

**Geschäftsstelle**

Kommission  
Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe  
gemäß § 3 Standortauswahlgesetz

Arbeitsgruppe 3  
Entscheidungskriterien sowie Kriterien  
für Fehlerkorrekturen

---

**Geowissenschaftliche Abwägungskriterien – Kurzfassung auf  
Basis AkEnd (2002)**

**Entwurf 2. Version, 16. November 2015**

Verfasser: Dr. Detlef Appel

<p><b>Kommission</b> <b>Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe</b> <b>K-Drs. /AG3-46</b></p>
---

## **D. Appel**

### **Geowissenschaftliche Abwägungskriterien Kurzfassung auf Basis AKEND (2002)**

**Entwurf, vers. 2, 16.11.2015**

#### **Vorbemerkungen**

Der nachfolgende Text "xxx1.4 Geowissenschaftliche Anforderungen und Abwägungskriterien sowie zugehörige Wertungsgruppen" schließt inhaltlich an Kommissionsdrucksache AG 3-38 "Einführung in ein Kapitel Abwägungskriterien" an. Er stellt eine gekürzte Auskopplung aus Kapitel 4.1.4 des AkEnd-Berichtes von 2002 dar.

Die innere Logik des AkEnd-Kapitels mit den übergeordneten allgemeinen geologischen Anforderungen im Hinblick auf eine günstige geologische Gesamtsituation für die sichere Endlagerung radioaktiver Abfälle, den darauf bezogenen Abwägungskriterien zur vergleichenden Beurteilung der anforderungsrelevanten Sachverhalte, den dabei anzuwendenden Beurteilungsgrößen (bzw. Indikatoren, soweit die Beurteilungsgrößen mangels Information (noch) nicht anwendbar sind) und den zugehörigen Wertungsgruppen bleibt erhalten.

Abgesehen von nicht erkannten Übernahmeirrtümern und -fehlern sind die Darstellungen der Ziele und wesentliche Sachverhaltshintergründe für die Kriterienableitung mit den inhaltlichen Hauptpunkten übernommen worden. Inhaltlich Übernommen wurden auch alle vollständig ausformulierten Kriterien mit den zugehörigen Beurteilungsgrößen bzw. Indikatoren und Wertungsgruppen. Veränderungen durch Appel sind (in Fußnoten) erläutert.

Im AkEnd-Bericht beschriebene Indikatoren, für die keine Festlegungen für die Wertungsgruppen getroffen worden sind, werden zwar erwähnt, aber nicht näher behandelt (Beispiel: Temperaturverteilung im tiefen Untergrund).

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.

Inhaltliche Änderungen, insbesondere Ergänzungen, gegenüber dem in der 13. Sitzung der AG 3 andiskutierten Entwurf vom 19.10.2015 sind **rot** markiert: Umfangreichere Änderungen / Ergänzungen zu Anforderung 2 (günstige Konfiguration / Tiefe) - derzeit ohne überzeugende Lösung für die damit verbundene gebirgsmechanische Problematik, die auch unter Anforderung 5: Günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen (Kriterium Neigung zur Ausbildung mechanisch induzierter Sekundärpermeabilitäten) aufscheint.

## **xxx1.4 Geowissenschaftliche Anforderungen und Abwägungskriterien sowie zugehörige Wertungsgruppen**

### **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.

##### 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  $10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ ).

Eigenschaften, Bewertungsgrößen bzw. Indikatoren und Wertungsgruppen der Kriterien

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums [Dimension]	Bewertungsgröße bzw. Indikator des Kriteriums [Dimension]	Wertungsgruppe		
		<b>günstig</b>	<b>bedingt günstig</b>	<b>weniger günstig</b>
Grundwasserströmung	Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers [mm/a]	< 0,1	0,1 - 1	> 1
Grundwasserangebot	Gebirgsdurchlässigkeit [m/s]	< $10^{-12}$	$10^{-12}$ - $10^{-10}$	
Diffusionsgeschwindigkeit	effektiver Diffusionskoeffizient [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]	< $10^{-11}$	$10^{-11}$ - $10^{-10}$	> $10^{-10}$

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		
		<b>günstig</b>	<b>bedingt günstig</b>	<b>weniger günstig</b>
Diffusionsgeschwindigkeit	Absolute Porosität	< 20 %	20 % - 40 %	> 40 %
	Verfestigungsgrad	Tonstein	fester Ton	halbfester Ton

Für andere Gesteinstypen müssen im Auswahlverfahren noch entsprechende Abwägungsmaßstäbe aufgestellt 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.

