

Geschäftsstelle

Kommission
Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe
gemäß § 3 Standortauswahlgesetz

Arbeitsgruppe 3
Entscheidungskriterien sowie Kriterien
für Fehlerkorrekturen

Textvorlagen für den Berichtsteil der AG 3

Von Min Stefan Wenzel am 22. Dezember 2015

<p>Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe K-Drs. /AG3-74</p>

-----Ursprüngliche Nachricht-----

Von: Wenzel, Stefan (MU) [mailto:Stefan.Wenzel@mu.niedersachsen.de]

Gesendet: Dienstag, 22. Dezember 2015 17:13

An: Michael Sailer (m.sailer@oeko.de); 'Armin Grunwald (armin.grunwald@kit.edu)'

Cc: kommission.endlagerung@bundestag.de

Betreff: Textvorlagen für den Berichtsteil der AG-3

Sehr geehrte Vorsitzende der AG 3,
sehr geehrte Damen und Herren,

mit dieser E-Mail sende ich Ihnen Textbeiträge Niedersachsens für den Kommissionsbericht zu folgenden Themen mit der Bitte um Weiterleitung an die Mitglieder der AG3:

1. Berücksichtigung des internationalen Standes von Wissenschaft und Technik;
kein frühzeitiger Ausschluss einzelner Wirtsgesteinstypen
2. Niedersächsischer Textvorschlag zum Abwägungskriterium Temperaturverträglichkeit
3. Niedersächsischer Textvorschlag zur neuen Mindestanforderung
„Günstiges Deckgebirge“

Darüber hinaus erhalten Sie in der Anlage weitere Hinweise zu den Abwägungskriterien AkEnd.

Zu 1.: In der Kommissionsdrucksache AG3-58 (Geowissenschaftliche Kriterien im Rahmen des Standortauswahlverfahrens, Entwurf 2 vom 20.August 2015 Verfasser: Prof. Dr.-Ing. Wolfram Kudla (K-Drs. /AG3-33) Hier: Anmerkungen von Dr. Detlef Appel vom 7. Dezember 2015) soll unter dem Kapitel 1. Ziel nach dem ersten Absatz (Die Endlagerkommission hat gemäß § 4 Abs. 2 (2) des Standortauswahlgesetzes die Aufgabe, „geowissenschaftliche ... Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen im Hinblick auf die Eignung geologischer Formationen für die Endlagerung sowie wirtsgesteinsspezifische Ausschluss- und Auswahlkriterien für die möglichen Wirtsgesteine Salz, Ton und Kristallin sowie wirtsgesteinsunabhängige Abwägungskriterien“ für das Standortauswahlverfahren festzulegen) der nachfolgende Text eingefügt werden:

Nach den Vorgaben des StandAG ist bei der Standortauswahl der Stand von Wissenschaft und Technik anzuwenden. Weiterhin sind internationale Erfahrungen zu analysieren.

Aus der Analyse der internationalen Erfahrungen ist festzustellen, dass die Lagerung Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle sowohl im Wirtsgestein Ton als auch im Wirtsgestein Kristallin den internationalen Stand von Wissenschaft und Technik darstellt. Aus diesem Grund muss dafür Sorge getragen werden, dass diese Wirtsgesteinstypen nicht frühzeitig aus dem Auswahlverfahren ausgeschlossen werden. Insbesondere sollten die Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen in der Phase I des Auswahlverfahrens nicht zu einem solchen Ausschluss führen.

Demnach sind auch die Abwägungskriterien daraufhin zu prüfen, inwieweit sie durch die Wahl der Bewertungsrelevante Eigenschaft und/oder Bewertungsgröße bzw. Indikator des Kriteriums bereits wirtsgesteinsspezifisch ausgerichtet sind.

Zu 2. Der folgende Textvorschlag [s. eckige Klammern] soll zum Abwägungskriterium Temperaturverträglichkeit als Alternativtext Niedersachsens zum Vorschlag der BGR (s. E-Mail Dr. Jan Richard Weber vom 21.12.2015, K-Drs./ AG 3-71) übermittelt werden:

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.

Ergänzung Niedersachsen:

[Aus geologisch/mineralogischer Sicht sollte ein Wirtsgestein zudem grundsätzlich nicht wesentlich höher aufgeheizt werden, als das Gestein in seiner geologischen Vergangenheit an maximaler Temperatur bereits „erlebt“ hat. Im Allgemeinen wird in den Wirtsgesteinen Ton und Kristallin (im Letzteren auf Grund der Bentonitbarriere) eine Einlagerungstemperatur empfohlen, bei der die durch die Abfallwärme hervorgerufene Temperatur innerhalb der geotechnischen Barriere 100 °C bis 125 °C nicht überschreitet. Diese Begrenzung ist vor allem den Materialeigenschaften des Bentonits/Tongesteins und der Siedetemperatur von Lösungen (z.B. Vermeidung von Ausfällung von Salzen) geschuldet, um die Integrität des ewG während des anfänglichen Wärmeeintrags nach Einlagerung zu erhalten. In Salzgesteinen ist die Auswirkung von thermisch oder radiolytisch induzierter Gasbildung und Druckaufbau sowie die Migration von Lösungen/Wasserdampf („Thermomigration“) unter erhöhtem Feuchteeintrag (z.B. durch Salzgrusversatz; Lösungseinschlüsse) kritisch zu bewerten. Die Anwesenheit von inhomogenen Bereichen im Salz (Salztonlagen, Anhydritvorkommen, Carnallititeinschlüssen etc.) kann die thermische Belastbarkeit des Salzgesteins negativ beeinflussen.

Das Wirtsgestein und insbesondere der ewG sollen daher so beschaffen sein, dass temperaturbedingte Änderungen der Gesteinseigenschaften, thermomechanische

Spannungen und wärmeinduzierte Expansion der Gesteine und ihrer Fluide nicht zu einem Festigkeitsverlust oder zur Bildung von Wasserwegsamkeiten führen können.]

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.

