

Geschäftsstelle

Kommission
Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe
gemäß § 3 Standortauswahlgesetz

Arbeitsgruppe 3
Entscheidungskriterien sowie Kriterien
für Fehlerkorrekturen

**Stellungnahme zur Unterlage von Dr. Detlef Appel „Geowissenschaftliche
Abwägungskriterien – Kurzfassung auf Basis AkEnd (2002)“
Entwurf vom 19. Oktober 2015 (K-Drs./AG3-45)**

Verfasser: Min Dr. Robert Habeck,
Ministerium für Energiewende, Schleswig-Holstein
Datum vom 20. November 2015

<p>Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe K-Drs. /AG3-54 c</p>

D. Appel

Geowissenschaftliche Abwägungskriterien Kurzfassung auf Basis AKEND (2002)

Entwurf, 19.10.2015

Vorbemerkungen

Der nachfolgende Text "xxx1.4 Geowissenschaftliche Anforderungen und Abwägungskriterien sowie zugehörige Erfüllungsfunktionen" schließt inhaltlich an Kommissionsdrucksache AG 3-38 "Einführung in ein Kapitel Abwägungskriterien" an.

Er stellt die in der AG 3 besprochenen gekürzten Auskopplung aus Kapitel 4.1.4 des AkEnd-Berichtes von 2002 dar und kann als eine Arbeitsgrundlage für die Diskussion der Abwägungskriterien dienen.

Abgesehen von nicht erkannten Übernahmeirrtümern und -fehlern sind die Darstellungen der Ziele und wesentliche Sachverhaltshintergründe für die Kriterienableitung mit den inhaltlichen Hauptpunkten vollständig übernommen worden. Im AkEnd-Bericht zwar ausführlich beschriebene, aber nicht mit Bewertungsfunktionen belegte Indikatoren werden zwar erwähnt, aber nicht näher behandelt (Beispiel: Temperaturverteilung im tiefen Untergrund).

Vollständig übernommen wurden auch alle ausformulierten Kriterien, zugehörige Beurteilungsgrößen, Indikatoren und Bewertungsfunktionen (Wertungsgruppen). Die Kriterien unter einer Anforderung sind zusammen mit den zugehörigen Beurteilungsgrößen und Wertungsgruppen in jeweils einer Tabelle (Form entsprechend Tabelle 4.3 in AKEND 2002) übernommen worden, um den Zusammenhang deutlich zu machen.

Einige Bewertungsfunktionen enthalten (farblich gekennzeichnet) aus früheren AG-3-Diskussionen abgeleitete Modifizierungsvorschläge.

xxx1.4 Geowissenschaftliche Anforderungen und Abwägungskriterien sowie zugehörige Erfüllungsfunktionen

Gewichtungsgruppe 1

Güte des Isolationsvermögens und Zuverlässigkeit des Nachweises

Anforderung 1: Kein oder langsamer Transport durch Grundwasser im Endlagerniveau

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.

[Kommentar SH: In den verschiedenen Wirtsgesteinen werden unterschiedliche Lagerkonzepte zum Einsatz kommen. Insofern greift die Bewertung des Isolationsvermögens des Wirtsgesteins zu kurz. Stattdessen sind die Isolationseigenschaften der abdichtenden Systeme \(z.B. Kristallin+Bentonit\) zu bewerten](#)

Zugehörige Kriterien

- Die **Grundwasserströmung**, 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 geringe Gebirgsdurchlässigkeit aufweisen.
- Die **Diffusionsgeschwindigkeit**, erfasst durch den effektiven Diffusionskoeffizienten im einschlusswirksamen Gebirgsbereich, sollte **möglichst gering** sein (kleiner 10^{-11} m²/s).

Eigenschaften, Bewertungsgrößen bzw. Indikatoren und Erfüllungsfunktionen der Kriterien

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums [Dimension]	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	Gebirgsdurchlässigkeit [m/s]* *der Indikator Gebirgsdurchlässigkeit wird auch bei Anforderung 7 verwendet, dort mit anderen Wertebereichen	< 10^{-12}	10^{-12} - 10^{-10}	
Diffusionsgeschwindigkeit	effektiver Diffusionskoeffizient [m ² /s]	< 10^{-11}	10^{-11} - 10^{-10}	> 10^{-10}

Der **effektive Diffusionskoeffizient** als Maß für die Diffusionsgeschwindigkeit in konkreten Gesteinsvorkommen liegt flächendeckend nicht vor. Hilfsweise kann der **Gesteinstyp als Indikator für die Diffusionsgeschwindigkeit** herangezogen werden. In Abhängigkeit vom Gesteinstyp wird sie durch unterschiedliche charakteristische Merkmale bestimmt,

Bei Sedimentgesteinen sind **geringe Permeabilität und Porosität** Merkmale eines geringen effektiven Diffusionskoeffizienten. Indikatoren dafür sind bei Tonstein die **absolute Porosität** und der **diagenetische Verfestigungsgrad** des Gesteins.