## **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** (s. Abb. xxx1.4.xxx1).

Handelt es sich bei Wirtsgestein und einschlusswirksamem Gebirgsbereich um **unterschiedliche Gesteinskörper und** wird der Wirtsgesteinskörper **nicht vollständig vom einschlusswirksamen Gebirgsbereich umschlossen** (Konfigurationstyp Bb in AKEND 2002, s. (s. Abb. xxx1.4.xxx2) kann die Anordnung beider Einheiten allein selbst dann keinen ausreichenden Beitrag zu

einer "günstigen geologischen Gesamtsituation" leisten, wenn sie die geforderten Gesteinseigenschaften aufweisen. Zumindest ist die Qualität der barrierewirksamen Funktion des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches aus Anordnung und Ausdehnung der beteiligten Gesteinskörper nicht ohne weiteres abzuleiten. In erster Näherung dürfte die einschließende Wirkung einer solchen Konfiguration davon abhängig sein, wie weitgehend das Wirtsgestein vom einschlusswirksamen Gebirgsbereich umschlossen wird und in welcher hydraulischen Position sich die Öffnung(en) im einschlusswirksamen Gebirgsbereich befindet (befinden).

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. Dann müssen andere Gegebenheiten, wie beispielsweise große Tiefe und günstige hydraulische und hydrochemische Bedingungen im Endlagerbereich des Endlagers für den Einschluss der Abfälle im Endlager sorgen. Eine solche dem Konfigurationstyp Bb entsprechende Situation liegt beispielsweise dem von Schreiber et al. (2015) beschriebenen Konzept einer möglichen Endlagerung der hochradioaktiven Abfälle in (bevorzugt) kristallinem Wirtsgestein unterhalb mächtiger Salzfolgen der Zechsteinzeit zugrunde (s. Abb. xxx1.4.xxx2, oben).<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Schreiber, U., Ewert, T. u. Jentzsch, G. (2015): Geologische Potentiale zur Einlagerung von radioaktiven Abfallstoffen unterhalb von stratiformen Salzformationen - Konzeptstudie für ein alternatives Endlagermodell.- Universität Duisburg-Essen, Fakultät für Biologie, Fachrichtung Geologie, 22.04.2015.

---



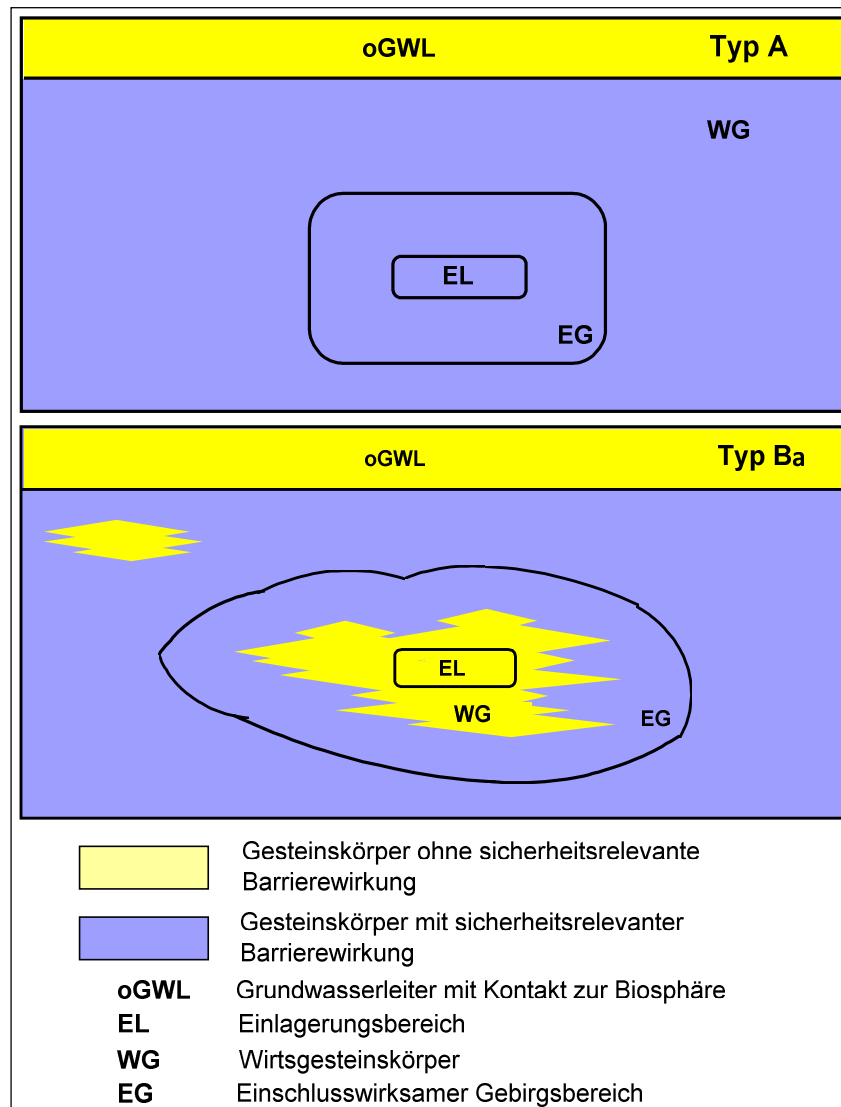


Abbildung xxx1.4.xxx1: Haupttypen der Konfigurationen zwischen Wirtsgestein und einschlusswirksamem Gebirgsbereich (aus AKEND 2002)