Ergänzung Niedersachsen:

* [Da wässrige Lösungen in allen Wirtsgesteinen angetroffen werden können, sollte in allen Wirtsgesteinen zur Vermeidung erhöhter Gasdrücke die Temperatur unterhalb des Siedepunktes von Wasser verbleiben (Druckabhängigkeit beachten).]

Eigenschaften, Bewertungsgrößen bzw. Indikatoren und Wertungsgruppen der Kriterien

Anmerkung: Tabelle muss angepasst werden

Zu 3. Der folgende Text soll als Vorschlag für eine zusätzliche Mindestanforderung „Günstiges Deckgebirge“ dienen:

Mindestanforderung „Günstiges Deckgebirge für Salzformationen für einen Zeitraum von 15.000 Jahren“

Für das Wirtsgestein Salz geht es bei dieser Forderung um die Gewährleistung des Schutzes gegen die Beeinträchtigung der Wirtsgesteinsformation und des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durch Subrosion.

In der Salzstudie der BGR von 1995 wurde dazu ausgeführt: „Eine flächenhafte Überdeckung des Caprock einer Salzstruktur mit wasserhemmenden Unterkreidetonen und einer ungestörte Decke aus Sedimenten der Oberkreide und des Alttertiär (z. B. Rupel-Tone) würde ein optimales geologisches Barriere-System darstellen. Dies ist aufgrund der für das Bergwerkskonzept geforderten geringen Tiefenlage des Caprock im Allgemeinen nicht gegeben. Jedoch erscheint auch eine unverritzte und möglichst ungestörte Überdeckung allein durch die Tone des Alttertiär (Eozän, Rupel) akzeptabel.“

Die Abschätzung der verschiedenen ablaufenden Prozesse im Wirtsgestein Salz zeigt insgesamt „ – bei aller Ungenauigkeit – eine kritische Zeitspanne, die bis zu mehreren tausend Jahren reichen kann“, in der folgende Störungen/Prozessabläufe auftreten können (Appel & Kreuzsch 2006):

* „Allgemeine gebirgsmechanische Vorgänge/Spannungsumlagerungen, die durch die Existenz der Hohlräume und deren Konvergenz induziert werden...

* Thermomechanische Vorgänge, die durch die Ausdehnung des Salzstocks wegen seiner Aufheizung durch die stark wärmeentwickelnden Abfälle auftreten...

* Durch die Bildung von Gas können negative Einflüsse auf die Barriere Salzstock und die geotechnischen Barrieren hervorgerufen werden“

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

Die in Blau markierten Hinweise in der angehängten Datei (2015-12-17_LBEG_Hinweise_appel_20151019_geowiss_abwaeg-krit_akend_kurz.docx) sollen der AG3 zur Berücksichtigung zur Verfügung gestellt werden.

Mit freundlichen Grüßen
Stefan Wenzel

Stefan Wenzel

Niedersächsischer Minister für
Umwelt, Energie und Klimaschutz
Archivstraße 2,
30169 Hannover
Tel.: (0511) 120-3301
Fax: (0511) 120-3199
eMail: stefan.wenzel@mu.niedersachsen.de
www.umwelt.niedersachsen.de

Neue Hinweise sind in grün eingefügt

„Alte“ Hinweise sind in blau eingefügt

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.

[Hinweise aus AG3-36, S. 7](#)

Anmerkung zur Erläuterung: Die Abstandsgeschwindigkeit ist gering bei geringer Gebirgsdurchlässigkeit und geringem hydraulischen Gradienten. Der Einfluss der Porosität ist umgekehrt proportional, d.h. je größer die effektive Porosität desto kleiner ist die Abstandsgeschwindigkeit.

Für das Wirtsgestein Kristallin kann dieses Kriterium wahrscheinlich nicht erfüllt werden. Es könnte diskutiert werden, inwieweit hier künstliche Barrieren mit berücksichtigt werden können oder müssen.

Zugehörige Kriterien

- Die **Grundwasserströmung**, ausgedrückt als Abstandsgeschwindigkeit, sollte **möglichst gering**, d. h. deutlich kleiner als 1 mm pro Jahr, sein.

Hinweise aus AG3-36, S. 8

Über die Fließgeschwindigkeit kann der Gebirgsbereich, den das Grundwasser durch Advektion innerhalb von 1 Million Jahre durchfließen kann, errechnet werden. Die advective, zusammen mit der diffusiven Transportgeschwindigkeit bestimmt damit die Mindestausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches. Die vom AkEnd vorgenommene Gliederung dieses Kriteriums erscheint sinnvoll: der advektiv durchflossene Gebirgsbereich in 1 Million Jahre liegt bei „günstigen“ Abstandsgeschwindigkeiten („günstig“: < 0.1 mm pro Jahr) bei wenigen 10er Metern und bei „bedingt günstigen“ Geschwindigkeiten bei mehreren 100 m. Als „weniger günstige“ Fließgeschwindigkeiten sind vom AkEnd solche über 1 mm pro Jahr festgelegt, da die Mindestausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereich bei diesen Größenordnungen über 1000 m liegen müsste.

Dies erscheint eine sinnvolle Klassifizierung auch im Hinblick auf die geforderten Kriterien zur Gebirgsdurchlässigkeit und dem hydraulischen Gradienten. Als Fließgeschwindigkeit ausgedrückt bedeuten „günstige“ Durchlässigkeiten ($< 10-12$ m/s) und günstige hydraulische Gradienten ($<< 0,01$) bei einer Porosität von 1% eine durchschnittliche Advektionsdistanz von maximal 0,03 mm pro Jahr, bzw. ein advektiv durchflossener Gebirgsbereich von maximal 30 m in 1 Million Jahren (Annahme der Gültigkeit des Darcy-Gesetzes; kf-Wert von 10-12 m/s und einem hydraulischem Gradienten von 0,005).

