

Geschäftsstelle

Kommission
Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe
gemäß § 3 Standortauswahlgesetz

Arbeitsgruppe 3
Entscheidungskriterien sowie Kriterien
für Fehlerkorrekturen

**Beratungsunterlage zu TOP 5 der 12. Sitzung am 22. September 2015
Hinweise zu den „Geowissenschaftlichen Kriterien“ unter Bezug auf
K-Drs. /AG3-33**

„Geowissenschaftliche Kriterien im Rahmen des Standortauswahlverfahrens (Entwurf 2, 20. August 2015)

Niedersächsisches Umweltministerium, Min Wenzel, 18. September 2015

<p>Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe K-Drs. /AG3-36</p>

Anhang 1 zum Schreiben Minister Wenzel an die Geschäftsstelle der Endlagerkommission vom 18.09.2015

Hinweise zu den „Geowissenschaftlichen Kriterien“ unter Bezug auf Kommissionsdrucksache K-Drs./AG3-33 „Geowissenschaftliche Kriterien im Rahmen des Standortauswahlverfahrens (Entwurf 2, 20. August 2015)

In der Tischvorlage K-Drs./AG3-33 zur 11. Sitzung der AG 3 am 25.08.2015 wurde unter Einarbeitung der Ergebnisse der Diskussion aus der 10. Sitzung der AG 3 der 2. Entwurf zu den geowissenschaftlichen Kriterien vorgelegt.

Die folgenden Hinweise betreffen ausschließlich die geowissenschaftlichen Kriterien, das vom AKEnd (2002) vorgeschlagene Verfahren ist nicht Gegenstand der Diskussion. Das Papier soll als „Living Paper“ verstanden werden, es soll die Diskussion um die Kriterien unterstützen und Anregungen für eine vertiefende Diskussion geben.

Die Hinweise sind in **grün** unter die jeweiligen Kriterien eingefügt. Alle schwarzen Texte sind aus der Unterlage entnommen.

Unterlagen

K-MAT 1: AkEnd (2002): Auswahlverfahren Endlagerstandorte. Empfehlungen des AKEnd – Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte, 260 S.

K-Drs./AG3-33 (Stand 20.08.2015): Beratungsunterlage zu TOP 4 der 11. Sitzung am 25. August 2015 Geowissenschaftliche Kriterien im Rahmen des Standortauswahlverfahrens, Entwurf 2, Verfasser: Prof. Dr.-Ing. Wolfram Kudla unter Mitarbeit von Dr. Detlef Appel

Ausschlusskriterien

1)

Großräumige Vertikalbewegungen

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

(Erläuterung: Großräumige Hebungen eines Gebirgsbereiches in dem ein Endlager eingebettet ist, könnten dazu führen, dass an der Geländeoberfläche verstärkt Erosion auftritt, die die notwendige Schutzwirkung der Überdeckung des Endlagers beeinträchtigen kann. siehe AK-End-Bericht Seite 86-87)

Hinweise:

Die Festlegung des Kriteriums auf 1 mm pro Jahr erscheint eine plausible, „sichere“ Größe, allerdings sollte im Rahmen der Abwägung eine weitere vertiefende Beurteilung der regionalen geodynamischen Verhältnisse vorgenommen werden.

Hintergrund:

In der aktuellen Literatur wird zwischen "Oberflächenhebung" (engl. „surface uplifts“) und "Gesteinshebung" (engl. „uplift of rocks“) unterschieden. (Oberflächenhebung ist Gesteinshebung minus Erosion: „Exhumierung“, engl. „exhumation“) (England & Molnar 1990, Burbank & Anderson 2012). Für die Sicherheit eines Endlagers ist die Abtragsrate durch Erosion die entscheidende Größe. In der jüngeren geologischen Geschichte von wenigen Millionen Jahren sind in Deutschland im Rahmen von Hebungen keine Abtragungen in Größenordnungen von 1000 m bekannt. Die besten Anzeiger für ero-

Anhang 1 zum Schreiben Minister Wenzel an die Geschäftsstelle der Endlagerkommission vom 18.09.2015

sionsgefährdete Gebiete sind wahrscheinlich Flüsse, die sich in jüngster Zeit stark eingeschnitten haben. Mittels kosmogener Nuklide können gemittelte Erosionsraten für größere Gebiete abgeschätzt werden (hierbei handelt es sich um durch kosmische Strahlung entstandene Nuklide, meist radioaktive Isotope, die als geochemische Fingerabdrücke und als Datierungswerkzeuge genutzt werden können, um Materialien oder Geländeformen der Erdoberfläche zu datieren).

Folgende Fragen wären für eine Beurteilung dieses Kriterium noch zu diskutieren:

- Was wird unter "tektonischer" Hebung verstanden? Wie kann sie von anderer Hebung (z. B. durch Isostasie = Dichteausgleichsbewegungen) unterschieden werden und ist dies sinnvoll?
- Wie repräsentativ sind aktuelle Messungen in Bezug auf den Nachweis-/Prognosezeitraum von 1 Million Jahre, d.h. inwieweit sind Messreihen von wenigen Jahren aussagekräftig und in die Zukunft übertragbar/prognostizierbar?
- Falls Messungen herangezogen werden sollten, ist zu klären, welches Bezugssystem für die Messungen gelten soll: der Meeresspiegel, also ein Pegel mitunter an der (fernen) Küste? Die relative Hebung im lokalen und regionalen Umfeld des Einlagerungsbereiches ist wahrscheinlich die kritischere Größe.
- Welche Messmethoden würden akzeptiert? Feinnivellements? Satellitenmessungen?

Ergänzung zu den Messmethoden: In der Geodäsie („Wissenschaft von der Ausmessung und Abbildung der Erdoberfläche“) ist im letzten Jahrzehnt großer wissenschaftlicher und technischer Fortschritt erzielt worden, insbesondere bei den satellitengestützten Messverfahren. Innerhalb des europäischen Erdbeobachtungsprogramms Copernicus (<http://www.d-gmes.de/>) entwickelt das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) zurzeit gemeinsam mit der BGR und Unternehmen eine Bodenbewegungskarte. Frühestens 2018 ist mit einer Fertigstellung der ersten operativen Version einer deutschlandweiten Bodenbewegungskarte zu rechnen. Die Genauigkeit der angegebenen Raten wird allerdings nicht einheitlich sein. Es wird Gebiete geben, in denen eine Genauigkeit von kleiner 1mm pro Jahr erreicht werden kann, andere Gebiete werden wahrscheinlich deutlich über diesem Wert liegen.