Typ A: Wirtsgestein ist sicherheitsrelevanter Bestandteil des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches. Typ B: Wirtsgestein ist kein sicherheitsrelevanter Bestandteil des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches (Darstellung entspricht Typ Ba: Wirtsgestein vollständig von einschlusswirksamen Gebirgsbereich umschlossen / Typ Bb s. Abb. xxx1.4.xxx2)

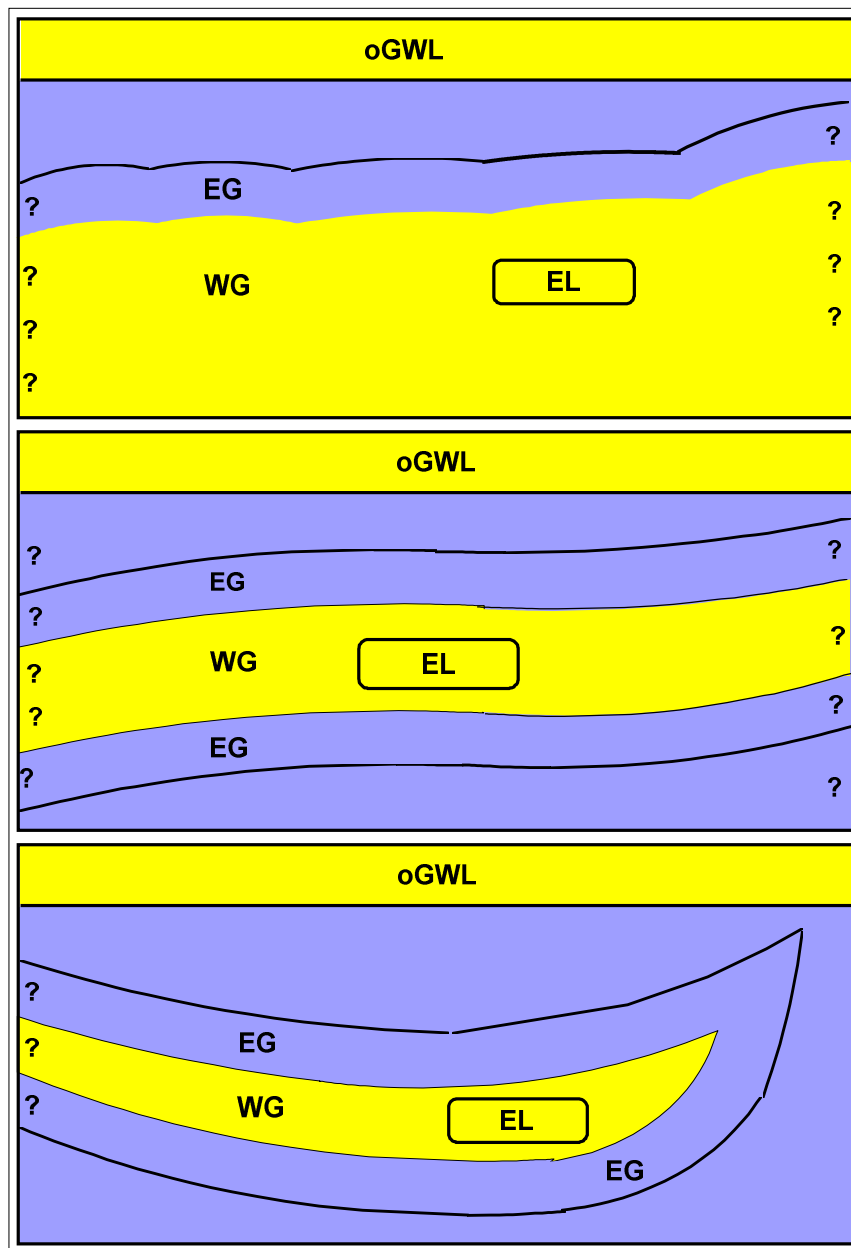


Abbildung xxx1.4.xxx2: Konfigurationstyp Bb (aus AKEND 2002): Geologische Strukturen mit unterschiedlichem Grad der Umschließung des Wirtsgesteinskörpers durch den einschlusswirksamen Gebirgsbereich (schematisch, ohne Maßstab, „?“ bedeutet weitere Ausdehnung unbekannt, Legende siehe Abbildung xxx1.4..xxx1)

- Die **Teufe der Oberfläche des** erforderlichen **einschlusswirksamen Gebirgsbereichs** sollte unter einschränkender Beachtung tiefenabhängiger gebirgsmechanischer Risiken möglichst groß sein, um **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. Nach gegenwärtigem Diskussionsstand kann die unter Anforderung 5 genannte positive gebirgsmechanische Vorgabe (kein massiver tragender Ausbau) nur bis in Tiefen **von 700 bis allenfalls 900 m** unter GOK eingehalten werden.<sup>2</sup>

Bei der Kriterienanwendung sind gegebenenfalls regionsspezifische Einwirkungsszenarien zu beachten, deren etwaigen nachteiligen Auswirkungen auf den Einschluss gegebenenfalls durch **rechtzeitig abgestimmte Vorgabe** einer von den Festlegungen in der Mindestanforderung "Maximale Teufe" und im Abwägungskriterium Robustheit und Sicherheitsreserven abweichende **regionsbezogene Mindesttiefe** zu begegnen ist. 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**

---

<sup>2</sup> In der Schweiz wird derzeit für das HAW-Endlager von max. 700 m Tiefe ausgegangen. Größere Tiefen wären mit massivem Ausbau und daraus resultierend wahrscheinlich mit erheblichen Problemen für die Gewährleistung der Langzeitsicherheit verbunden. Die Entwicklung / Diskussion ist weiter zu beobachten. Die Formulierung eines Abwägungskriteriums zur "bautechnischen Machbarkeit", wie in der Schweiz eingesetzt, sollte diskutiert werden.

