckgebirge** (z. B. Störungen, Scheitelgräben, Karststrukturen)

Die Kriterien können auf die Endlagersysteme entsprechend Konfigurationstyp A (ewG = Teil des Wirtsgesteinskörpers) in AKEND (2002) angewendet werden, bei Kristallin auch auf den Typ Bb, wenn der Wirtsgesteinskörper Kristallin vom einschlusswirksamen Gebirgsbereich (Steinsalz / Tonstein) überlagert wird und dieser selbst des Schutzes bedarf. Wegen der Beschränkung möglicher Subrosion auf Endlagersystemtypen mit Steinsalz als Wirtsgestein und ewG sind in Abhängigkeit vom jeweiligen Endlagersystemtyp erosionshemmende und subrosions- / grundwasserhemmende Eigenschaften des Deckgebirges zu bewerten.

Tabelle XXZ11 Schutz des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durch das Deckgebirge: Eigenschaften, Bewertungsgrößen und Erfüllungsfunktionen der Kriterien

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße des Kriteriums bzw. Indikators [Dimension]	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	ungünstig
Schutz des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches (ewG) durch günstigen Aufbau des Deckgebirges	Überdeckung des ewG mit grundwasserhemmenden Gesteinen[45)], Verbreitung und Mächtigkeit grundwasserhemmender	mächtige vollständige Überdeckung, geschlossene Verbreitung grundwasser-	flächenhafte, aber unvollständige Überdeckung, flächenhafte Verbreitung grundwasser-	lückenhafte bzw. fehlende Über- deckung, lückenhafte Verbreitung grundwasser-

[45] Als grundwasserhemmend (und zugleich subrosionshemmend) werden hier vereinfachend nichtsalinare Gesteinstypen mit geringer Gebirgsdurchlässigkeit aufgefasst (Geringleiter / Nichtleiter).

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums	Bewertungsgröße des Kriteriums bzw. Indikators [Dimension]	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	ungünstig
	Gesteine im Deckgebirge[46)]	hemmender Gesteine im Deckgebirge	hemmender Gesteine im Deckgebirge	hemmender Gesteine im Deckgebirge
	Überdeckung des ewG mit erosionshemmenden Gesteinen[47)], Verbreitung und Mächtigkeit erosionshemmender Gesteine im Deckgebirge	mächtige vollständige Überdeckung, geschlossene Verbreitung erosions-hemmender Gesteine im Deckgebirge	flächenhafte, aber unvollständige Überdeckung, flächenhafte Verbreitung erosions-hemmender Gesteine im Deckgebirge	lückenhafte bzw. fehlende Überdeckung, lückenhafte Verbreitung erosions-hemmender Gesteine im Deckgebirge
	Keine Ausprägung struktureller Komplikationen (z. B. Störungen, Scheitelgräben, Karststrukturen) im Deckgebirge[48)]	Deckgebirge mit ungestörtem Aufbau	strukturelle Komplikationen, aber ohne erkennbare hydraulische Wirksamkeit (z. B. verheilte Klüfte/Störungen)	strukturelle Komplikationen mit potentieller hydraulischer Wirksamkeit

]

[Kurzstellungnahme zu Beratungsunterlage K-Drs. /AG 3-70 von Herrn Dr. Fischer und Herrn MdB Kanitz (K.-Drs. /AG3-72 vom 21.12.2015) (ergänzt am 06.05.16)

Zur neuen Anforderung "Schützender Aufbau des Deckgebirges von Salzstöcken" (Gewichtungsgruppe 1) und zugehöriges neues Abwägungskriterium "Schutzfunktion des Deckgebirges von Salzstöcken":

Dem Vorschlag liegt die Annahme zugrunde, dass die Beschaffenheit des Deckgebirges für den Schutz des ewG vor Subrosion maßgeblich sei. Diese Aussage ist jedoch keinesfalls zutreffend, insbesondere dann nicht, wenn über dem ewG mehrere hundert Meter mächtiges Salz lagert (siehe neue Festlegung zur Mindestteufe unter 6.5.4.3).