- Das **Grundwasserangebot** im einschlusswirksamen Gebirgsbereich sollte **möglichst gering** sein. Der einschlusswirksame Gebirgsbereich sollte daher aus Gesteinstypen bestehen, die erfahrungsgemäß geringe Gebirgsdurchlässigkeit aufweisen.

Hinweise neu:

Die hier gewählte Umformulierung des AKEnd Kriteriums ist wenig zielführend und der original Text vom AKEnd (2002) sollte hier wieder aufgenommen werden (original Text AKEnd (2002): „*Der einschlusswirksame Gebirgsbereich sollte aus Gesteinstypen bestehen, die erfahrungsgemäß geringe Gebirgsdurchlässigkeiten aufweisen.*“).

Die Verwendung des Begriffs „Grundwasserangebot“ in diesem Zusammenhang bedarf einer Definition. Der Begriff „Grundwasserangebot“ könnte mit den grundwasserwirtschaftlichen Begriffen „Grundwasserdargebot“ (gem. DIN 4049 Teil 3: Summe aller positiven Glieder der Wasserbilanz für einen Grundwasserabschnitt.) bzw. „gewinnbares Grundwasserdargebot“ (gem. DIN 4049 Teil 3: Teil des Grundwasserdargebots, der mit technischen Mitteln entnehmbar ist.) gleichgesetzt werden.

Der hier verwendete Begriff „Grundwasserangebot“ wird von uns dahingehend interpretiert, dass hiermit der potenziell verfügbare Grundwasserdurchfluss¹ (unter Berücksichtigung aller positiven Wasserbilanzglieder) in einer Formation unter Berücksichtigung aller hydraulischen Eigenschaften (z.B. Speichereigenschaften) erfasst werden soll. Ein Maß des „Grundwasserangebots“ wäre dann z.B. die Porosität des Gesteins. In wie weit die wassergefüllten Poren des Gesteins verbunden sind und damit den Grundwasserdurchfluss ermöglichen, wird über die Durchlässigkeit bestimmt. Die Durchlässigkeit bestimmt zusammen mit dem hydraulischen Gradienten den Grundwasserdurchfluss einer Formation.

Es ist daher sinnvoll,

- 1) das Kriterium, welches den hydraulischen Gradienten behandelt (AKEnd S. 106, Anforderung 2) unter Anforderung 1 zu führen, da der Grundwasserdurchfluss einer Formation direkt proportional ist zum hydraulischen Gradienten, wie auch zur Gebirgsdurchlässigkeit;
- 2) nur die Kriterien unter Anforderung 1 zu listen, die tatsächlich Aussagen über den Grundwasserdurchfluss liefern. Dies sind das Kriterium i) der geringen Grundwasserströmung; ii) der geringen Gebirgsdurchlässigkeit; iii) des geringen hydraulischen Gradienten und vi) der geringen Diffusionsgeschwindigkeit. Der von Herrn Appel formulierte Zusatz „Das **Grundwasserangebot** im einschlusswirksamen Gebirgsbereich sollte **möglichst gering** sein“ sollte unserer Meinung nach aus diesem Kriterium gestrichen werden.

Daher schlagen wir vor die Kriterien unter Anforderung 1 wie folgt zu listen:

- „Die Grundwasserströmung, ausgedrückt als Abstandsgeschwindigkeit, sollte möglichst gering, d. h. deutlich kleiner als 1 mm pro Jahr, sein.“ (*original Text AkEnd (2002), S. 106*)
 - „Der einschlusswirksame Gebirgsbereich sollte aus Gesteinstypen bestehen, die erfahrungsgemäß geringe Gebirgsdurchlässigkeiten aufweisen.“ (*original Text AkEnd (2002), S. 106*)
 - „Der spezifische hydraulische Gradient im einschlusswirksamen Gebirgsbereich sollte gering sein (kleiner 10^{-2}).“ (*original Text AkEnd (2002), S. 106*)

¹ Begriff nach DIN 4049-3: „Grundwasservolumen, das einen bestimmten Grundwasserquerschnitt in der Zeiteinheit durchfließt“

-
- „Die **Diffusionsgeschwindigkeit**, erfasst durch den effektiven Diffusionskoeffizienten im einschlusswirksamen Gebirgsbereich, sollte **möglichst gering** sein (kleiner 10^{-11} m²/s).“ (AKEnd (2002) original Text, S. 106: „Der effektive Diffusionskoeffizient im einschlusswirksamen Gebirgsbereich sollte möglichst gering sein (kleiner 10^{-11} m²/s)“). Weitere Hinweise hierzu siehe nächster Spiegelstrich.
 - Die **Diffusionsgeschwindigkeit**, erfasst durch den effektiven Diffusionskoeffizienten im einschlusswirksamen Gebirgsbereich, sollte **möglichst gering** sein (kleiner 10^{-11} m²/s).

Hinweise aus AG3-36, S. 8

In freiem Wasser findet Diffusion von Lösungsbestandteilen aufgrund der Brown'schen Molekularbewegung statt. In Grundwasserleitern wird die Diffusion gelöster Bestandteile durch den begrenzenden Porenraum eingeschränkt. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, wird die makroskopische Diffusion durch einen Grundwasserleiter mit einem effektiven Diffusionskoeffizienten D_e beschrieben, der neben dem Porenvolumen auch die Form der Poren („Tortuosität“) berücksichtigt. Die Diffusion ist unabhängig vom advektiven Stofftransport und bewirkt daher eine Stoffausbreitung auch in Gesteinsbereichen mit stagnierendem Grundwasser (hydraulischer Gradient ≈ 0).

Die Diffusion ist ionenspezifisch, d.h. jedes Ion geht je nach Ladung und Größe Wechselwirkungen mit dem Gestein ein und hat somit eine ionenspezifische Diffusionsgeschwindigkeit. Dies ist vor allem in Tongesteinen ausgeprägt, da geladene Ionen in Wechselwirkung mit den negativen elektrostatischen Feldern der Tonmineraloberflächen treten. Diffusion ist außerdem temperaturabhängig und nimmt mit steigender Temperatur zu. Auf Grund der Abhängigkeit der effektiven Diffusivität von der Porosität, ist auch eine Richtungsabhängigkeit der Diffusion, vor allem in Tonformationen auf Grund ihrer sedimentären Schichtung, zu beobachten (d.h. die Diffusion ist generell größer parallel zur Schichtung und kleiner senkrecht zur Schichtung).