Hebungen durch anthropogene Eingriffe, zum Beispiel bei Flutungen von Bergwerken, sind von den großräumigen natürlichen Hebungen zu unterscheiden und sollten daher nicht unter dieses Kriterium fallen. Sie sollten unter den Abwägungen betrachtet werden.

2)

Aktive Störungzonen

In der Endlagerregion dürfen keine geologisch aktiven Störungzonen vorhanden sein, die den einschlusswirksamen Gebirgsbereich beeinträchtigen können.

(Erläuterung: Im Rahmen der Auswahl der Standortregionen (1. Schritt des Auswahlverfahren) ist der einschlusswirksame Gebirgsbereich eines Endlagers noch nicht bekannt. Für die Größe des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches einschließlich des gesamten Endlagerbergwerkes wurden im AKEnd-(Stand 2002) für Salz von einer Fläche von 3 km² und für Tonstein von 10 km² ausgegangen werden. Diese Zahlenwerte sind nicht mehr zutreffend und müssen neu ermittelt werden, da nach dem Bericht zum Nationalen Entsorgungsprogramm weitere Abfallmengen aus der Urananreicherung und aus dem Endlager Asse in das Endlager für hoch radioaktive Abfälle aufgenommen werden sollen; als Höhe des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches sollte von mindestens 150 m ausgegangen werden.

Unter einer „aktiven Störungzone“ werden sowohl Verwerfungen mit deutlichem Gesteinsversatz als auch Zerrüttungszonen verstanden. Für die nähere Definition einer „aktiven Störungzone“ wird auf den AKEnd-Bericht Seite 87/88 verwiesen.)

Hinweise:

Anhang 1 zum Schreiben Minister Wenzel an die Geschäftsstelle der Endlagerkommission vom 18.09.2015

„Aktive“ Störungen in einem Endlagerbereich wären unwidersprochen ein Ausschlusskriterium. Das gilt sowohl für bruchhafte Verformungen als auch für aktiv kriechende Störungen (solche ohne "eindeutig seismische Ereignisse").

Hochauflösende 3D-Höhenmodelle der Erdoberfläche leisten bereits eine sehr weit entwickelte Unterstützung bei der Detektierung von Störungszonen (z. B. mit „LiDAR - Light detection and ranging“, einem lasergestützten radarähnlichen Messverfahren oder dem „InSAR - Interferometric Synthetic Aperture Radar“, der Radarinterferometrie für die Erfassung von Veränderungen der Erdoberfläche im mm- und cm-Bereich).

Störungszonen sind für den Fluidtransport von besonderer Bedeutung, da sie Bereiche erhöhter hydraulischer Durchlässigkeit darstellen können. Dies gilt nicht nur für „aktive“ Störungszonen, sondern auch für ältere, nicht mehr aktive Störungen. Die Forderung im AKEnd-Bericht, dass Fluidtransport nachgewiesen werden muss, wird in der Praxis aufgrund der heterogenen Verhältnisse in Störungsbe- reichen in vielen Fällen allerdings schwer zu erfüllen sein.

3)

Einflüsse aus gegenwärtiger und früherer bergbaulicher Tätigkeit

In der Standortregion darf das Gebirge nicht durch gegenwärtige und frühere bergbauliche Tätigkeit so geschädigt sein, dass daraus negative Einflüsse auf den Spannungszustand und die Permeabilität des Endlagerbergwerkes und des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches zu erwarten sind. Das Endlager muss in einem neu aufzufahrenden Bergwerk errichtet werden. Das Wirtsgestein und vor allem der einschlusswirksame Gebirgsbereich dürfen nicht durch früher abgeteufte Bohrungen geschädigt bzw. in seiner Permeabilität beeinträchtigt sein. Er muss unverritz sein.

(Erläuterung: Da im Rahmen der Auswahl der Standortregionen im ersten Schritt noch keine ge- birgsmechanischen Standsicherheitsberechnungen erfolgen, muss der Einfluss aus gegenwärtiger und früherer bergbaulicher Tätigkeit erst einmal qualitativ abgeschätzt werden.)

Hinweise:

Die erste Forderung bezieht sich bereits auf Standortregionen und setzt einen gewissen Untersuchungsgrad bzw. Kenntnisstand voraus. Ähnliche Kriterien wurden im AkEnd im Rahmen der planungs- wissenschaftlichen Kriterien betrachtet (Stichwort: Nutzungskonflikte, konkurrierende Nutzung des untertägigen Raumes). Es stellt sich die Frage, wie in einem Auswahlprozess der Einfluss bergbaulicher Tätigkeit in seinen Auswirkungen im unterirdischen dreidimensionalen Raum festgestellt und bewertet werden kann.

Die Bedingung, dass das Endlager in einem neu aufzufahrenden Bergwerk zu errichten ist, sollte „vor die Klammer“ kommen.

Die Forderung nach Unverritztheit im Wirtsgestein hatte Herr Appel in seinem Vortrag zu den geowis- senschaftlichen Kriterien in der 6. Sitzung der AG 3 als mögliches zusätzliches Ausschlusskriterium for- muliert. Hier stellt sich die Frage, ob die Forderung der Unverritztheit u. U. schwer zu erfüllen sein wird, z. B. für das Wirtsgestein Ton (in dem ein großer lateraler Flächenbedarf besteht) und wie weit die Unverritztheit über den einschlusswirksamen Gebirgsbereich hinausgehen sollte.

Die BGR hat in Ihrer Salzstudie von 1995 für das Wirtsgestein Salz eine Unverritztheit der das Salz über- deckenden Tonschichten als wichtig erachtet.

4)

Vulkanische Aktivität

Anhang 1 zum Schreiben Minister Wenzel an die Geschäftsstelle der Endlagerkommission vom 18.09.2015

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

(Erläuterung: siehe AK-End-Bericht Seite 91-93)

Keine Hinweise

5)

Grundwasseralter

Im einschlusswirksamen Gebirgsbereich dürfen keine jungen Grundwässer vorliegen liegen.