---

berücksichtigen zu können, einschließlich Sicherheitsabständen. Eingangsgröße ist die bei einsöhliger Lagerung benötigte Fläche.

- Der **spezifische hydraulische Gradient** über den einschlusswirksamen Gebirgsbereich sollte so gering sein ( $\leq 10^{-2}$ ), dass die aus der Nachbarschaft solcher Gesteinskörper resultierenden Potenzialkontraste die **rechnerische induzierte Abstandsgeschwindigkeit über den einschlusswirksamen Gebirgsbereich** selbst bei Zugrundelegung einer Gebirgsdurchlässigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs von  $10^{-10}$  m/s und einer effektiven Porosität von 10 % **nicht über Werte von 1 mm/a** ansteigen lassen.<sup>3</sup>

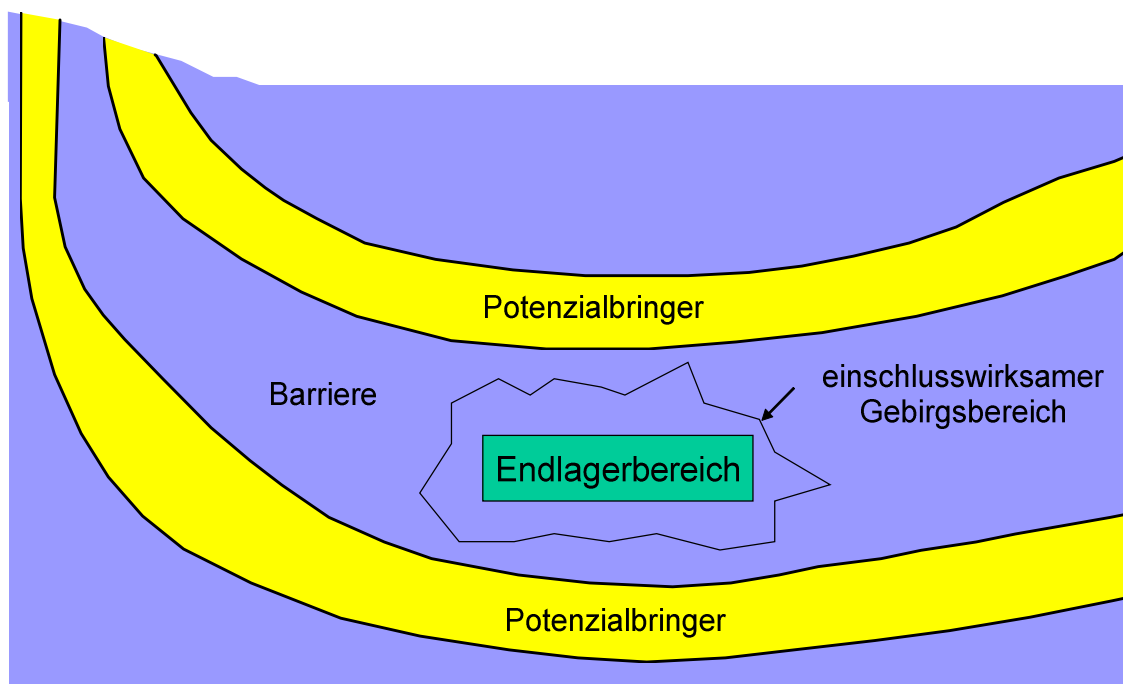


Abbildung xxx1.4.xxx3: Schematische Darstellung von Potenzialgebieten und Endlagerbereich (aus AKEND 2002)

---

<sup>3</sup> Dieses Kriterium bezieht sich auf Tonsteinvorkommen innerhalb heterogen aufgebauter Sedimentgesteinsfolgen

---

Eigenschaften, Bewertungsgrößen bzw. Indikatoren und Wertungsgruppen der  
Kriterien