Auf Grund von Berechnungen zur Ionenausbreitung durch Diffusion (bei $< 10^{-11}$ m²/s wird ein Gesteinskörper von weniger als 50 m in 1 Million Jahre durch Diffusion erfasst) und basierend auf Vergleichen mit gemessenen effektiven Diffusionsgeschwindigkeiten (im Opalinuston, im Boom Clay, in Grimsel Granitoiden und in fennoskanischen Kristallingesteinen) erscheint die vom AkEnd eingeführte Klassifizierung des effektiven Diffusionskoeffizienten plausibel und für alle Wirtsgesteine anwendbar.

Das Kriterium sollte aber, auf Grund der Ionen- und Temperaturabhängigkeit der Diffusion, dahingehend spezifiziert werden, dass Referenztemperatur und das für die Klassifizierung zu Grunde liegende Ion vermerkt wird. Es ist davon auszugehen, obwohl nicht explizit beschrieben, dass der AkEnd die Diffusionswerte auf tritiiertes Wasser (3H₂O; mit Tritium angereichertes Wasser) bei 25 °C bezieht.

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]	< 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 %

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

Hinweise neu:

Ein „auf Dauer trockenes Gestein“ kann in natürlichen Systemen nicht angenommen werden.

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.

[Hinweise aus AG3-36, S. 9](#)

Das Wirtsgestein Kristallin wird dieses Kriterium eher nicht erfüllen können, so dass zu überlegen wäre, ob dieses Kriterium auf Kristallin Anwendung finden kann. Falls ja, könnte für Kristallingesteine diskutiert werden, inwieweit hier künstliche Barrieren mit berücksichtigt werden können oder müssen.

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 einsöhliger 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.

Hinweise aus AG3-36, S. 9-10

Der „spezifische“ hydraulische Gradient ist im technischen (DIN 4049 Teil 3) und wissenschaftlichen Sprachgebrauch keine feststehende Größe, sondern wird im AkEnd über die Abstandsgeschwindigkeit v_a , die effektive durchflusswirksame Porosität n_e und die Gebirgsdurchlässigkeit k_f wie folgt definiert:

$$i = \frac{v_a \cdot n_e}{k_f}$$

Wir halten dieses Kriterium für nur bedingt sinnvoll. Es sollte überlegt werden, ob hier eine verbale Argumentation möglicherweise zielführender ist, die lediglich festlegt, dass ein niedriger hydraulischer Gradient für einen günstigen Endlagerstandort gefordert ist. Diese Einschätzung beruht auf zwei Tatsachen:

Bei Gültigkeit des Darcy-Gesetzes (beschreibt die Gesetzmäßigkeit der Grundwasserströmung), hängt die Abstandsgeschwindigkeit (v_a) des Wassers zwar linear vom hydraulischen Gradienten (i) ab, ist aber ebenfalls von hydraulischer Durchlässigkeit (k_f) und effektiver Porosität (n_e) des Gesteins bestimmt. Der hydraulische Gradient, wie auch die Porosität variieren dabei in geringerem Maße als der k_f -Wert, welcher in den Wirtsgesteinen Kristallin und Ton über mehrere Größenordnungen streuen kann. Deswegen sind eine Festlegung und Beschreibung

der Abstandsgeschwindigkeit v_a , sowie der Gebirgsdurchlässigkeit k_f als primäre Eignungskriterien sinnvoll. Gradienten und Porositäten sind als unterstützende Kriterien einzustufen.

Zum zweiten ist eine Bestimmung des hydraulischen Gradienten in sehr gering durchlässigen Formationen problematisch. In Formationen mit sehr geringen hydraulischen Gradienten und vor allem in Tongesteinen können *adhäsive* Kräfte (auch Haftungskräfte genannt) dazu führen, dass der sonst lineare Zusammenhang zwischen Abstandsgeschwindigkeit und Druckgefälle, und damit das Darcy-Gesetz, an Gültigkeit verliert (Busch et al. 1993). In solchen Fällen ist advektives Fließen nur oberhalb eines Schwellenwertes möglich. Bei Gradienten unterhalb des Schwellenwertes ist die Advektion stark eingeschränkt (GRS 2005). Für den Opalinuston wurde über Permeameter- und Packertests der Schwellenwert für den hydraulische Gradienten z.B. auf < 1 festgelegt, wobei jedoch die Unsicherheit bei der Bestimmung des Schwellendrucks aus messtechnischen Gründen relativ hoch ist (NAGRA 2002). In Laborversuchen konnte nachgewiesen werden, dass aufgrund des adhäsiv gebundenen Wassers in intakten Opalinustonproben nur advektive Fließwege unter extrem hohen hydraulischen Gradienten existieren. In-situ Versuche um den hydraulischen Gradienten im Opalinuston zu bestimmen, waren bisher erfolglos. Auch Langzeitbeobachtungen seit 1999 haben die Druckverhältnisse im Opalinuston nicht klären können. Dies wird aber auf Grund der geringen Bedeutung des advektiven Flusses für die Langzeitsicherheit eines Endlagers im Opalinuston toleriert (KNE 2005).

Ergänzende Hinweise neu:

Wenn ein Kriterium zum hydraulischen Gradienten formuliert werden soll, dann sollte es unter Anforderung 1 geführt werden, da der Gradient eine bestimmende Größe der Grundwasserabstandsgeschwindigkeit und damit des Grundwasser-transportes ist. Der Grundwassertransport wird unter Anforderung 1 behandelt.