(Erläuterung: Junge Grundwässer (z.B. feststellbar anhand ihrer Tritium- und C-14-Gehalte) deuten auf eine Grundwasserbewegung innerhalb des Gebirges hin. Die beiden Parameter werden routinemäßig untersucht und bieten die Chance, relativ früh im Verfahren Informationen zum Grundwasseralter zu bekommen. Im Endlagerbereich soll jedoch die Permeabilität so gering sein, dass möglichst keine Grundwasserbewegung vorhanden ist. Das Fehlen von Tritium und C-14 ist also kein hinreichender Beleg für eine günstige geologische Gesamtsituation. Siehe AK-End-Bericht Seite 94-95)

Hinweise:

Der Satz aus K-Drs./AG3-29 „Die Grundwässer dürfen von daher kein Tritium und/oder Kohlenstoff-14 (¹⁴C) enthalten“ wurde in K-Drs./AG3-33 gestrichen, es findet sich ein Hinweis zum „Fehlen von Tritium und C-14“ in der Erläuterung.

Kriterium: KEIN Tritium: Dieses Kriterium ist zwingend erforderlich für alle Wirtsgesteine, da das Vorhandensein von Tritium auf eine Wasserkomponente mit einem Alter von weniger als ca. 50 Jahren hinweist.

Kriterium: KEIN ¹⁴C: Eine Eigenheit der ¹⁴C-Datierung ist, unabhängig vom Wirtsgestein, dass der ¹⁴C-Konzentration im Grundwasser sich nicht nur mit dem radioaktiven Zerfall verändert, sondern auch durch physikalische und chemische Prozesse im Untergrund beeinflusst wird. Dies kann im Fall von z.B. Karbonatauflösung im Grundwasserleiter zu einer Überschätzung des Grundwasseralters führen. Zu einer Unterschätzung des Alters kann es durch den Einfluss von Uran- und Thorium-haltigen Mineralen oder durch Kontamination auf Grund von Spülmittelzusätzen beim Abteufen der Bohrung, die modernen Kohlenstoff (¹⁴C) enthalten, kommen.

Aufgrund dieser möglichen Messfehler bei den chemischen Analysen und Isotopen-Bestimmungen sowie den Unsicherheiten in den ¹⁴C-Konzentrationen der einzelnen Kohlenstoffquellen wie beispielsweise Karbonate im Untergrund sind die resultierenden ¹⁴C-Alter der Grundwässer generell kritisch zu betrachten. Dabei ist zu beachten, dass je älter eine Probe bzw. je geringer dessen ¹⁴C-Gehalt ist, desto gravierender wirken sich selbst geringste Kontaminationen wie z.B. durch Bohrspülung oder eine Untergrundproduktion von CO₂ auf das ¹⁴C-Alter aus. Bei Untersuchungen zum Alter des Grundwassers der Stripa-Mine, Schweden, wurde z.B. eine ¹⁴C-Untergrundproduktion gemessen, die mehrere Prozent modernen Kohlenstoff dem Kluftwasser zuführen könnte (Andrews und Fontes 1991). Bei Untersuchungen im Kristallin in der Nordschweiz war der ¹⁴C-Gehalt von einem Großteil der Proben durch modernen Kohlenstoff auf Grund von Bohrspülungen „verjüngt“ (Pearson et al. 1991).

Es sollte daher diskutiert werden, inwieweit das Kriterium „¹⁴C-freies Grundwasser“ im Hinblick auf die möglichen Fehlerquellen über eine Mindestkonzentration definiert werden sollte (z.B. < 1% moderner Kohlenstoff). Dies würde erlauben, die Wässer, welche geringe ¹⁴C-Konzentrationen aufweisen, durch weitere geochemische und Isotopenuntersuchungen in ihrem Alter besser einzugrenzen, bevor es zu einem möglichen Ausschluss kommt.

Anhang 1 zum Schreiben Minister Wenzel an die Geschäftsstelle der Endlagerkommission vom 18.09.2015

Mindestanforderungen

1)

Gebirgsdurchlässigkeit

Im einschlusswirksamen Gebirgsbereich muss die Gebirgsdurchlässigkeit k_f weniger als 10^{-10} m/s betragen (gemessen mit Wasser mit einem hydraulischen Gradienten von $i = 30$) bzw. die Permeabilität kleiner 10^{-17} m² sein.

(Erläuterung: Grundsätzlich gilt, dass die Gebirgsdurchlässigkeit möglichst gering sein soll, damit ein advektiver Flüssigkeitstransport vermieden wird und maximal ein diffusiver Flüssigkeitstransport erfolgt. siehe AK-End-Bericht Seite 95 und 113-129)

(Anmerkung: Ein poröses Gestein hat eine Permeabilität von 10^{-12} m², wenn 1 cm³ einer Flüssigkeit mit einer Viskosität von 1 cP in einer Sekunde ein Gesteinsstück von 1 cm Länge und 1 cm² Querschnitt bei einem Druckunterschied von 10 bar zwischen Eintritts- und Austrittsstelle bei einer Temperatur von 0° und einem atmosphärischen Druck von 760 mm Quecksilbersäule durchfließt. Die Permeabilität von 10^{-19} m² entspricht ungefähr einem k_f -Wert von 10^{-12} m/s.)

Hinweise:

Generell ist zwischen der Gebirgsdurchlässigkeit und der Gesteinsdurchlässigkeit zu unterscheiden. Die Gebirgsdurchlässigkeit setzt sich aus der Durchlässigkeit der Gesteinsporen (Gesteinsdurchlässigkeit) und der Durchlässigkeit des Trennflächengefüges im Gebirge (z.B. Schichtgrenzen, Klüfte) zusammen. Während die Gesteinsdurchlässigkeit anhand von Labormethoden bestimmt werden kann, kann die Gebirgsdurchlässigkeit nur durch Feldversuche (in situ) im natürlichen Gesteinsverband vor Ort ermittelt werden. Der AkEnd schreibt (AkEnd 2002, Seite 114): „Die Gebirgsdurchlässigkeit kann nur in situ durch gezielte Untersuchungen erhoben werden.“ Dem muss ganz ausdrücklich zugestimmt werden.