Das entsprechende **Kriterium für Tonstein** lautet:

- Das Gestein sollte über eine geringe absolute Porosität und einen hohen diagenetischen Verfestigungsgrad verfügen.

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

Für andere Gesteinstypen müssen im Auswahlverfahren noch entsprechende Abwägungsmaßstäbe aufgestellt werden.

Kommentar SH: Die Bewertungsmaßstäbe müssen vor dem Auswahlverfahren festgelegt werden. Ohne diese kann über den Kriterienkatalog nicht abschließend beraten werden

Mögliche (weitere) Indikatoren für beurteilungsrelevante Sachverhalte für das Fehlen einer Grundwasserbewegung bzw. geringe Grundwasserbewegung, für die in AKEND (2002) mangels belastbarer Informationen keine Kriterien abgeleitet worden sind: Auf Dauer trockenes Gestein, Temperaturverteilung im tiefen Untergrund, teufenabhängige Zunahme der Grundwasserdichte.

D. Appel

Geowissenschaftliche Abwägungskriterien - Kurzfassung auf Basis AKEND (2002),
Entwurf, 19.10.2015

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.

Zugehörige Kriterien

- Die **barrierewirksamen Gesteine des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs** müssen über eine **Mächtigkeit** verfügen, die eine Isolation der Radionuklide in der Größenordnung von einer Million Jahren bewirkt (rechnerische Ableitung unter Voraussetzung idealer Barrierewirkung).
- Der **Endlagerbereich** (Konfigurationstyp A in AKEND 2002) **bzw.** der **Wirtsgesteinskörper** (Konfigurationstyp Ba in AKEND 2002) **sollte** von den barrierewirksamen Gesteinen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs **umschlossen sein**.
- Die **Teufe der Oberfläche des** erforderlichen **einschlusswirksamen Gebirgsbereichs** sollte unter einschränkender Beachtung tiefenabhängiger gebirgsmechanischer Risiken möglichst groß sein, um **Robustheit** des Endlagersystems und **Sicherheitsreserven** zu gewährleisten.

- 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 einschließlich Sicherheitsabständen. Eingangsgröße ist die bei einschlägiger Lagerung benötigte Fläche.
- Der **spezifische hydraulische Gradient** über den einschlusswirksamen Gebirgsbereich sollte gering sein ($< 10^{-2}$). In unmittelbarer Nähe unterhalb oder oberhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs sollten **keine Gesteinskörper mit erhöhtem hydraulischem Potenzial vorhanden** sein, damit die aus der Nachbarschaft solcher **Gesteinskörper möglicherweise resultierenden** Potenzialkontraste die Abstandsgeschwindigkeit im einschlusswirksamen Gebirgsbereich (auch für eine Gebirgsdurchlässigkeit von 10^{-10} m/s und eine effektive Porosität von 10 %) nicht über Werte von 1 mm/a ansteigen lassen.

Kommentar SH: Das Kriterium ist unklar formuliert. Vermieden werden sollte eine große Potenzialdifferenz zwischen zwei Potenzialbringern im Hangenden und Liegenden des EG. Darüber hinaus sind im tieferen Untergrund weitere Strömungsgesetzmäßigkeiten (Konvektion) zu beachten.

Eigenschaften, Bewertungsgrößen bzw. Indikatoren und Erfüllungsfunktionen der Kriterien

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums [Dimension]	Bewertungsgröße des Kriteriums bzw. Indikator [Dimension]	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig
Barrierenwirksamkeit	Barrierenmächtigkeit [m] Gemäß Herleitung im AKEnd Bericht gelten die Werte nur bei „idealer“ Barrierewirkung bei einer Durchlässigkeit von 10^{-12} m/s. D.h. wenn nur die Mindestanforder-	> 150	100 – 150	50 -100 Eine Mächtigkeit von nur 50m ist per Mindestanforderung ausgeschlossen