Die gewählte Neuformulierung des Kriteriums zum hydraulischen Gradienten ist aber insgesamt missverständlich. Wir empfehlen daher, den original Text des AKEnd (2002) wieder aufzunehmen (AKEnd, 2002, S. „*Der spezifische hydraulische Gradient im einschlusswirksamen Gebirgsbereich sollte gering sein (kleiner 10^{-2})*.“ Das Kriterium in AKEnd (2002), sowie dessen Bewertung (siehe Tabelle weiter unten) bezieht sich auf den hydraulischen Gradienten im ewG.

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]	> 150	100 – 150	50 -100
	Grad der Umschließung des Endlagerbereichs bzw. des Wirtsgesteins durch den einschlusswirksamen Gebirgsbereich	vollständig	unvollständig	
Robustheit und Sicherheitsreserven	Teufe der oberen Begrenzung des erforderlichen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs [m unter Geländeoberfläche]	> 500 Tonstein: 500 – 700 m ² Salzstöcke: > 800 m ³	300 - 500 Tonstein: 700 – 900 m Salzstöcke: 600 – 800 m	? Tonstein: 700 – 900 m
Volumen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs	Flächenhafte Ausdehnung bei gegebener Mächtigkeit [Vielfaches des Mindestflächenbedarfs (z. B. für Salz 3 km ² und Ton 10 km ²)] ⁴	> 2-fach	2-fach	< 2-fach
Vorhandensein von Gesteinskörpern mit erhöhtem hydraulischen Potenzial ⁵ Evtl. neues Kriterium zur Vermeidung der Aufprägung erhöhten Potenzials	Spezifischer hydraulischer Gradient (bei Gebirgsdurchlässigkeit 10 ⁻¹⁰ m/s und effektiver Porosität 0,1)	<< 10 ⁻²	etwa 10 ⁻²	>> 10 ⁻²

Hinweise neu:

Zum Zusatz „Evtl. neues Kriterium zur Vermeidung der Aufprägung erhöhten Potenzials“, bzw. Fußnote 4 in der obigen Tabelle:

Der Zusatz bezieht sich hier auf mögliche Beeinträchtigungen der Barrierewirkung des ewG durch die Nähe zu Gesteinskörpern mit erhöhtem hydraulischem Potenzial (AKEnd (2002), S. 130).

² Die genauen Werte für Tonstein sind noch festzulegen!

³ s. Änderungsvorschlag zu Mindestanforderung Teufenlage des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs

⁴ Die genauen Flächenbedarfe sind noch festzulegen!

⁵ Das Vorhandensein von Gesteinskörpern mit erhöhtem hydraulischen 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. Soweit entsprechende Informationen vorliegen sollte statt des hydraulischen Gradienten selbst die dadurch verursachte Abstandsgeschwindigkeit (≤ 1 mm/a)

Wirtsgestein, Nebengestein und Deckgebirge übernehmen die Funktion natürlicher Barrieren in einem Mehrbarrierensystem. In diesem Sinne stellen prinzipiell günstige hydrogeologische Eigenschaften (d.h. geringe Fließgeschwindigkeiten, geringe Durchlässigkeiten, geringe hydraulische Gradienten, hohes Sorptionspotenzial etc.) nicht nur für den ewG, sondern auch für die den ewG umgebenden Nebengesteine/Deckgebirge eine günstige hydrogeologische Voraussetzungen für einen Endlagerstandort dar (BGR Kristallinstudie, 1994).

Im AKEnd (2002) wurde die Barrierewirksamkeit der Nebengesteine abgedeckt in der Diskussion über die „Konfiguration der Gesteinskörper“ (AKEnd, S. 129). Diese führte zur Festlegung einer günstigen geologischen Gesamtsituation über i) die Barrieremächtigkeit; ii) den Grad der Umschließung des Wirtsgesteins durch den ewG; iii) der Mächtigkeit des Deckgebirges; iv) der flächenhaften Ausdehnung des ewGs und v) der hydraulischen Gradienten im ewG (siehe Tabelle AKEnd 2002, S. 106).

Eine alleinige Festlegung eines Kriteriums für den hydraulischen Gradienten im Nebengestein ist daher nicht zielführend.

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.
-

Anforderung 3: Gute räumliche Charakterisierbarkeit

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

Zugehörige Kriterien

Ermittelbarkeit

- Die **charakteristischen Eigenschaften** der den einschlusswirksamen Gebirgsbereich bzw. den Wirtsgesteinskörper 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 einschlusswirksamen Gebirgsbereich / 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 (engständig zerblockt, Abstand < 100

Bewertungsrelevante Eigenschaft des Kriteriums [Dimension]	Bewertungsgröße des Kriteriums bzw. Indikator [Dimension]	Wertungsgruppe		
		günstig	bedingt günstig	weniger günstig
				m), intensiv gefaltet
	für Salzstrukturen (Salzstöcke) gilt:	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.

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.

Hinweise neu:

Zu Satz 1: Folgender Satz des AkEnd könnte hier (s. *) verbleiben, da er für das Verständnis wichtig ist: „Erst dann können zukünftige Entwicklungen der geologischen Verhältnisse analysiert werden.“

Der AkEnd formulierte die Forderung nach Prognostizierbarkeit genauso, schränkte die weitere Betrachtung aber auf die drei Merkmale „Mächtigkeit“, „Ausdehnung“ und „Gebirgsdurchlässigkeit“ ein. Durch Einschub des Wortes „insbesondere“ sind weitere „sicherheitsrelevante Merkmale“ möglich, es ist aber nicht im Einzelnen benannt, welche diese sein könnten.

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.

Hinweise neu:

Durch Einschub des Wortes „insbesondere“ sind weitere „sicherheitsrelevante Merkmale“ neben den drei Merkmalen „Mächtigkeit“, „Ausdehnung“ und „Gebirgsdurchlässigkeit möglich, es ist aber nicht im Einzelnen benannt, welche diese sein könnten (dies gilt auch für die nachfolgende Tabelle).

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

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. Streckendamm-bauwerken 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 Eigentragungsfähigkeit des Gebirges zusammen standsichere 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.