Das Kriterium sagt, dass die Gebirgsdurchlässigkeit „gemessen mit Wasser mit einem hydraulischen Gradienten von $i = 30$ “ bestimmt sei. Die Vorgabe eines Gradienten ist in der Regel nur für Laborversuche (siehe DIN 18130-1) üblich und bezieht sich hier vermutlich auf die Gesteinsdurchlässigkeit und nicht auf die Gebirgsdurchlässigkeit. Um Missverständnisse zu vermeiden, sollte der Satzteil in Klammern gestrichen werden.

Zum Themenkreis Gebirgsdurchlässigkeit/Permeabilität im K-Drs./AG3-33 merkt Herr Appel auf Seite 9 an: „AkEnd hat mit m. E. guten Gründen als Parameter für die Durchlässigkeit von Gesteinskörpern die Gebirgsdurchlässigkeit (k_f -Wert), nicht die Permeabilität, verwendet. Wir sollten jedenfalls im Zusammenhang mit den Kriterien nur einen Parameter verwenden. Die Diskussion Gebirgsdurchlässigkeit <> Permeabilität sollte an anderer Stelle geführt werden.“ Wir empfehlen hier ebenfalls, nicht beide Begriffe nebeneinander zu benutzen.

2)

Mächtigkeit einschlusswirksamer Gebirgsbereich

Der einschlusswirksame Gebirgsbereich muss mindestens 100 m mächtig sein.

(Erläuterung: siehe AK-End-Bericht Seite 95)

Anhang 1 zum Schreiben Minister Wenzel an die Geschäftsstelle der Endlagerkommission vom 18.09.2015

Hinweise:

Beim Ausschlusskriterium „Aktive Störungzonen“ wird in der Erläuterung empfohlen, als Höhe des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches von mindestens 150 m auszugehen.

3)

Minimale Tiefe des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches

Die Tiefe der Oberfläche des erforderlichen einschlusswirksamen Gebirgsbereiches muss mindestens 300 m betragen.

(Erläuterung: Durch die Festlegung einer Mindestdiefe des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches soll vermieden werden, dass durch Erosion (z.B. durch Eiszeiten) der einschlusswirksame Gebirgsbereich beeinträchtigt wird. Die tatsächlich in der jeweiligen Standortregion bzw. am Standort zu erwartende Rinnentiefe muss prognostiziert werden. Bei der später vorzunehmenden Abwägung ist aus sicherheitlichen Überlegungen im Rahmen der Abwägung auf einen großen Abstand zwischen der Oberfläche des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches und der Unterfläche der Rinnen zu achten. siehe AK-End-Bericht Seite 95)

Keine Hinweise

4)

Maximale Tiefe des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches

Das Endlagerbergwerk soll nicht tiefer als etwa 1500 m im Salz und etwa 1000 m im Tonstein liegen.

(Anmerkungen:

In einem Tonstein wird auf Grund des zwingend notwendigen Ausbaus die maximale Tiefe des Endlagers 1000 m betragen, da zu erwarten ist, dass ein erheblicher Ausbau in dieser Tiefe notwendig sein wird, der einen späteren sicheren Einschluss des Endlagers nicht mehr zulässt. In einem Endlager im Salz ist es jedoch vorstellbar, dass Streckenauffahrungen beispielsweise in 1200 m Tiefe erfolgen und von den Strecken aus nochmals Bohrlöcher über mehr als 500 m Tiefe abgeteuft werden. Insofern sind beide Zahlenangaben eher als grobe Richtgröße zu betrachten. Die tatsächlich sinnvolle Tiefe eines Endlagerbergwerkes muss anhand von weiteren Randbedingungen (Temperatur in der entsprechenden Tiefe, Endlagerkonzept, notwendiger Ausbau der Schächte und Strecken, Entwurf von Verschlussbauwerken usw.) festgelegt werden.

Keine Hinweise

5)

Fläche des Endlagers

Der einschlusswirksame Gebirgsbereich muss über eine Ausdehnung in der Fläche verfügen, die eine Realisierung des Endlagers ermöglicht.

(Erläuterung: Im Rahmen der Auswahl der Standortregionen (1. Schritt des Auswahlverfahren) ist der einschlusswirksame Gebirgsbereich eines Endlagers noch nicht bekannt. Für die Größe des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches einschließlich des gesamten Endlagerbergwerkes wurden im AK-End-(Stand 2002) für Salz von einer Fläche von 3 km² und für Tonstein von 10 km² ausgegangen werden. Diese Zahlenwerte sind nicht mehr

Anhang 1 zum Schreiben Minister Wenzel an die Geschäftsstelle der Endlagerkommission vom 18.09.2015

zutreffend und müssen neu ermittelt werden, da nach dem Bericht zum Nationalen Entsorgungsprogramm weitere Abfallmengen aus der Urananreicherung und aus dem Endlager Asse in das Endlager für hoch radioaktive Abfälle aufgenommen werden sollen. (Siehe AK-End-Bericht Seite 95)

Keine Hinweise

6)

Erkenntnisse zum einschlusswirksamen Gebirgsbereich hinsichtlich des Einlagerungszeitraum

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

(Erläuterung: siehe AK-End-Bericht Seite 95)

Anmerkung Appel: Diese Mindestanforderung bedarf unbedingt der Konkretisierung

Keine Hinweise

(Anmerkung:

Im AK End ist als Mindestanforderung noch genannt: „Der einschlusswirksame Gebirgsbereich bzw. das Wirtsgestein darf nicht Gebirgsschlag gefährdet sein.“ Diese „Mindestanforderung“ wurde hier nicht aufgenommen, da die Gebirgsschlaggefährdung vor allem mit der Auslegung des Endlagers zusammen hängt. Gebirgsschläge treten immer dann auf, wenn beispielsweise Rohstoffe aus Kammern gewonnen werden und die dazwischen verbleibenden Pfeiler zu schwach dimensioniert sind. Eine zu schwache Pfeilerdimensionierung kann im Rahmen der Endlagerauslegung jedoch sicher vermieden werden.)