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums [Dimension]	Bewertungsgröße bzw. Indikator des Kriteriums [Dimension]	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig
Barrierenwirksamkeit	Barrierenmächtigkeit [m]	> 150	100 – 150	50 -100
	Grad der Umschließung des Endlagerbereichs bzw. des Wirtsgesteinskörpers 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 <sup>4</sup> Salzstöcke: > 800 m <sup>5</sup>	300 – 500 Tonstein: 700 - 900 m Salzstöcke: 600 - 800 m	
Volumen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs	Flächenhafte Ausdehnung bei gegebener Mächtigkeit [Vielfaches des Mindest- flächenbedarfs (z. B. für Salz 3 km <sup>2</sup> und Ton 10 km <sup>2</sup> )] <sup>6</sup>	>> 2-fach	etwa 2-fach	<< 2-fach
Durch benachbarte Potenzialbringer (Gesteinskörper mit erhöhtem hydraulischen Potenzial) induzierte Grundwasserströmung durch Wirtsgestein / einschlusswirksamen Gebirgsbereich (gilt im Wesentlichen für Tonstein)	Spezifischer hydraulischer Gradient (bei Gebirgs- durchlässigkeit 10 <sup>-10</sup> m/s und effektiver Porosität 0,1) Rechnerische Abstandsge- schwindigkeit über den einschlusswirksamen Gebirgsbereich bzw. den Wirtsgesteinskörper (bei Gebirgsdurchlässigkeit 10 <sup>-10</sup> m/s und effektiver Porosität 0,1) [m/s] <sup>7</sup>	<< 0,1	etwa 10 <sup>-2</sup> 0,1 - 1	>> 10 <sup>-2</sup>

<sup>4</sup> Die genauen Werte für Tonstein sind noch festzulegen! Der Wert 700 m wurde in Anlehnung an das Vorgehen in der Schweiz gewählt.

<sup>5</sup> s. Änderungsvorschlag Appel zu Mindestanforderung Teufenlage des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs bei Salzstöcken.

<sup>6</sup> Die genauen Flächenbedarfe sind noch festzulegen!

<sup>7</sup> Das Vorhandensein von Gesteinskörpern mit erhöhtem hydraulischem Potenzial ist ein abwägungsrelevanter Sachverhalt. Der spezifische hydraulische Gradient ist jedoch eher eine fragwürdige Beurteilungsgröße. Das gilt auch für die hier mit Vorbehalt ersatzweise eingeführte Größe Abstandsgeschwindigkeit, die gewählt wurde, um Parametergleichheit mit dem Kriterium Grundwasserströmung herzustellen. Der in AKEND 2002 für frühe Verfahrensphasen vorgeschlagene qualitative Indikator "Anschluss von Schichten..." (oder ein ähnlicher Ansatz) ist möglicherweise besser geeignet und wurde in veränderter Form beibehalten (s. Fußnote 8). Soweit bzw. sobald entsprechende Informationen vorliegen sollte statt des hydraulischen Gradienten

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums [Dimension]	Bewertungsgröße bzw. Indikator des Kriteriums [Dimension]	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig

In frühen Phasen des Auswahlverfahrens liegen die zur Anwendung des Kriteriums zur **Bestimmung und Bewertung des spezifischen hydraulischen Gradienten über den einschlusswirksamen Gebirgsbereich bzw. der daraus resultierenden rechnerischen Abstandsgeschwindigkeit** erforderlichen Informationen wahrscheinlich nicht vor. Dann können ersatzweise das Vorhandensein potenzialbringender Grundwasserleiter und die relevanten Eigenschaften der für den Existenz erhöhter Potenziale in Frage kommenden Einheiten zur Beurteilung herangezogen werden. Dazu können folgende Indikatoren zur Anwendung kommen:

#### Indikator a

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

#### Zugehörige Kriterien

- Ein Anschluss an ein hohes 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 Gesteinskörper mit hohem Potenzial bzw. hoher Potenzialdifferenz vorhanden 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.

---

selbst die damit sowie mit Gebirgsdurchlässigkeit  $10^{-10}$  m/s und effektiver Porosität 0,1 ermittelte rechnerische Abstandsgeschwindigkeit benutzt werden.

---

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums [Dimension]	Bewertungsgröße bzw. Indikator des Kriteriums [Dimension]	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig
	Vorhandensein von Gesteinskörpern mit hydraulischen Eigenschaften und hydraulischem Potenzial, die die Induzierung bzw. Verstärkung der Grundwasserbewegung durch den einschlusswirksamen Gebirgsbereich ermöglichen können. <sup>8</sup>	keine Grundwasserleiter als mögliche Potenzialbringer in unmittelbarer Nachbarschaft zum Wirtsgestein / einschlusswirksamen Gebirgsbereich vorhanden	Grundwasserleiter in Nachbarschaft zum Wirtsgestein / einschlusswirksamen Gebirgsbereich vorhanden, jedoch ohne erhöhtes Potenzial	Grundwasserleiter in Nachbarschaft zum Wirtsgestein / einschlusswirksamen Gebirgsbereich vorhanden

Indikator b (in Ergänzung zu AKEND 2002)