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums [Dimension]	Bewertungsgröße des Kriteriums bzw. Indikator [Dimension]	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig
	ung von 10^{-10} m/s erfüllt ist, muss die Mächtigkeit größer sein.			
	Grad der Umschließung des Endlagerbereichs bzw. des Wirtsgesteins durch den einschlusswirksamen Gebirgsbereich	vollständig	unvollständig	
Robustheit und Sicherheitsreserven	Teufe der oberen Begren- zung des erforderlichen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs [m unter Geländeoberfläche]	> 500 Tonstein: 500 – 700 m ¹ Salzstöcke: > 800 m ²	300 - 500 Widersprüchlich Die Mindestan- forderung an die Tiefe sollte eindeutig fest- gelegt und hier entfernt werden Tonstein: 700 – 900 m Salzstöcke: 600 – 800 m	? Tonstein: 700 – 900 m
		Bewertungsgrößen für Kristallin fehlen		
Volumen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs	Flächenhafte Ausdehnung bei gegebener Mächtigkeit [Vielfaches des Mindest- flächenbedarfs (z. B. für Salz 3 km ² und Ton 10 km ²)] ³ Indikator zielt letztendlich auf die Temperaturverträglichkeit ab, die wiederum eine eigene Anforderung darstellt. → Doppelung	> 2-fach	2-fach	< 2-fach
Vorhandensein von Gesteinskörpern mit erhöhtem hydraulischen Potenzial ⁴	Spezifischer hydraulischer Gradient (bei Gebirgs- durchlässigkeit 10^{-10} m/s und effektiver Porosität	$\ll 10^{-2}$	etwa 10^{-2}	$\gg 10^{-2}$

¹ Die genauen Werte für Tonstein sind noch festzulegen!

² s. Änderungsvorschlag zu Mindestanforderung Teufenlage des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs

³ Die genauen Flächenbedarfe sind noch festzulegen!

⁴ Das Vorhandensein von Gesteinskörpern mit erhöhtem hydraulischen Potenzial ist ein abwägungsrelevanter Sachverhalt. Der spezifische hydraulische Gradient ist jedoch eher eine

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums [Dimension]	Bewertungsgröße des Kriteriums bzw. Indikator [Dimension]	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig
Evtl. neues Kriterium zur Vermeidung der Aufprägung erhöhten Potenzials	0,1)			

In frühen Phasen des Auswahlverfahrens liegen die zur Anwendung des Kriteriums zum **spezifischen hydraulischen Gradienten über den einschlusswirksamen Gebirgsbereich** erforderlichen Informationen möglicherweise nicht vor. Dann können ersatzweise die relevanten Eigenschaften der für den Aufbau erhöhter Potenziale in Frage kommenden hydraulischen Einheiten zur Beurteilung herangezogen werden:

Indikator

Anschluss von Schichten in Nachbarschaft zum einschlusswirksamen Gebirgsbereich an ein hohes hydraulisches Potenzial.

Zugehörige Kriterien

- Ein Anschluss an ein hohes Potenzial sollte möglichst nicht gegeben sein.
- Der hydraulische Widerstand der leitenden Schicht zwischen Potenzialanschluss und Endlagerposition sollte groß sein, d. h. die Transportlänge sollte groß und die Gebirgsdurchlässigkeit klein sein.

fragwürdige Beurteilungsgröße. Der in AKEND 2002 für frühe Verfahrensphasen vorgeschlagene Indikator "Anschluss von Schichten..." (oder ein ähnlicher Ansatz) ist möglicherweise besser geeignet. Soweit entsprechende Informationen vorliegen sollte statt des hydraulischen Gradienten selbst die dadurch verursachte Abstandsgeschwindigkeit ($\leq 1 \text{ mm/a}$)

Anforderung 3: Gute räumliche Charakterisierbarkeit

Dieses Kriterium sollte zu einem Ausschlusskriterium zur Beschreibbarkeit und Prognostizierbarkeit des Gebirges ausgestaltet werden (Vorschlag vgl. AG 3-29). Nicht oder nicht mit hinreichender Genauigkeit explorierbare Gebirgsbereiche müssen von vorneherein ausgeschlossen werden, da die Beschreibbarkeit eine Grundvoraussetzung für die Anwendung und Beurteilung der Abwägungskriterien darstellt.

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 (**kann folglich nicht mit den übrigen Kriterien auf einer Hierarchiestufe stehen**). 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 aufbauenden **Gesteinstypen** sollten eine **geringe Variationsbreite** aufweisen und **räumlich möglichst gleichmäßig verteilt** sein.
- **Bei tektonisch überprägten geologischen Einheiten** sollte die **Überprägung möglichst gering sein**. Das Ausmaß der Überprägung wird abgeleitet aus den Lagerungsverhältnissen unter Berücksichtigung von **Bruch- und Falten tektonik**.

Salzstrukturen sollten möglichst großräumige Verfaltungen der Schichten mit unterschiedlichen mechanischen und hydraulischen Eigenschaften aufweisen.

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 Charakterisierung der Wertungsgruppen für Sedimentgesteine und metamorphe Gesteine auf Basis des Fazies-Begriffs vorläufig.