Keine Hinweise

Abwägungskriterien

1)

Kein oder nur langsamer Transport durch Grundwasser im Endlagerniveau

(Erläuterung: Durch diese Forderung wird gewährleistet, dass Grundwasser bzw. Salzlösungen möglichst nicht die Abfallstoffe erreichen und dass Radionuklide über dem Wasserpfad möglichst nicht aus dem Endlagerbereich ausgetragen werden. Die Abstandsgeschwindigkeit für die Grundwasserbewegung von Fluiden sollte möglichst gering, das heißt deutlich kleiner als 1 mm pro Jahr sein. Die Abstandsgeschwindigkeit ist gering bei einer geringen Gebirgsdurchlässigkeit, einer geringen effektiven Porosität und einem geringen hydraulischen Gradienten. Siehe AK-End-Bericht Seite 113-129)

Hinweise:

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.

Dazugehörige Kriterien nach AKEnd (2002):

Anhang 1 zum Schreiben Minister Wenzel an die Geschäftsstelle der Endlagerkommission vom 18.09.2015

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

Hinweise:

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 ($\ll 0,01$) 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).

Der einschlusswirksame Gebirgsbereich sollte aus Gesteinstypen bestehen, die erfahrungsgemäß geringe Gebirgsdurchlässigkeiten aufweisen.

Der effektive Diffusionskoeffizient im einschlusswirksamen Gebirgsbereich sollte möglichst gering sein (kleiner 10^{-11} m²/s).

Hinweise:

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.

Anhang 1 zum Schreiben Minister Wenzel an die Geschäftsstelle der Endlagerkommission vom 18.09.2015

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 ($^3\text{H}_2\text{O}$; mit Tritium angereichertes Wasser) bei 25 °C bezieht.

2)

Es muss eine günstige Konfiguration von Wirtsgestein und einschlusswirksamen Gebirgsbereich vorliegen

(Erläuterung: Der einschlusswirksame Gebirgsbereich soll eine möglichst große vertikale und laterale Ausdehnung besitzen, da dadurch ein großer Sicherheitsabstand zu wasserführenden Schichten vorhanden ist und damit insgesamt die Sicherheit erhöht wird. Zudem ist der hydraulische Gradient bei großen Strömungslängen kleiner als bei kleinen Strömungslängen (bei gleicher Druckhöhe. Siehe AK-End-Bericht Seite 129-144)

Hinweise:

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.

Dazugehörige Kriterien des AKEnd (2002):

Die barrierewirksamen Gesteine des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs müssen über eine Mächtigkeit verfügen, die eine Isolation der Radionuklide in der Größenordnung von einer Million Jahren bewirken.

Der Endlagerbereich bzw. der Wirtsgesteinskörper sollte von den barrierewirksamen Gesteinen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs umschlossen sein.

Der einschlusswirksame Gebirgsbereich muss über eine räumliche Ausdehnung verfügen, die größer ist als das für das Endlager rechnerisch erforderliche Volumen.

Der spezifische hydraulische Gradient im einschlusswirksamen Gebirgsbereich sollte gering sein (kleiner 10^{-2}).

Hinweise:

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,

Anhang 1 zum Schreiben Minister Wenzel an die Geschäftsstelle der Endlagerkommission vom 18.09.2015

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 Schwellendruckes 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).

3)

Gute räumliche Charakterisierbarkeit

(Erläuterung: Um das Gebirgsverhalten zuverlässig charakterisieren und bewerten zu können, soll das Wirtsgestein möglichst homogen sein, sich mit einfachen Methoden erkunden lassen, so dass die charakteristischen Eigenschaften zuverlässig abgeschätzt werden können. Siehe AK-End-Bericht Seite 144-149)

Dazugehörige Kriterien nach AKEnd (2002):

Die Gesteinstypen und ihre charakteristischen Eigenschaften sollten innerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs räumlich möglichst gleichmäßig verteilt sein.

Die geologische Einheit sollte eine möglichst geringe tektonische Überprägung aufweisen. Deren Ausmaß 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.

Günstig sind Flächen, in denen die Gesteine des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs großräumig einheitlich oder sehr ähnlich ausgebildet sind.

Keine Hinweise

4)

Gute Prognostizierbarkeit des geomechanischen, hydrogeologischen und stofflichen Verhaltens des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches

Anhang 1 zum Schreiben Minister Wenzel an die Geschäftsstelle der Endlagerkommission vom 18.09.2015

(Erläuterung: Da im Rahmen der Sicherheitsbewertung das Verhalten des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches mit hoher Zuverlässigkeit prognostiziert werden muss und Berechnungsverfahren hier bei einem Prognosezeitraum von einer Million Jahren an ihre Grenzen stoßen, wird rückblickend das Verhalten des Gesteins über einen sehr langen Zeitraum betrachtet. In diesem Zeitraum sollen sich die Eigenschaften des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches (z.B. die Gebirgsdurchlässigkeit), sowie die vertikale Mächtigkeit und die laterale Ausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches nicht wesentlich geändert haben (z.B. seit einigen Millionen Jahren. Siehe AK-End-Bericht Seite 149-150)

Dazugehörige Kriterien des AKEnd (2002):

Die Merkmale „Mächtigkeit“, „Ausdehnung“ und „Gebirgsdurchlässigkeit“ des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs sollten sich seit einigen Millionen Jahren nicht wesentlich verändert haben.

Keine Hinweise

5)

Günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen

(Erläuterung: in Abhängigkeit des Wirtsgesteins muss ein Endlager durch technische Sicherungsmittel (z.B. Spritzbeton mit Ankern) gesichert werden. Grundsätzlich gilt, dass technische Sicherungsmittel (z.B. Anker) zu Wasserwegsamkeiten im Wirtsgestein führen können. Zudem kann es in Abhängigkeit des Wirtsgesteins durch Spannungumlagerungen zu Schädigungen im Wirtsgestein kommen, die ebenfalls die Gebirgsdurchlässigkeit erhöhen. Ziel muss es sein, einen Endlagerstandort auszuwählen, bei dem durch günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen

- a) der Aufwand für technische Sicherungsmittel möglichst gering bis nicht vorhanden ist, damit potentielle Wasserwegsamkeiten möglichst nicht entstehen,
- b) eine Schädigung durch Spannungumlagerungen, Temperaturgradienten, Luftfeuchtigkeit usw. möglichst gering ist.