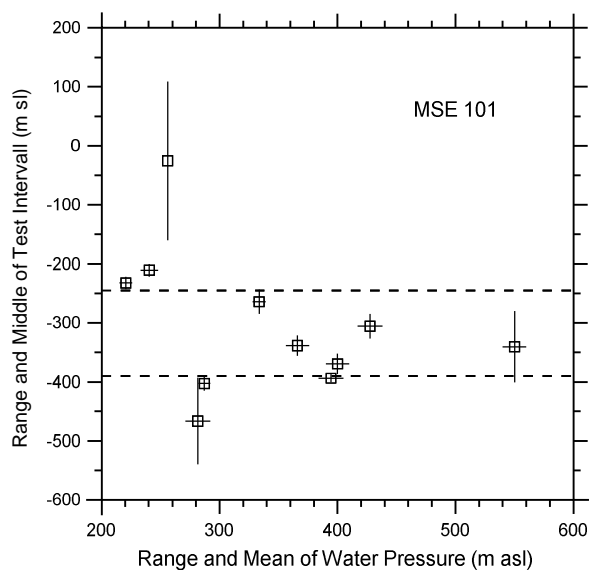
**Hydraulische Drücke im einschlusswirksamen Gebirgsbereich bzw. Wirtsgesteinskörper**, die auffällig von der zu erwartenden hydrostatischen Druckverteilung abweichen, **und / oder deutliche Druckunterschiede zu benachbarten Grundwasser (gering) leitenden Gesteinskörpern**, können ein Hinweis auf die günstige hydraulische Barrierewirkung und damit geringe Gebirgsdurchlässigkeit des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs bzw. Wirtsgesteinskörpers 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 verursachten anomalen Druckunterschiede abzubauen. Voraussetzung für eine solche

<sup>8</sup> Das Vorhandensein von Gesteinskörpern mit erhöhtem hydraulischem Potenzial ist ein abwägungsrelevanter Sachverhalt. Der spezifische hydraulische Gradient ist jedoch eher eine fragwürdige Beurteilungsgröße. Der in AKEND 2002 für frühe Verfahrensphasen vorgeschlagene Indikator "Anschluss von Schichten..." (oder ein ähnlicher Ansatz) ist möglicherweise besser geeignet und wurde in veränderter Form beibehalten. Soweit entsprechende Informationen vorliegen sollte statt des hydraulischen Gradienten selbst die unter Verwendung der rechnerisch Abstandsgeschwindigkeit durch den einschlusswirksamen Gebirgsbereich bzw. den Wirtsgesteinskörper ( $\leq 1 \text{ mm/a}$ ) benutzt werden. Das gilt auch für die hier mit Vorbehalt ersatzweise eingeführte Größe Abstandsgeschwindigkeit, die gewählt wurde, um Parametergleichheit mit dem Kriterium Grundwasserströmung herzustellen.

Interpretation ist aber, dass die die Auffälligkeiten für den für die gesamte geforderte Fläche des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs gelten und die Ursachen dafür plausibel abgeleitet werden können.

### Zugehöriges Kriterium

**Die hydraulischen Drücke im einschlusswirksamen Gebirgsbereich bzw. generell in gering durchlässigem Wirtsgestein sollten von den auf Grund der Tiefenlage des einschlusswirksamen Gebirgsbereich zu erwartenden hydrostatischen Drücken bzw. von den in unter- bzw. überlagernden Potenzialbringern herrschenden Drücken deutlich und plausibel erklärbar abweichen.**



Zur Veranschaulichung des Sachverhalts die Verteilung des Wasserdrucks in Tonstein des Callovo-Oxfordiums und unter- und überlagernden (stärker wasserdurchlässigen) Gesteinen in Abhängigkeit von der Messtiefe

(Daten aus einer Bohrung am Standort Bure (ANDRA, verändert))



### **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 den 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 Wertungsgruppen 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 Abstand > 3 km), flache Lagerung	wenig gestört (weitständige Störungen, Abstand 100 m bis 3 km), Flexuren	intensiv gestört (eng- ständig zerblockt, Ab- stand < 100 m), intensiv gefaltet
	für Salzstrukturen (Salzstöcke) gilt:	große ovale Salzstrukturen		kleine rundliche bzw. schmale gestreckte Salzstrukturen

<b>Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums</b> [Dimension]	<b>Bewertungsgröße des Kriteriums bzw. Indikator</b> [Dimension]	<b>Wertungsgruppe</b>		
		<b>günstig</b>	<b>bedingt günstig</b>	<b>weniger günstig</b>
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.

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.

Eigenschaften, Bewertungsgrößen bzw. Indikatoren und Wertungsgruppen der  
Kriterien

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums [Dimension]	Bewertungsgröße des Kriteriums bzw. Indikator [Dimension]	Wertungsgruppe		
		<b>günstig</b>	<b>bedingt günstig</b>	<b>weniger günstig</b>
Langfristige Stabilität der günstigen Verhältnisse	Veränderung der wesent- lichen <b>sicherheitstragen-</b> <b>den</b> 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

## 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 zusammenstandssichere 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<sup>9</sup> 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.

---

<sup>9</sup> 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.

---

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 Endlagerhohlräume 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. xxx1.4.xxx4 u. xxx1.4.xxx5).