Die Existenz zahlreicher Salzstöcke in Norddeutschland mit sehr unterschiedlichen Deckgebirgskonfigurationen beweist hingegen, dass selbst bei direktem Kontakt des Salzspiegels mit Grundwasser die Subrosion rasch zum Erliegen kommt und das Deckgebirge darauf keinen substantiellen Einfluss hat..

Maßgebliche Faktoren für Subrosion sind dagegen Tiefenlage des Salzstocks sowie die sich einstellende Dichteschichtung des Grundwassers über dem Salzstock. Die Einstellung einer Dichteschichtung wird wiederum begünstigt durch geringe Salzaufstiegsraten, welche zu gewissen Muldenbildungen am Salzspiegel führen und wiederum eine schwächere Grundwasserdynamik zur Folge haben.

---

[46] Abweichend von der Definition zu Deckgebirge unter b) ist bei den Endlagersystemtypen Steinsalz in steiler Lagerung (Salzstöcke) und Steinsalz in flacher Lagerung der nichtsalinare Anteil des jeweiligen Deckgebirges gemeint.

[47] Als besonders erosionshemmend werden hier vereinfachend massige bis dickbankige, feste Sedimentgesteinskörper bzw. massive Kristallingesteinskörper (wie als Wirtsgestein bevorzugt), beide mit weitständiger Klüftung, aufgefasst. Abnehmende Bankmächtigkeit und abnehmende Kluftabstände führen zu abnehmendem Erosionswiderstand.

[48] Die jeweils zu prüfenden strukturellen Komplikationen sind aus den charakteristischen Eigenschaften der Endlagersystemtypen abzuleiten.

Allgemeine Anmerkung aus den Gesprächen der „kleinen Arbeitsgruppe“:
Die Festlegung eines Kriteriums nur für einen bestimmten Wirtsgesteinstyp sollte ausgeschlossen werden, insbesondere dann, wenn das Kriterium auch für andere Wirtsgesteinstypen von Bedeutung sein könnte. Für das hier vorgeschlagene Kriterium Deckgebirge trifft dies zu, weil z.B. für Ton das Deckgebirge eine wesentliche Bedeutung für das Risiko von Dekompaktion hat. Durch einseitige Einführung eines Kriteriums für Salzstöcke wird die Balance des Abwägungsprozesses gestört. Auch wenn das Kriterium eine Bedeutung für Salzstöcke haben sollte, müsste es auch für Tonstein und Kristallingestein definiert und spezifiziert werden. Dies ist aber aus Expertensicht aufgrund der vorhandenen Datenlage bzw. des Wissens so heute nicht möglich und könnte eventuell nur nach weiteren längeren Untersuchungen erfolgen. Auf das Kriterium kann jedoch gänzlich verzichtet werden, da es schon durch die Sicherheitsbetrachtungen im Rahmen der Analyse der Robustheit des Endlagersystems im Prozessverlauf bewertet wird. Eine vorherige Abwägung macht deswegen aus o.g. Gründen keinen Sinn. Auch die betonte Relevanz eines Deckgebirges für die ersten 15.000 Jahre (Vorschlag Minister Wenzel), die als Begründung für das Kriterium herangezogen wird, ist aus fachlicher Sicht nicht nachvollziehbar und ein entsprechendes Kriterium wird daher abgelehnt. Zur Berücksichtigung einer möglichen Subrosion bei Salzstöcken wurde die Mindestanforderung „Minimale Teufe des ewG“ (siehe Kapitel 4.3) einvernehmlich um die Forderung nach einer 300 m mächtigen Salzschwebe unmittelbar angrenzend über dem ewG für den Wirtsgesteinstyp „Steinsalz in steiler Lagerung“ erweitert. Eine Notwendigkeit von weiteren Kriterien zur Berücksichtigung der Subrosion sehen die Verfasser dieses Klammertextes aufgrund der o.g. Gründe aus fachlicher Sicht weiterhin nicht. Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Anwendung von nicht sicherheitsgerichteten Mindestanforderungen und Abwägungskriterien die erhebliche Gefahr birgt, dass eignungshöffige Standorte frühzeitig aus dem Verfahren ausscheiden könnten.