Die Auflockerungszone im Bereich der Grubenbaue soll möglichst klein sein.
Siehe AK-End-Bericht Seite 150-157)

Dazugehörige Kriterien des AKEnd (2002):

Die Neigung zur Ausbildung mechanisch induzierter Sekundärpermeabilitäten außerhalb einer konturnahen entfestigten Saumzone um die Endlagerhöhlräume sollte möglichst gering sein.

Keine Hinweise

6)

Geringe Neigung zur Bildung von Wasserwegsamkeiten

(Erläuterung: Das Wirtsgestein und insbesondere der ewG sollen so beschaffen sein, dass möglichst keine primär im Gebirge vorhandenen Wegsamkeiten vorhanden sind und dass solche Wegsamkeiten auch nicht durch zukünftige geogene Einwirkungen oder durch den Bau und Betrieb des Endlagers (z.B. durch Temperaturspannungen) entstehen können. Siehe auch AKEnd-Bericht Seite 158-172)

Hinweise:

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.

Dazugehörige Kriterien des AKEnd (2002):

Die repräsentative Gebirgsdurchlässigkeit sollte gleich der repräsentativen Gesteinsdurchlässigkeit sein.

Anhang 1 zum Schreiben Minister Wenzel an die Geschäftsstelle der Endlagerkommission vom 18.09.2015

Hinweis siehe Mindestanforderungen, Punkt 1.

Die Barrierewirkung 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.

Das Gestein sollte unter in situ-Bedingungen geogen eine plastisch-viskose Deformationsfähigkeit ohne Dilatanz aufweisen.

Siehe Hinweis zu Pkt. 6 oben:

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/Rissysteme im Gestein sollten bei Beanspruchungsinversion (zunehmende isotrope Beanspruchung und abnehmende deviatorische Beanspruchung) geohydraulisch wirksam verschlossen sein.

Siehe Hinweis zu Pkt. 6 oben:

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.

7)

Gute Gasverträglichkeit

(Erläuterung: Endgelagerte radioaktive Abfälle können bei Kontakt mit Wasser und Lösungen durch Korrosion und Radiolyse Gase bilden. Die Gasbildung ist abhängig vom Wasserangebot im Endlager. Die Gasbildung sollte unter Endlagerbedingungen möglichst gering sein. Ein Indikator für die zu erwartende Gasbildung ist deshalb das Wasserangebot im Endlager, was möglichst gering sein sollte. Siehe AK-End-Bericht Seite 172-177)

Dazugehörige Kriterien nach AKEnd (2002):

Die Gasbildung der Abfälle sollte unter Endlagerbedingungen möglichst gering sein.

Der Druckaufbau durch die erwartete Gasbildung der Abfälle sollte möglichst gering sein.

Keine Hinweise

8)

Gute Temperaturverträglichkeit bzw. Temperaturbelastbarkeit

(Erläuterung: Das Wirtsgestein und insbesondere der ewG sollen so beschaffen sein, dass temperaturbedingte Änderungen der Gesteinseigenschaften und Thermomechanische Spannungen nicht zu einem Festigkeitsverlust oder zu Wasserwegsamkeiten führen können. Hohe isotrope Wärmeleitfähigkeit, hohe Wärmekapazität und hohes Relaxationsvermögen sind dabei positive Wirtsgesteinseigenschaften. Siehe AKEnd-Bericht Seite 177-179)

Hinweise:

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

Hintergrund:

Anhang 1 zum Schreiben Minister Wenzel an die Geschäftsstelle der Endlagerkommission vom 18.09.2015

Aus 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 Bentonitbarriere) 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 weitere 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, Carnallititeinschlüssen 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.“

Dazugehörige Kriterien nach AKEnd (2002):

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.

9)

Hohes Rückhaltevermögen der Gesteine gegenüber Radionuklide

(Erläuterung: Die Sorptionsfähigkeit des Wirtsgesteins und insbesondere des ewGs soll möglichst groß sein, damit Radionuklide im einschlusswirksamen Gebirgsbereich sorbiert werden. Siehe AK-End-Bericht Seite 180-185)

Anhang 1 zum Schreiben Minister Wenzel an die Geschäftsstelle der Endlagerkommission vom 18.09.2015

Dazugehörige Kriterien nach AKEnd (2002):

Die Sorptionsfähigkeit der Gesteine sollte möglichst groß sein; der Kd-Wert für die Mehrzahl der langzeitrelevanten Radionuklide sollte größer oder gleich 0,001 m³/kg sein.

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

[Keine Hinweise](#)

10)

Günstige hydrochemische Verhältnisse

(Erläuterung: Günstige hydrochemische Verhältnisse werden unter anderem durch ein reduzierendes geochemisches Milieu, geringe Konzentrationen an Komplexbildnern und Kolloiden sowie neutrale bis leicht alkalische pH-Bedingungen (pH-Wert 7 bis 8) bei niedrigem CO₂-Partialdruck charakterisiert. Für günstige hydrochemische Verhältnisse existieren verschiedene Indikatoren (pH-Wert, Redoxbedingungen, Ionenstärke, Kolloidbildung und Kolloidstabilität, Komplexbildung mit Grundwasserinhaltsstoffen, Sorption und Ausfällung. Siehe AK-End-Bericht Seite 185-189)

Dazugehörige Kriterien nach AKEnd (2002):

Das tiefe Grundwasser in Wirtsgestein und 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.

[Keine Hinweise](#)

11)

Günstige Bedingungen für den Bau von Verschlussbauwerken

(Erläuterung: Das Wirtsgestein sollte günstige Bedingungen für den Bau von geotechnischen Verschlussbauwerken (Streckenverschlüsse und Schachtverschlüsse) aufweisen, da diese die maßgeblichen bautechnischen Barrieren zur Rückhaltung der Radionuklide sind. Dazu soll die sich um die Schächte und Strecken bildende Auflockerungszone nur gering sein. Als Indikator kann die Größe und Durchlässigkeit der Auflockerungszone bei Schächten am Ende des Einlagerungszeitraumes verwendet werden.)

[Keine Hinweise](#)

12)

Seismische Aktivität

Im Endlagerbereich dürfen die zu erwartenden seismischen Aktivitäten nicht größer sein als Erdbebenzone 1 nach DIN 4149.