### Eigenschaften, Bewertungsgrößen bzw. Indikatoren und Wertungsgruppen des Kriteriums

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 <sup>10</sup>	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 xxx1.4.xxx4: Festgesteine mit nicht bzw. gering kriechfähigem Materialverhalten; Abbildung xxx1.4.xxx5: Festgesteine mit ausgeprägt kriechfähigem Materialverhalten	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 Gebirgsdruckfestigkeit.	Die zu bewertende Teufe liegt deutlich (> 10 %) oberhalb der Kurve für die maximal mögliche Teufe in Abhängigkeit von der Gebirgsdruckfestigkeit.

Erläuterungen zu Abb. 1.4.xxx4 und 1.4.xxx5

Durchgezogene Linie:  
Kurve für die maximal mögliche Endlagerteufe in Abhängigkeit von der Gebirgsdruckfestigkeit

Gestrichelte Linie:  
Kurve für die gegenüber der maximal möglichen Endlagerteufe in Abhängigkeit von der Gebirgsdruckfestigkeit um 10 % erhöhte Teufe

<sup>10</sup> Das Kriterium steht in engem Zusammenhang mit den unter Anforderung 2 (Konfiguration / Tiefe) diskutierten Problemen, die dort und hier der Lösung harren...

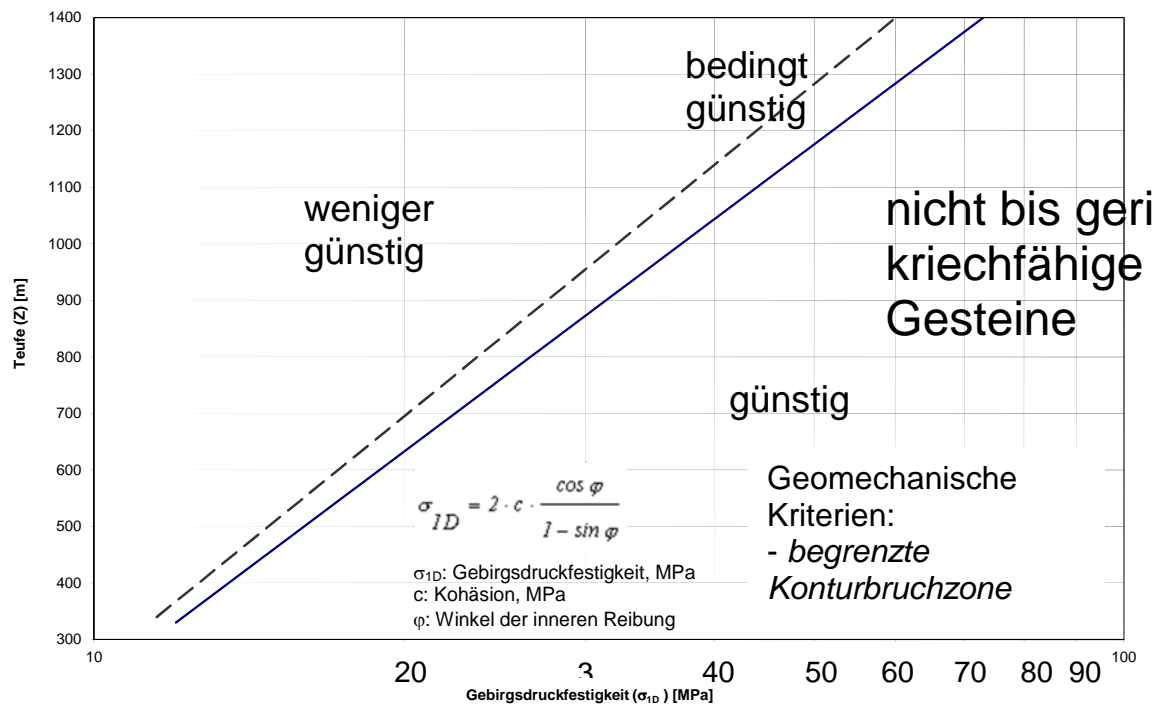


Abbildung xxx1.4.xxx4 (=AkEnd 2002: 5.1): Maximal mögliche Endlagerteufe in Abhängigkeit von der Gebirgsdruckfestigkeit für Festgesteine mit nicht bis gering kriechfähigem (duktilen) Materialverhalten [aus LUX 2002a]