Unser Vorschlag lautet: **Ein zusätzliches Abwägungskriterium „Schützender Aufbau des Deckgebirges von Salzstöcken" sollte nicht aufgenommen werden.**
]

[Herr Dr. Appel, (K-Drs. /AG3-73 vom 21.12.2015)**:**
Anforderung "Schützender Aufbau des Deckgebirges von Salzstöcken" (Gewichtungsgruppe 1) und zugehöriges Abwägungskriterium "Schutzfunktion des Deckgebirges von Salzstöcken"
Den Barrieren von Endlagersystemen für hoch radioaktive Abfälle kommt eine der beiden übergeordneten Sicherheitsfunktionen "Einschluss der radioaktiven Abfälle" im einschluss-wirksamen Gebirgsbereich (ewG) bzw. "Schutz des ewG" zu. Unter den bei der Standort-auswahl im Vordergrund stehenden geologischen Barrieren übernimmt das Deckgebirge über dem ewG dessen Schutz gegen Einwirkungen von oben bzw. außen. Bei Salzstöcken hat wegen der Wasserlöslichkeit des Wirtsgesteins sowie wegen Wasserlöslichkeit bzw. Wasserleitvermögen mit ihm vergesellschafteter Gesteinskörper und der allgemein vertikalen Ausrichtung der Schichten der Schutz gegen (selektive) Subrosion und ihre möglichen Aus-wirkungen durch ein schützendes Deckgebirge herausragende Bedeutung.
Die mit Errichtung, Betrieb und Abfalleinbringung verbundenen thermischen, hydraulischen und mechanischen Beanspruchungen des ewG und der ihn umgebenden Gesteinskörper in den ersten ca. 10.000 Jahren nach Einlagerung wirken sich auf das Deckgebirge von Salzstöcken praktisch nicht aus. Es hat daher in dieser Phase für den Schutz des ewG gegen etwaige Einwirkungen von außen besondere Bedeutung. Für den anschließenden Teil des Nachweiszeitraums kann eine Beeinträchtigung der Schutzfunktion des Deckgebirges durch künftige exogene Prozesse nicht ausgeschlossen werden. Solche Prozesse werden in Deutschland jedoch weder überall noch immer in kritischem Ausmaß auftreten. Eine heute vorhandene Schutzwirkung des Deckgebirges stellt also ein im Auswahlverfahren im Zuge der Abwägung zu berücksichtigendes sicherheitlich positives Standortmerkmal dar.
Mit den Kriterien des Arbeitskreises Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AKEND 2002) ist die Beurteilung von Salzstöcken bzw. ihr Vergleich hinsichtlich des Schutzpotenzials des Deckgebirges nur abstrakt bzw. erst spät im Verfahrensablauf möglich. Die Bewertung ist zudem für Außenstehende nur schwierig nachzuvollziehen. Wegen der sicherheitlichen Bedeutung von Subrosion für die sichere Endlagerung, gerade in Salzstöcken, und im Sinne der Verfahrenstransparenz sollte daher dem Kriteriensatz auf Basis AKEND (2002) die Anforderung "Schützender Aufbau des Deckgebirges von Salzstöcken" (Gewichtungsgruppe 1) mit zugehörigem Kriterium hinzugefügt werden.
]