(Erläuterung: siehe AK-End-Bericht Seite 89-91)

Anhang 1 zum Schreiben Minister Wenzel an die Geschäftsstelle der Endlagerkommission vom 18.09.2015

Hinweise:

Mit der neuen Ausgabe der DIN 4149 von 2005 „Bauten in deutschen Erdbebengebieten – Lastannahmen, Bemessung und Ausführung üblicher Hochbauten“ wurde die DIN 4149 von 1981 deutlich weiterentwickelt. Sie gilt aber immer noch für obertägige bauliche Anlagen des üblichen Hochbaus aus Stahlbeton, Stahl, Holz und Mauerwerk. Die neue Erdbebenzonenkarte, die auf der probabilistischen Einschätzung der Erdbebengefährdung beruht, unterscheidet sich grundsätzlich von der deterministischen Karte der DIN 4149 (April 1981), die auf beobachteten Maximalintensitäten basiert (die Intensitäten aus der Europäischen Makroseismischen Skala – EMS beschreiben die Auswirkungen eines Erdbebens auf Landschaft, Straßen oder Gebäude, die ohne Instrumente wahrgenommen werden können).

Die auf der Basis des Erdbebenkatalogs für bekannte Beben ab dem Jahr 800 n. Chr. festgelegten Erdbebenzonen sind Bestandteil der DIN 4149. Den Intensitäten sind Bodenbeschleunigungen zugeordnet. Diese sind in bautechnischen Nachweisen zu verwenden. Nach der Definition der Erdbebenzonen umfasst Erdbebenzone 1 Intensitäten von 6,5 - 7,0 (in einer Skala von 1-12).

Zur Auslegung kerntechnischer Anlagen führt das BfS aus: „Das Bemessungserdbeben für die Auslegung einer kerntechnischen Anlage wird während des Genehmigungsverfahrens für jeden Standort individuell ermittelt. Nach dem im kerntechnischen Regelwerk festgelegten Verfahren wird das stärkste für den jeweiligen Standort im Umkreis von 200 Kilometern zu erwartende Erdbeben bestimmt“ (<http://www.bfs.de/DE/themen/kt/sicherheit/massnahmen/erdbeben/erdbeben.html>).

Von der natürlichen Seismizität ist die anthropogen induzierte Seismizität, zum Beispiel verursacht durch Bergbautätigkeiten, grundsätzlich zu unterscheiden. Daher ist zu empfehlen, die Auswirkungen induzierter Seismizität unter den Abwägungskriterien zu diskutieren.

13)

Beschreibbarkeit des Gebirges und Prognostizierbarkeit des Gebirgsverhaltens

Das Gebirge soll so homogen aufgebaut sein, dass das Gebirgsverhalten mit hinreichender Genauigkeit für den entsprechenden Anforderungszweck modelliert werden kann.

(Erläuterung: Damit sind stark heterogene Standortregionen mit einem schwer zu interpretierenden Gebirgsverhalten ausgeschlossen. siehe AK-End-Bericht Seite 149-150)

Keine Hinweise

12)

Möglichst günstiger Aufbau des Deckgebirges

(Erläuterung: wird noch ergänzt)

Hinweise:

Hier bedarf es der Konkretisierung inwieweit ein „günstiger Aufbau“ sich auf hydrogeologische und/oder gebirgsmechanische Aspekte bezieht.

Es ist bereits diskutiert worden, ob dieses Kriterium wirtsgesteinsspezifisch betrachtet werden sollte. Dies wurde bisher unter hydrogeologischen Aspekten im Wesentlichen für das Wirtsgestein Salz betrachtet.

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

Anhang 1 zum Schreiben Minister Wenzel an die Geschäftsstelle der Endlagerkommission vom 18.09.2015

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.“

Herr Appel hatte in seinem Vortrag zu den geowissenschaftlichen Kriterien in der 6. Sitzung der AG 3 vorgeschlagen, den „günstigen Aufbau des Deckgebirges von Salzstöcken“ zu einem Abwägungskriterium zu machen. 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“.

Sollte dieses Kriterium über den gesamten Nachweiszeitraum von 1 Million Jahre gelten, würden viele Regionen (z.B. für das Wirtsgestein Salz große Bereiche Norddeutschlands) von vornherein aus dem Verfahren der Endlagersuche ausscheiden. In einer Million Jahre wird sich allein durch klimatische Veränderungen (z. B. Eiszeiten mit massiver glazialer Erosion) das Deckgebirge verändern oder sogar regional abgetragen werden. Das ist u. a. auch von der Gesteinsart abhängig (die jungen quartären und tertiären Sedimente erodieren leichter und schneller als das Festgestein).

Nach Appel & Kreuzsch (2006) ergibt sich nach der Einlagerung eine sogenannte „kritische Zeitspanne“, in der folgende Störungen/Prozessabläufe auftreten können:

- „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“

Nach Appel & Kreuzsch (2006) zeige die Abschätzung der verschiedenen ablaufenden Prozesse im Wirtsgestein Salz insgesamt „– bei aller Ungenauigkeit – eine kritische Zeitspanne, die bis zu mehreren tausend Jahren reichen kann“. Die heutigen Erkenntnisse und Überlegungen zeigten, „dass eine neue Kaltzeit mit Gletscherüberdeckung in Norddeutschland – gemessen an den tatsächlichen Verhältnissen der Vergangenheit - frühestens in 15.000 – 20.000 Jahren stattfinden kann... Die Umformung ('Beseitigung, Ausräumung') des günstigen Deckgebirges kann im norddeutschen Raum frühestens in ca. 15.000 Jahre von heute geschehen... Eine Abschätzung der Länge der Vorgänge/Prozesse, die den potenziell kritischen Zustand des Endlagers direkt nach Einlagerung verursachen, führt zu einer Zeitspanne von mehreren Tausend Jahren... Ein günstiges Deckgebirge ist also für eine begrenzte Zeit (mehrere Tausend Jahre) unbedingt notwendig.“

Das Kriterium „Günstiges Deckgebirge“ sollte daher für einen Zeitraum von 15.000 Jahren als Mindestanforderung (ggfs. wirtsgesteinsspezifisch) formuliert werden.