Hinweise neu:

Die Erklärungen des AkEnd (2002) zum Indikator verbessern das Verständnis und könnten beibehalten werden: „Sekundärpermeabilitäten sind infolge einer Beanspruchung, die die Dilatanzfestigkeit überschreitet, auf dilatante Gebirgsdeformationen zurückzuführen. Dabei erweitern sich vorhandene Fissuren, und es können sich darüber hinaus neue Risse ausbilden und vernetzen.“

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).

Hinweise neu:

Zu Satz 2 („Danach besteht...“): Die Aussage ist unverständlich. Der AkEnd stellt eine Abhängigkeit zwischen der zulässigen Teufenlage und der repräsentativen Gebirgsdruckfestigkeit her. Demnach sollte Satz 2 im obigen Abschnitt lauten:

„Danach besteht bei Berücksichtigung bestimmter gebirgsartbezogener Vorgaben ein Zusammenhang zwischen zulässiger Teufenlage eines Grubenbaus und der Gebirgsdruckfestigkeit, die zur Beurteilung der Neigung zur Ausbildung von Sekundärpermeabilitäten genutzt werden kann.“

Eigenschaften, Bewertungsgrößen bzw. Indikatoren und Erfüllungsfunktionen 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	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 bzw. gering kriechfähigem Materialverhalten; Abbildung 5.2XXX: 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.

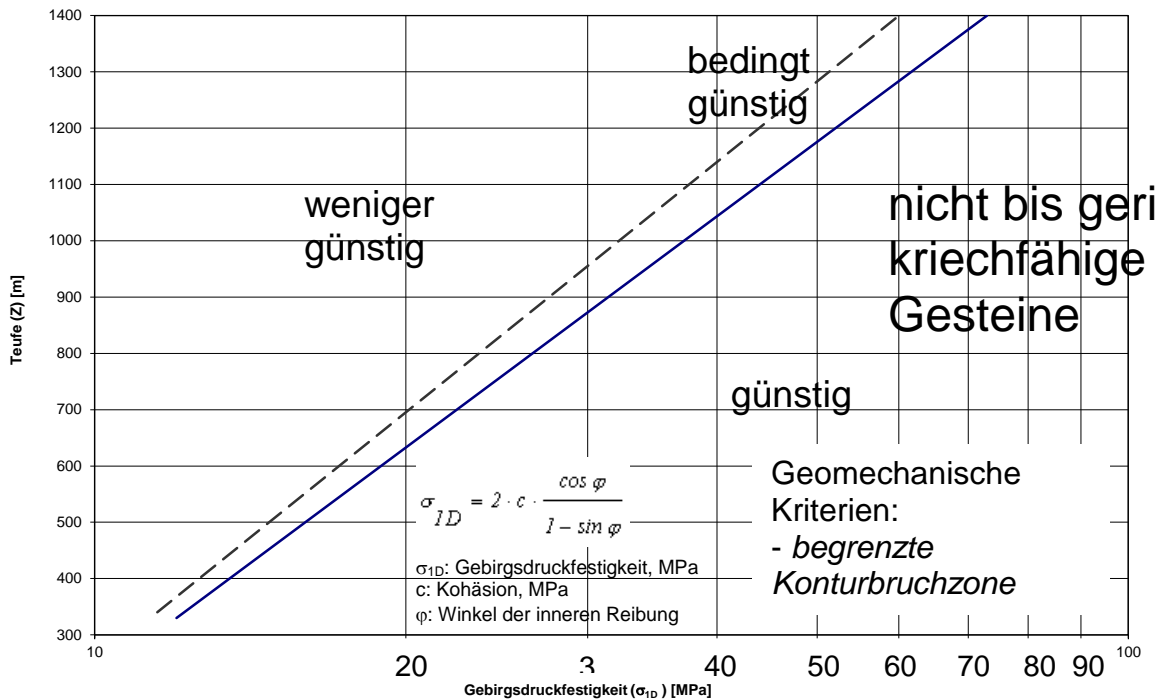


Abbildung 5.1xxx: Maximal mögliche Endlagerteufe in Abhängigkeit von der Gebirgsdruckfestigkeit für Festgesteine mit nicht bis gering kriechfähigem (duktilen) Materialverhalten [aus LUX 2002a]

Hinweise neu:

Die Kurven sollten in diesem und im nächsten Abbildungstext erläutert werden: „... Materialverhalten (durchgezogene Linie) und 10% größere Teufenlage (gestrichelte Linie)“