Eigenschaften, Bewertungsgrößen bzw. Indikatoren und Erfüllungsfunktionen der Kriterien

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums [Dimension]	Bewertungsgröße des Kriteriums bzw. Indikator [Dimension]	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig
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, nicht genau bekannt bzw. zuverlässig erhebbar
	Räumliche Verteilung der Gesteinstypen im ein- schlusswirksamen Ge- birgsbereich / Wirtsgesteinskörper und ihrer Eigenschaften	gleichmäßig	kontinuierliche räumliche Veränderungen	diskontinuierliche räumliche Veränderungen
	Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit	weitgehend ungestört (Störungen im	wenig gestört (weitständige Störungen,	intensiv gestört (eng- ständig zer-

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums [Dimension]	Bewertungsgröße des Kriteriums bzw. Indikator [Dimension]	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig
		Abstand > 3 km), flache Lagerung	Abstand 100 m bis 3 km), Flexuren	blockt, Ab- stand < 100 m), intensiv gefaltet
Die Einteilung der Wertungsgruppe ist unscharf und bietet großen Interpretationsspielraum.				
	für Salzstrukturen (Salzstöcke) gilt: Anpassung an neue Erkenntnisse erforderlich	große ovale Salzstruk- turen		kleine rundliche bzw. schmale gestreckte Salzstruk- turen
Übertragbarkeit der Eigenschaften im einschlusswirksamen Gebirgsbereich	Gesteinsausbildung (Gesteinsfazies)	Fazies regional einheitlich	Fazies nach bekanntem Muster wechselnd	Fazies nach nicht bekanntem Muster wechselnd

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 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. [Im Widerspruch zu dieser Aussage wird das Kriterium im weiteren Text auf die „geometrischen“ Eigenschaften reduziert. Eine gute Prognostizierbarkeit der Stabilität muss auch hinsichtlich der gesteinsphysikalischen und stofflichen Eigenschaften gegeben sein.](#)

Prognosen über den geforderten Isolationszeitraum in der Größenordnung 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 langfristige 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.

D. Appel

Geowissenschaftliche Abwägungskriterien - Kurzfassung auf Basis AKEND (2002),
Entwurf, 19.10.2015

Eigenschaften, Bewertungsgrößen bzw. Indikatoren und Erfüllungsfunktionen der
Kriterien

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums [Dimension]	Bewertungsgröße des Kriteriums bzw. Indikator [Dimension]	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig
Langfristige Stabilität der günstigen Verhältnisse	Veränderung der wesent- lichen Merkmale, insbe- sondere „Mächtigkeit“, „Ausdehnung“ und „Gebirgsdurchlässigkeit“ des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs	keine wesentliche Veränderung der Betracht- ungsmerk- male über einen Zeit- raum > 10 Mio. Jahre	keine wesentliche Veränderung der Betracht- ungsmerk- male über den Zeitraum von 1 bis 10 Mio. Jahre	keine wesentliche Veränderung der Betracht- ungsmerk- male über einen Zeit- raum bis 1 Mio. Jahre
		Ergänzung: Kleiner 1 Mio Jahre = Ausschluss (fehlt als Mindestanforderung)		

Gewichtungsgruppe 2

Absicherung des Isolationsvermögens

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 sollte die spätere Errichtbarkeit und Funktionsfähigkeit von geotechnischen Barrieren, wie z. B. Streckendammbauwerken oder Schachtverschlussbauwerken, nicht derart beeinträchtigt werden, dass die Gewährleistung der Langzeitsicherheit entsprechend dem jeweiligen Stilllegungskonzept nachteilig beeinflusst wird.

Daher ist eine geomechanische Situation anzustreben, bei der im Lauf der Zeit die Folgewirkungen des anthropogenen Eingriffs 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 sicherer Endlagerung 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 zusammenstandsichere Grubenbaue zu erhalten.
- In den geologischen Barrieren sollten 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 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. Anker - Maschendraht).

Indikator 2

Es liegt keine mechanisch bedingte Sekundärpermeabilität außerhalb einer (unvermeidbar) konturnah entfestigten Saumzone vor.

Außerhalb einer konturnahen Saumzone 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.

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 (Berechnungen) und exemplarisch belegbar (Felduntersuchungen).

Eine über den Konturbereich hinausgehende und nicht hinreichend quantifizierbare Gebirgsentfestigung und Gebirgsauflockerung bedingt zudem eine zusätzliche Minderung der ansetzbaren hydraulischen Leistungsfähigkeit von geotechnischen Barrieren, wie Streckendammbauwerken oder Schachtverschlussbauwerken. Eine konturnahe und vertretbare Entfestigungs-/ Auflockerungszone soll dann gegeben sein, wenn die Überschreitung der Dilatanzfestigkeit als moderat anzusehen ist und je nach Gesteinsart in unterschiedlicher Größe, grundsätzlich aber auf einige wenige Meter Stoßtiefe begrenzt bleibt.