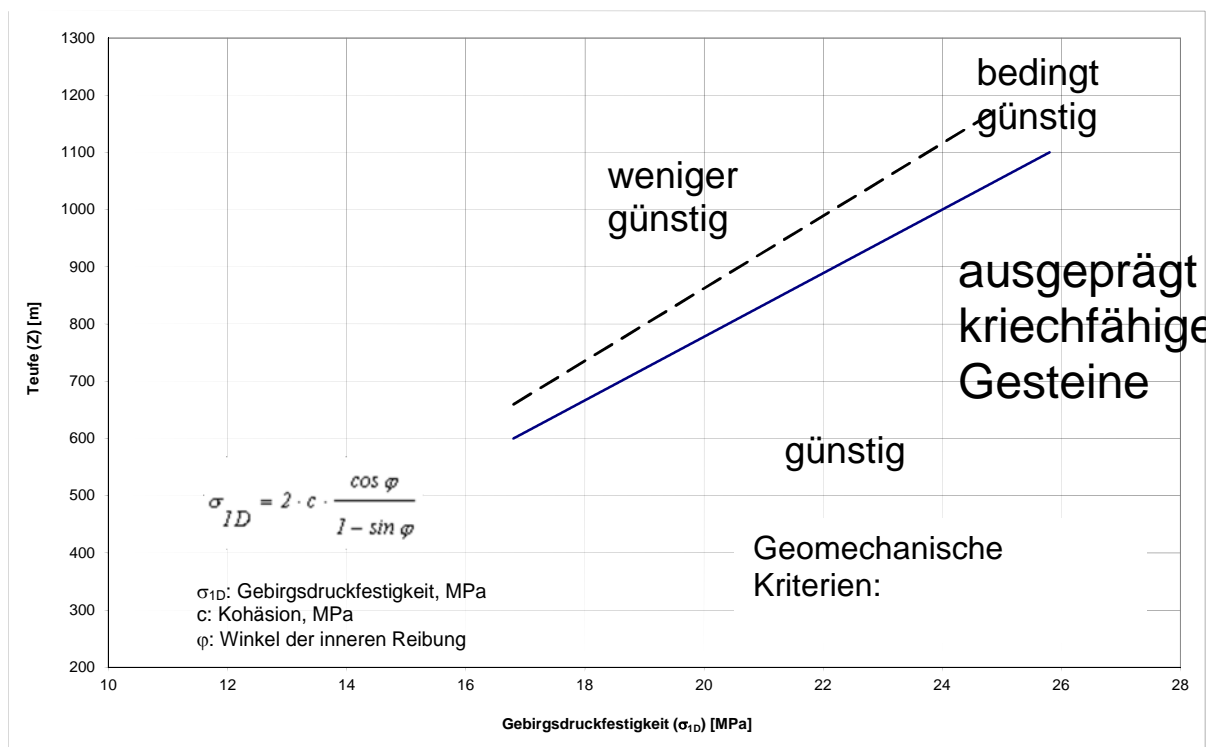


Abbildung xxx1.4.xxx5 (=AkEnd 2002: 5.2): Maximal mögliche Endlagerteufe in Abhängigkeit von der Gebirgsdruckfestigkeit für Festgesteine mit ausgeprägt kriechfähigem (duktilen) Materialverhalten [aus LUX 2002b]

**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.

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 Gefügebrauchlockerungen und Gefügebrauchentfestigungen 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 unvergleichbar 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 Wertungsgruppen 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	Duktig / plastisch- viskos aus- geprägt	spröde-duktig bis elasto- viskoplastisch wenig ausgeprägt	spröde, linear- elastisch
Rückbildbarkeit von Rissen	Rückbildung der Sekundär- permeabilität durch Risschließung	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- verringerung in Verbin- dung mit se- kundären Mechanis- men, z. B. Quelldefor- mationen.	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
	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 (**schwach- und mittelradioaktiver Abfälle**) 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. **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. 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 Wertungsgruppen 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	$> 10^{-9}$	$10^{-9} - 10^{-10}$	$< 10^{-10}$ <sup>11</sup>

---

<sup>11</sup> Bewertungsfunktion (insbes. "weniger günstig") überprüfen! → Kann Druckabbau durch dilatanzgesteuerte Gasmigration in das Wirtsgestein (Steinsalz, Tonstein) mit geringerer Wasserdurchlässigkeit als  $10^{-10}$  m/s im Rahmen der Standortauswahl angemessene Berücksichtigung finden (noch klären!)?

---

### **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 Wertungsgruppen der  
Kriterien

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums [Dimension]	Bewertungsgröße des Kriteriums bzw. Indikator [Dimension]	Wertungsgruppe		
		<b>günstig</b>	<b>bedingt günstig</b>	<b>weniger günstig</b>
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	> 13	≥ 8	< 8
	Tonstein	> 8	≥ 4	< 4
	Steinsalz	> 2	1 - 2	< 1

### **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, 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  $K_d$

herangezogen. Ein Kd-Wert von 0,001 m<sup>3</sup>/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 m<sup>3</sup>/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 Wertungsgruppen 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 <sup>3</sup> /kg]	Uran, Protactinium, Thorium, Plutonium, Neptunium, Zirkonium, Technetium, Palladium, Jod,	Uran, Plutonium, Neptunium, Zirkonium, Technetium, Cäsium	

---

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums [Dimension]	Bewertungsgröße des Kriteriums bzw. Indikator [Dimension]	Wertungsgruppe		
		<b>günstig</b>	<b>bedingt günstig</b>	<b>weniger günstig</b>
		Cäsium, Chlor		
	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**

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<sub>2</sub>-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 und damit ihre Freisetzung und Migration bzw. 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 derzeit<sup>12</sup> 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** vorliegen.
- Der **Gehalt an Kolloiden** im Tiefenwasser sollte **möglichst gering** sein.
- Der **Gehalt an Komplexbildnern** und die **Karbonatkonzentration** im Tiefenwasser sollten **gering** sein.

---

<sup>12</sup> Angaben aus AKEND 2002. Bedürfen der Überprüfung / Aktualisierung.

---



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