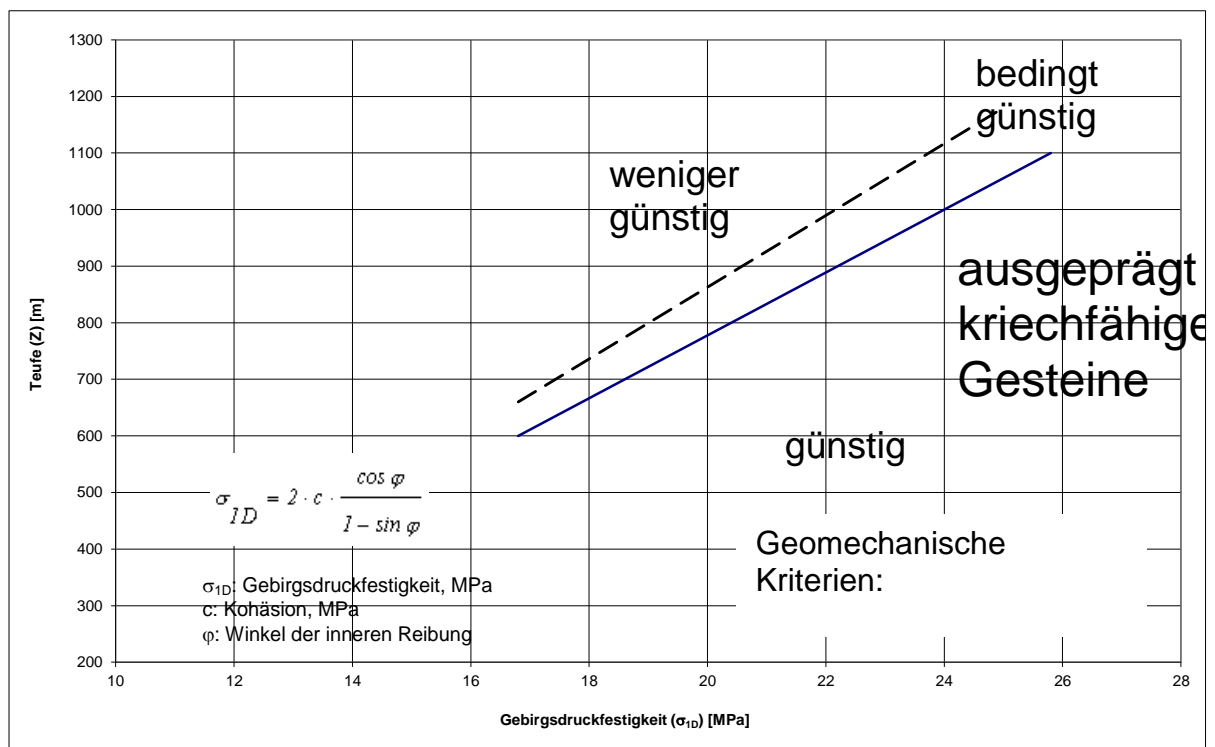


Abbildung 5.2xxx: Maximal mögliche Endlagerteufe in Abhängigkeit von der Gebirgsdruckfestigkeit für Festgesteine mit ausgeprägt kriechfähigem (duktilem) Materialverhalten [aus LUX 2002b]

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 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 theseartige Formulierung folgender Sachverhalte als Eigenschaften nahe:

[Hinweise aus AG3-36, S. 11](#)

Das Wirtsgestein Kristallin wird dieses Kriterium eher nicht erfüllen können, so dass zu überlegen wäre, ob dieses Kriterium auf Kristallin Anwendung finden kann. Falls ja, könnte für Kristallingesteine diskutiert werden, inwieweit hier künstliche Barrieren mit berücksichtigt werden können oder müssen.

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**).

[Hinweise aus AG3-36, S. 12](#)

Das Wirtsgestein Kristallin wird dieses Kriterium eher nicht erfüllen können, so dass zu überlegen wäre, ob dieses Kriterium auf Kristallin Anwendung finden kann. Falls ja, könnte für Kristallingesteine diskutiert werden, inwieweit hier künstliche Barrieren mit berücksichtigt werden können oder müssen.

- **Risse/Risssysteme im Gestein** sollten **bei Beanspruchungsinversion** (zunehmende isotrope Beanspruchung und abnehmende deviatorische Beanspruchung) **geohydraulisch wirksam verschlossen** sein (Bewertungsgröße: Rückbildung der Sekundärpermeabilität durch Risschließung).

[Hinweise aus AG3-36, S. 12](#)

Das Wirtsgestein Kristallin wird dieses Kriterium eher nicht erfüllen können, so dass zu überlegen wäre, ob dieses Kriterium auf Kristallin Anwendung finden kann. Falls ja, könnte für Kristallingesteine diskutiert werden, inwieweit hier künstliche Barrieren mit berücksichtigt werden können oder müssen.

-
- **Risse/Risssysteme im Gestein** sollten **nach der Rissschließung 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 Gesteinsdurchlässigkeit [Maß ist die Wasserdurchlässigkeit in m/s]	< 10	≤ 100	> 100
	Erfahrungen über die Barrierewirksamkeit der Gebirgsformationen	Die Gebirgsformation / der Gesteinstyp wird unmittelbar / mittelbar anhand eines oder mehrerer Erfahrungsbereiche als gering durchlässig bis geologisch dicht identifiziert, auch unter geogener / technogener Beanspruchung.	Die Gebirgsformation / der Gesteinstyp ist mangels Erfahrung nicht unmittelbar / mittelbar als gering durchlässig bis geologisch dicht zu charakterisieren.	Die Gebirgsformation / der Gesteinstyp wird unmittelbar / mittelbar anhand eines Erfahrungsbereichs als nicht hinreichend gering durchlässig identifiziert.
	Duktilität des Gesteins	Duktill / plastisch-viskos ausgeprägt	spröde-duktil bis elasto-viskoplastisch wenig ausgeprägt	spröde, linear-elastisch
Rückbildbarkeit von Rissen	Rückbildung der Sekundärpermeabilität durch Risschließung	Die Risschließung erfolgt aufgrund duktilen Materialverhaltens unter Ausgleich von Oberflächenrauigkeiten im Grundsatz vollständig.	Die Risschließung erfolgt durch mechanische Rissweitenverringern in Verbindung mit sekundären Mechanismen, z. B. Quelldformationen.	Die Risschließung erfolgt nur in beschränktem Maße (z. B. sprödes Materialverhalten, Oberflächenrauigkeiten, Brückenbildung).

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 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 einschusswirksamen 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 ⁶

Anforderung 8: Gute Temperaturverträglichkeit

⁶ Bewertungsfunktion (insbes. "weniger günstig" überprüfen!)

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

Hinweise aus K-Drs./AG3-36, Seite 12:

Dieses Kriterium sollte die Verträglichkeit in Bezug auf die thermische Expansion der Gesteine und ihrer Fluide abdecken.

Hinteraus geologisch/mineralogischer Sicht sollte ein Wirtsgestein grundsätzlich nicht wesentlich höher aufgeheizt werden, als das Gestein in seiner geologischen Vergangenheit an maximaler Temperatur bereits „erlebt“ hat. Der Opalinuston der Nordschweiz hat in seiner geologischen Geschichte über Millionen von Jahren Temperaturen im Bereich von 80 – 90 [°C] erfahren (Nagra, 2002; Mazurek et al., 2006). In wieweit dieser Ansatz auch auf das Wirtsgestein Salz angewendet werden sollte, ist Gegenstand der wissenschaftlichen Forschung.