Zugehöriges Kriterium

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

Das Vorgehen bei der Kriterienentwicklung und die Herleitung der Beurteilungsmaßstäbe wird in AKEND (2002) bzw. in den dort zugrunde gelegten Arbeiten (LUX 2002a und LUX 2002b) 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 (s. Abb. 5.1xxx u. 5.2xxx).

Eigenschaften, Bewertungsgrößen bzw. Indikatoren und Erfüllungsfunktionen des Kriteriums

Die vorliegenden Bewertungsgrößen zu den verschiedenen bewertungsrelevanten Eigenschaften beziehen sich auf empirischen bzw. exemplarischen Auswertungen im Rahmen von Auftragsarbeiten des AkEnd aus dem Jahre 2002. Zwischenzeitlich hat sich der Kenntnisstand im In- und Ausland erweitert, die Ergebnisse sollten zu Fortschreibung/Validierung herangezogen werden.

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums [Dimension]	Bewertungsgröße des Kriteriums bzw. Indikator [Dimension]	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig
Neigung zu mechanisch bedingten Sekundärpermeabilitäten außerhalb einer konturnahen entfestigten Saumzone	Zulässige Teufenlage in Abhängigkeit von der repräsentativen Gebirgsdruckfestigkeit, zu entnehmen dem Lagebezug der Endlagerteufe zur Kurve für die maximal mögliche Teufe in Abhängigkeit von der Gebirgsdruckfestigkeit: Abbildung 5.1XXX: Festgesteine mit nicht	Die zu bewertende Teufe liegt unterhalb der Kurve für die maximal mögliche Teufe in Abhängigkeit von der Gebirgsdruckfestigkeit.	Die zu bewertende Teufe liegt mäßig (< 10 %) oberhalb der Kurve für die maximal mögliche Teufe in Abhängigkeit von der Gebirgsdruck-	Die zu bewertende Teufe liegt deutlich (> 10 %) oberhalb der Kurve für die maximal mögliche Teufe in Abhängigkeit von der Gebirgsdruck-

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums [Dimension]	Bewertungsgröße des Kriteriums bzw. Indikator [Dimension]	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig
	bzw. gering kriechfähigem Materialverhalten; Abbildung 5.2XXX: Festgesteine mit ausgeprägt kriechfähigem Materialverhalten		festigkeit.	festigkeit.

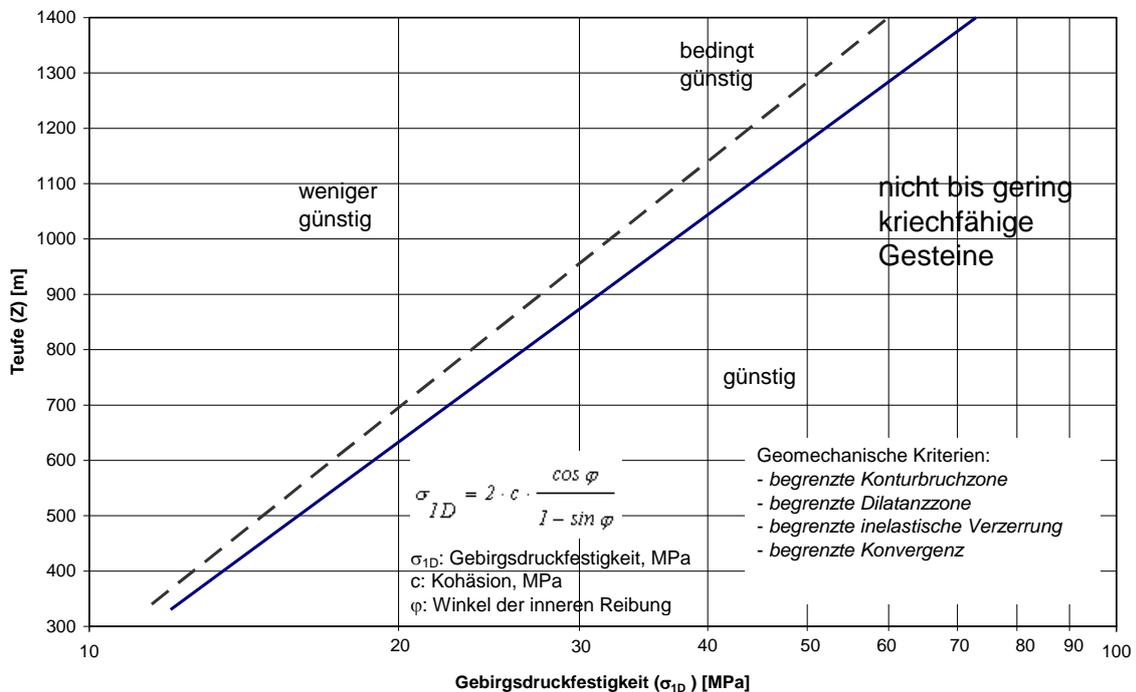


Abbildung 5.1xxx: Maximal mögliche Endlagertiefe in Abhängigkeit von der Gebirgsdruckfestigkeit für Festgesteine mit nicht bis gering kriechfähigem (duktilen) Materialverhalten [aus LUX 2002a]