[Herr Minister Wenzel (K.-Drs. /AG3-74 vom 22.12.2015)
Mindestanforderung „Günstiges Deckgebirge für Salzformationen für einen Zeitraum von 15.000 Jahren“
Für das Wirtsgestein Salz geht es bei dieser Forderung um die Gewährleistung des Schutzes gegen die Beeinträchtigung der Wirtsgesteinsformation und des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durch Subrosion.
In der Salzstudie der BGR von 1995 wurde dazu ausgeführt: „Eine flächenhafte Überdeckung des Caprock einer Salzstruktur mit wasserhemmenden Unterkreidetonen und einer ungestörte Decke aus Sedimenten der Oberkreide und des Alttertiär (z. B. Rupel-Tone) würde ein optimales geologisches Barriere-System darstellen. Dies ist aufgrund der für das Bergwerkskonzept geforderten geringen Tiefenlage des Caprock im Allgemeinen nicht gegeben. Jedoch erscheint auch eine unverritzte und möglichst ungestörte Überdeckung allein durch die Tone des Alttertiär (Eozän, Rupel) akzeptabel.“
Die Abschätzung der verschiedenen ablaufenden Prozesse im Wirtsgestein Salz zeigt insgesamt „ – bei aller Ungenauigkeit – eine kritische Zeitspanne, die bis zu mehreren tausend Jahren reichen kann“, in der folgende Störungen/Prozessabläufe auftreten können (Appel & Kreusch 2006):

- „Allgemeine gebirgsmechanische Vorgänge/Spannungsumlagerungen, die durch die Existenz der *Hohlräume* und deren Konvergenz induziert werden…
- *Thermomechanische* Vorgänge, die durch die Ausdehnung des Salzstocks wegen seiner Aufheizung durch die stark wärmeentwickelnden Abfälle auftreten...
- Durch die Bildung von Gas können negative Einflüsse auf die Barriere Salzstock und die geotechnischen Barrieren hervorgerufen werden“

Die heutigen Erkenntnisse und Überlegungen zeigten, „dass eine neue Kaltzeit mit Gletscherüberdeckung in Norddeutschland – gemessen an den tatsächlichen Verhältnissen der Vergangenheit - frühestens in 15.000 – 20.000 Jahren stattfinden kann... Die Umformung ('Beseitigung, Ausräumung') des günstigen Deckgebirges kann im norddeutschen Raum frühestens in ca. 15.000 Jahre von heute geschehen… Eine Abschätzung der Länge der Vorgänge/Prozesse, die den potenziell kritischen Zustand des Endlagers direkt nach Einlagerung verursachen, führt zu einer Zeitspanne von mehreren Tausend Jahren… Ein günstiges Deckgebirge ist also für eine begrenzte Zeit (mehrere Tausend Jahre) unbedingt notwendig.“
]

ENDE der verschiedenen Ausführungen zur Anforderung 12: Schützender Aufbau des Deckgebirges

Offene Punkte aus den Diskussionen des Fachworkshops Ende Januar 2016:

Hinweis AK1: Subrosions-Seen als zusätzliches Ausschlusskriterium
Es wurde die Frage diskutiert, ob vorhandene bzw. leicht erkennbare verlandete Subrosions-Seen über einem Salzstock als zusätzliches Ausschlusskriterium angesehen werden können. Für die Einstufung als Ausschlusskriterium ergab sich kein Konsens, als Abwägungskriterium erschient das Vorhandensein von subrosionsbedingten Einbruchseen bzw. anderen Subrosionsmerkmalen dennoch relevant.

Hinweis AK2: Wirtsgesteinsspezifische Kriterien
Der AK 2 hat ausführlich zum Thema diskutiert. Wesentliche Punkte und Fragen:

- Was genau wird mit wirtsgesteinsspezifischen Kriterien verbunden?
- Brauchen die einzelnen Wirtsgesteine ein Deckgebirge?
- Wichtiger Punkt ist die Vermittelbarkeit an die BürgerInnen.
- Bewertung von Abwägungskriterien kann nur erfolgen, wenn man bereits ein Endlagerkonzept kennt.
- Grundgedanke des ewG: Grundansatz Ton und Salz als Wirtsgestein ist die eigentliche Barriere. Funktioniert bei Kristallin nicht.

Kommentiert [sal5]: Nds hält eine weitere Diskussion im Zusammenhang mit den Abwägungskriterien für das Deckgebirge für erforderlich