Im Allgemeinen wird in den Wirtsgesteinen Ton und Kristallin (im Letzteren auf Grund der Bentonit-barriere) eine Einlagerungstemperatur empfohlen, bei der die durch die Abfallwärme hervorgerufene Temperatur innerhalb der geotechnischen Barriere 100 °C bis 125 °C nicht überschreitet (z.B. SKB, 2011; NAGRA 2002). Diese Begrenzung ist vor allem den Materialeigenschaften des Bentonits/Tongesteins und der Siedetemperatur von Lösungen (z.B. Vermeidung von Ausfällung von Salzen) geschuldet, um die Integrität des ewG während des anfänglichen Wärmeeintrags nach Einlagerung zu erhalten.

Die thermisch beeinflussten Prozesse in den Wirtsgesteinen und den geotechnischen Barrieren sind nach wie vor Gegenstand intensiver Forschung. Besonders in Bezug auf die Einlagerungstemperaturen für das Wirtsgestein Salz sind viele Prozesse Gegenstand sehr kritischer Diskussion und es wird weiterer Forschungsbedarf gefordert.

Die Grenztemperatur für die thermische Belastung wurde in reinem Steinsalz bislang mit 200°C angegeben. Da wässrige Lösungen in allen Wirtsgesteinen angetroffen werden können, sollte in allen Wirtsgesteinen zur Vermeidung erhöhter Gasdrücke die Temperatur unterhalb des Siedepunktes von Wasser verbleiben (Druckabhängigkeit beachten).

Wie die thermische Belastbarkeit von inhomogenen Salzvorkommen (Auswirkungen von Salztonlagen, Anhydritvorkommen, Carnalliteinschlüssen etc.) zu bewerten ist, ist noch nicht abschließend geklärt. Ebenfalls nicht abschließend diskutiert ist die Auswirkung von thermisch oder radiolytisch induzierter Gasbildung und Druckaufbau sowie die Migration von Lösungen/Wasserdampf („Thermomigration“) unter erhöhtem Feuchteeintrag (z.B. durch Salzgrusversatz; Lösungseinschlüsse).

Die Formulierung in der Erläuterung sollte daher mit einem Zusatz erweitert werden:

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

Hinweise neu:

Das Kriterium zur Temperaturverträglichkeit und seine Wertungsgruppen sollte nach Fertigstellung des Gutachtens „Wärmeentwicklung- Gesteinsverträglichkeit“, basierend auf den Ergebnissen, ggfs. angepasst werden.

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.

Hinweise neu:

Wie im vorangehenden Text erläutert, kann es auf Grund der Vielzahl von Einflussgrößen auf die Sorption (u.a. Redoxmilieu, pH, Ionenstärke), keine Ableitung eines pauschal anwendbaren quantitativen Kriteriums für die Sorptionsfähigkeit eines Gesteins geben. Eine Beurteilung der Sorptions-eigenschaften an potenziellen Standorten kann nur im Rahmen einer komplexen Gesteins-, Nuklid- und geochemischen Fallunterscheidung vorgenommen werden. Eine Festlegung auf einen Kd Wert ist daher nur für bestimmte experimentelle Bedingungen möglich (z. B. bezüglich pH, Ionenstärke, allgemeine Lösungszusammensetzung) und eine Übertragung von Kd Werten auf andere geochemische Bedingungen ist nicht gegeben.

Daher wäre es sinnvoll diesem Kriterium eine Erläuterung beizufügen, dass Sorptionskoeffizienten von Radionukliden für potenzielle Standorte nur bei Bestimmung unter den ortsspezifischen geochemischen Verhältnissen und unter endlagerrelevanten Bedingungen aussagerelevant sind. Ähnlich der Beurteilung von günstigen geochemischen Parametern gilt hier, dass zur Ermittlung der Eigenschaft „große Sorptionsfähigkeit“ standortspezifische Kenntnisse vorliegen müssen, die erst in späteren Verfahrensschritten bereitgestellt werden können.

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

Hinweise neu:

Evtl. wäre auch die Angabe einer minimalen Kationenaustauschkapazität (KAK) (meq/100g) wie sie im Deponiebau (z.B. 10 mmol(eq)/100 g als Orientierungswert – Der KAK-Wert ist bundesweit einheitlich nicht rechtlich verbindlich festgelegt) verwendet wird, hilfreich. Es wäre auch ggfs. zu prüfen, ob das für Böden entwickelte Konzept der sogenannten Pedo-Transfer-Faktoren zur Ableitung einer statistischen Beziehung zwischen Gesteinseigenschaften und Sorptionsfähigkeit des Gesteins herangezogen werden könnte. Bodenkennwerte, wie Tongehalt, organischer C-

Gehalt, pH-Wert und Lagerungsdichte werden dabei für eine Abschätzung der Sorptionseigenschaften eines Bodens in erster Näherung ausgewertet. Liegen weitere analysierte sorptionsrelevante Bodenkennwerte, wie z.B. Kationenaustauschkapazität oder Gehalte an Mineraloxidphasen (Fe_{ox} , Al_{ox} , Mn_{ox}) vor, kann die Ermittlung der Sorptionseigenschaften präzisiert werden (BLA-GEO, 2008).

Eine solche Abschätzung der Sorptionseigenschaften von Wirtsgesteinen in erster Näherung wäre am Anfang von Detailuntersuchungen einsetzbar. Diese Abschätzungen sind, bedingt durch die Art der Ableitung, mit Unsicherheiten behaftet und die direkte Messung von Sorptionsfähigkeiten unter den örtlichen geochemischen Verhältnissen und unter endlagerrelevanten Bedingungen sind in einem späteren Verfahrensschritt unumgänglich.

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	
	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 derzeit⁷ 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

⁷ Angaben aus AKEND 2002. Bedürfen der Überprüfung / Aktualisierung.

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.

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.