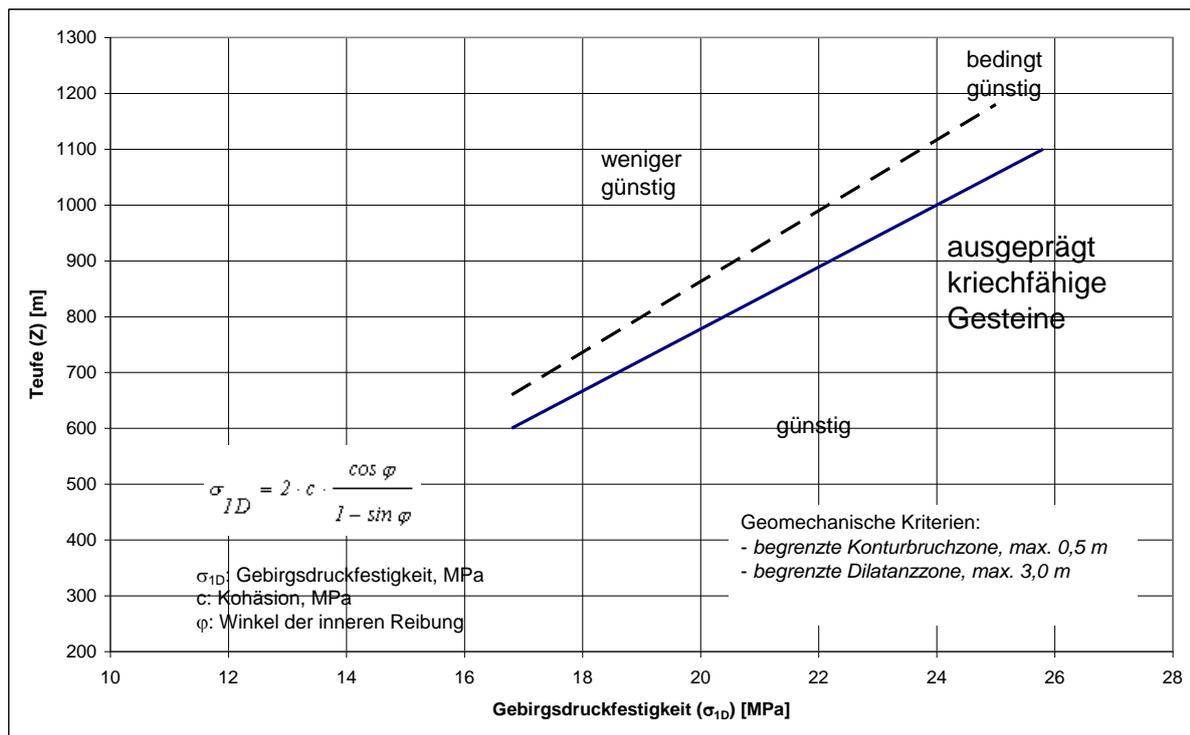


Abbildung 5.2xxx: Maximal mögliche Endlagertiefe in Abhängigkeit von der Gebirgsdruckfestigkeit für Festgesteine mit ausgeprägt kriechfähigem (duktilen) Materialverhalten [aus LUX 2002b]

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 Gefügauflockerungen 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. **Es muss sichergestellt werden, dass dieser Sachverhalt - wenn auch an anderer Stelle - betrachtet wird.**

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 Rissysteme entstehen können und zwar dann, wenn unter der Einwirkung zukünftiger geogener 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 Gefügauflockerungen 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 dann auch bei einem primär gering permeablen bzw. impermeablen Gestein nach einer hinreichenden Vernetzung zur Ausbildung einer möglicherweise unverträglich 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.

- 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 Erfahrungsbereiche sind zu berücksichtigen:
 - 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** sein (Bewertungsgröße: Rückbildung der Sekundärpermeabilität durch Risschließung).
- **Risse/Risssysteme im Gestein** sollten **nach der Risschließung geomechanisch wirksam verheilt** sein (Bewertungsgröße: Rückbildung der mechanischen Eigenschaften **durch Rissverheilung**).

Eigenschaften, Bewertungsgrößen bzw. Indikatoren und Erfüllungsfunktionen der
Kriterien

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums [Dimension]	Bewertungsgröße des Kriteriums bzw. Indikator [Dimension]	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig
Veränderbarkeit der vorhandenen Gebirgsdurchlässigkeit	Verhältnis repräsentative Gebirgsdurchlässigkeit / repräsentative Gesteins- durchlässigkeit [Maß ist die Wasserdurchlässigkeit in m/s]	< 10	≤ 100	> 100
	Erfahrungen über die Bar- rierewirksamkeit der Ge- birgsformationen	Die Gebirgs- formation / der Gesteins- typ wird un- mittelbar / mit- telbar anhand eines oder mehrerer Er- fahrungsbe- reiche als ge- ring durchläs- sig bis geolo- gisch dicht identifiziert, auch unter geogener / technogener Beanspru- chung.	Die Gebirgs- forma tion / der Gesteins- typ ist man- gels Erfah- rung nicht un- mittelbar / mit- telbar als ge- ring durchläs- sig bis geolo- gisch dicht zu charakteri- sieren.	Die Gebirgs- formation / der Gesteins- typ wird unmittelbar/ mittelbar anhand eines Erfah-rungs- bereichs als nicht hinrei- chend gering durchlässig ident-fiziert.
	Duktilität des Gesteins (nur relevant sofern Ausbau erforderlich)	Duktill / plastisch- viskos aus- geprägt	spröde-duktil bis elasto- viskoplastisch wenig ausgeprägt	spröde, linear- elastisch
Rückbildbarkeit von Rissen	Rückbildung der Sekundär- permeabilität durch Riss-schließung	Die Riss- schließung erfolgt auf- grund duk- tilen Mate- rialverhaltens unter Aus- gleich von Oberflächen- rauigkeiten im Grundsatz vollständig.	Die Riss- schließung erfolgt durch mechanische Rissweiten- verringering in Verbin- dung mit se- kundären Mechanis- men, z. B. Quelldefor-	Die Riss- schließung erfolgt nur in beschränk- tem Maße (z. B. sprödes Materialver- halten, Ober- flächenrau- igkeiten, Brücken- bildung).

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums [Dimension]	Bewertungsgröße des Kriteriums bzw. Indikator [Dimension]	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig
			mationen.	
	Rückbildung der mechanischen Eigenschaften durch Rissverheilung	Rissverheilung durch geochemisch geprägte Prozesse mit erneuter Aktivierung atomarer Bindungskräfte im Rissflächenbereich		Rissverheilung nur durch Zuführung und Auskristallisation von Sekundärmineralen (mineralisierte Poren- und Kluftwässer, Sekundärmineralisation)
Zusammenfassende Beurteilung der Neigung zur Bildung von Wasserwegsamkeiten auf Grund der Bewertung der einzelnen Indikatoren:		Bewertung überwiegend "günstig": Keine bis marginale Neigung zur Bildung von Wasserwegsamkeiten	Bewertung überwiegend "bedingt günstig": Geringe Neigung zur Bildung von dauerhaften Wasserwegsamkeiten	Bewertung überwiegend "weniger günstig": Bildung von dauerhaften sekundären Wasserwegsamkeiten zu erwarten

Gewichtungsgruppe 3

Weitere sicherheitsrelevante Eigenschaften

Anforderung 7: Gute Gasverträglichkeit

Endgelagerte radioaktive Abfälle können bei Kontakt mit Wasser oder Lösungen durch Korrosion und Radiolyse Gase bilden. Gasbildung aus organischen Bestandteilen in den Abfallgebinden geht in der Regel auf mikrobielle Zersetzung zurück. In der Nachbetriebsphase eines Endlagers kann die Gasbildung bei hohen Gasbildungsraten und großen Gasmengen zu einem Druckaufbau im einschlusswirksamen Gebirgsbereich führen. Die sicherheitstechnische Bedeutung

des mit der Gasbildung verbundenen Druckaufbaus liegt in der Gefährdung der Integrität der Barrieren. Auch eine Beschleunigung des Radionuklidtransports durch Gase ist nicht auszuschließen.

Zur Beurteilung der Auswirkung der Gasbildung auf die Sicherheit des Endlagers 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. Lösungsangebot an die Gebinde bestimmt. Die Gasbildungsrate hängt ab von der Temperatur, der Feuchte und dem chemischen Milieu am Einlagerungsort bzw. im Gebinde.

Zugehörige Kriterien

- Die **Gasbildung der Abfälle** sollte unter Endlagerbedingungen möglichst **gering** sein.
- Der **Druckaufbau** durch die erwartete **Gasbildung der Abfälle** sollte möglichst **gering** sein.

Eigenschaften, Bewertungsgrößen bzw. Indikatoren und Erfüllungsfunktionen der Kriterien

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums [Dimension]	Bewertungsgröße des Kriteriums bzw. Indikator [Dimension]	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig
Gasbildung	Wasserangebot im Wirtsgestein	trocken	feucht und dicht (Gebirgsdurchlässigkeit < 10^{-11} m/s)	feucht
Druckaufbau	Gebirgsdurchlässigkeit [m/s], zunächst ableitbar aus Gesteinstyp	> 10^{-9}	10^{-9} - 10^{-10}	< 10^{-10^5}

⁵ Bewertungsfunktion (insbes. "weniger günstig" überprüfen!

Anforderung 8: Gute Temperaturverträglichkeit

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. 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

- 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 Saumzone sollte räumlich möglichst eng begrenzt sein.

Eigenschaften, Bewertungsgrößen bzw. Indikatoren und Erfüllungsfunktionen der
Kriterien

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums [Dimension]	Bewertungsgröße des Kriteriums bzw. Indikator [Dimension]	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig
Temperaturstabilität des Gesteins	Temperatur, bei der es zu Mineralumwandlungen in den Gesteinen kommt [°C]	> 120	100 – 120	< 100
Thermisch bedingte Sekundärpermeabilität	Ausdehnung der thermo- mechanisch gestörten Um- gebung um Einlagerungs- höhlräume [m]	< 10	10 – 50	> 50
	Zugfestigkeit [MPa] im Nah- bereich (etwa 10 m bis 50 m) um Endlager bei einer Kontakttemperatur von 100 °C für Granit Tonstein Steinsalz	> 13 > 8 > 2	≥ 8 ≥ 4 1 – 2	< 8 < 4 < 1

Die unterschiedliche Temperaturverträglichkeit und thermisch bedingte Sekundärpermeabilität der verschiedenen Wirtsgesteine können durch die Anpassung des Einlagerungskonzeptes an das Wirtsgestein kompensiert werden. Der hiermit verbundene unterschiedliche Flächenbedarf wird bereits an anderer Stelle berücksichtigt. →Streichung.

Anforderung 9: Hohes Rückhaltevermögen der Gesteine 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.

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 K_d herangezogen. Ein K_d -Wert von $0,001 \text{ m}^3/\text{kg}$ 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:

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 m³/kg sein.
- Die Gesteine des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs sollten möglichst hohe Gehalte an **Mineralphasen mit großer reaktiver Oberfläche** aufweisen.

Für die Filterung von Kolloiden lässt sich kein Kriterium ableiten.

Eigenschaften, Bewertungsgrößen bzw. Indikatoren und Erfüllungsfunktionen der Kriterien

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums [Dimension]	Bewertungsgröße des Kriteriums bzw. Indikator [Dimension]	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig
Sorptionsfähigkeit der Gesteine des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs	Kd-Wert für folgende langzeitrelevante Radionuklide $\geq 0,001$ [m ³ /kg]	Uran, Protactinium, Thorium, Plutonium, Neptunium, Zirkonium, Technetium, Palladium, Jod, Cäsium, Chlor	Uran, Plutonium, Neptunium, Zirkonium, Technetium, Cäsium	

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums [Dimension]	Bewertungsgröße des Kriteriums bzw. Indikator [Dimension]	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig
	Mineralphasen mit großer reaktiver Oberfläche	Hohe Gehalte an Mineralphasen mit großer reaktiver Oberfläche, wie Tonminerale, Fe- und Mn-Hydroxide und -Oxihydrate		

Anforderung 10: Günstige hydrochemische Verhältnisse

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 CO₂-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 geprüft (AKEND 2002), inwieweit sich auf der Basis damals zugänglicher Daten quantitative bzw. qualitative Kriterien für die genannten Indikatoren ableiten lassen (LARUE et al. 2001). Dabei wurden auch das schrittweise Vorgehen bei einer Standortauswahl und die beim jeweiligen Verfahrensschritt voraussichtlich vorliegenden Kenntnisse und Daten berücksichtigt.

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 sowie deren Rückhaltung z. B. durch Sorption und Immobilisierung. Der gegenwärtige Kenntnisstand zum Chemismus von Tiefenwässern in Deutschland und die heterogene Verbreitung verschiedener Grundwassertypen auf engem Raum lässt derzeit⁶ allerdings keine flächendeckenden Aussagen zur Charakterisierung

⁶ Angaben aus AKEND 2002. Bedürfen der Überprüfung / Aktualisierung.

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 [Wertebereich?](#) 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.