Weitere Referenzen aus den Hinweisen:

AkEnd (2002): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte. Empfehlungen des AkEnd – Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte. W & S Druck GmbH, S. 260

Anhang 1 zum Schreiben Minister Wenzel an die Geschäftsstelle der Endlagerkommission vom 18.09.2015

- Andrews, J.N. and Fontes, J.C. (1992): Importance of the in situ production of ^{36}Cl , ^{36}Ar and ^{14}C in hydrology and hydrogeochemistry. Proc. of Isotope Techniques in Water Resources Development. 1991. IAEA. Vienna. pp. 245-269
- Appel, D. & Kreuzsch, J. (2006): Das Mehrbarrierensystem bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Salzstock. Gruppe Ökologie e.V. im Auftrag von Greenpeace e.V. 40 S. Hannover.
- Burbank, W. & Anderson, R. S. (2012): Tectonic Geomorphology. – 454 S.; Chichester (Wiley Blackwell).
- Busch, K.-F., Luckner, L. und Tiemer, K. (1993): Geohydraulik - Lehrbuch der Hydrogeologie. 3. Überarbeitete Auflage. Gebrüder Borntraeger Verlag - 238 Abbildungen, 50 Tabellen, S. 497
- England, P. Molnar, P. (1990): Surface uplift, uplift of rocks, and exhumation of rocks. – Geology, v. 18: 1173-1177; Boulder, Colorado.
- GRS (2005): Verhalten und Barrierewirkung toniger Wirtsgesteine in einem Endlagersystem für radioaktive Abfälle. GRS – A – 3219.
- KNE (2005): Projekt Opalinuston. Zürcher Weinland der Nagra. Beurteilung der erdwissenschaftlichen Datengrundlagen und der bautechnischen Machbarkeit. Kommission Nukleare Entsorgung (KNE), Februar 2005.
- Mazurek, M., Hurford, A.J. & Leu, W. (2006): Unravelling the multi-stage burial history of the Swiss Molasse Basin: Integration of apatite fission track, vitrinite reflectance and biomarker isomerisation analysis. Basin Research 18, 27-50.
- NAGRA (2002): Projekt Opalinuston, Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse, Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle. NAGRA Technischer Bericht 02-03, Dez. 2002.
- Pearson Jr. F.J., W. Balderer, H.H. Loosli, B.E. Lehmann, A. Matter, Tj. Peters, H. Schmassmann, A. Gautschi (1991): Applied isotope hydrology - a case study in northern Switzerland. Technical Report 88-01, NAGRA.
- SKB (2011) Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark. TR-11-01. Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm, Sweden.

Anhang 3 zum Schreiben Minister Wenzel an die Geschäftsstelle der Endlagerkommission vom 18.09.2015

Begriffe Reversibilität, Rückholbarkeit, Bergbarkeit, Wiederauffindbarkeit, Monitoring 15.09.2015

Reversibilität

(= Umkehrbarkeit; engl.: Reversibility)

Definition nach NEA 2011 [2]:

“Reversibility describes the *ability in principle* to reverse or reconsider decisions taken during the progressive implementation of a disposal system; **reversal** is the concrete action of overturning a decision and moving back to a previous situation.”

Definition nach ESK 2011 [1]:

„Reversibilität (engl. reversibility): Möglichkeit der Umkehrung eines oder mehrerer Schritte in allen Phasen des Prozesses der Endlagerentwicklung: Endlagerplanung und –auslegung, Bau und Betrieb des Endlagers bis hin zur völligen Rückabwicklung.“

Vorschlag aus K-Drs. 99:

Reversibilität (Umkehrbarkeit) beschreibt die Möglichkeit, Entscheidungen, die während des Standortauswahlverfahrens und während des Baus eines Endlagers getroffen worden sind, nochmals zu revidieren und neu zu überdenken. Umkehr ist dabei die konkrete Handlung, eine Entscheidung zu revidieren und in eine frühere Phase des Standortauswahlverfahrens zurückzuspringen.

Vorschlag neu:

Reversibilität (Umkehrbarkeit): Möglichkeit der Umkehrung eines oder mehrerer Schritte in allen Phasen des Prozesses der Endlagersuche und Endlagerentwicklung, d. h. Endlagerplanung und –auslegung, Bau und Betrieb des Endlagers bis hin zur völligen Rückabwicklung. Umkehr ist dabei die konkrete Handlung, eine Entscheidung zu revidieren und in eine frühere Phase des Verfahrens zurückzuspringen.

Rückholbarkeit

(engl.: Retrievability)

Definition nach NEA 2011 [2]:

“**Retrievability** is the *ability in principle* to recover waste or entire waste packages once they have been emplaced in a repository; **retrieval** is the concrete action of removal of the waste. Retrievability implies making provisions in order to allow retrieval should it be required.”

Definition nach ESK 2011 [1]:

„**Rückholbarkeit** (engl. retrievability): Im Endlagersystem implementierte konzeptionelle und technische Maßnahmen, die es ermöglichen oder erleichtern, den eingelagerten radioaktiven Abfall zurückzuholen.“

„**Rückholung** (engl. retrieval): Die aktive Maßnahme der Rückholung von Abfallbehältern.“

Anhang 3 zum Schreiben Minister Wenzel an die Geschäftsstelle der Endlagerkommission vom 18.09.2015

Definition nach BMU 2010 [3]:

„Als **Rückholbarkeit** wird die geplante technische Möglichkeit zum Entfernen der eingelagerten radioaktiven Abfallbehälter aus dem Endlagerbergwerk bezeichnet.“

Definition nach StandAG 2013 [4]:

„**Rückholbarkeit**: die geplante technische Möglichkeit zum Entfernen der eingelagerten radioaktiven Abfallbehälter aus dem Endlager“

Vorschlag aus K-Drs. 99:

„**Rückholbarkeit** ist die Fähigkeit, hochradioaktiven Abfall aus einem Endlager wieder zurückzuholen, wenn dieser bereits in einem Endlager eingelagert ist und die Eingangsstrecken und Bohrlöcher teilweise endgültig verschlossen (verwahrt; abgedichtet) sind. Rückholung ist die konkrete Handlung, mit der die Abfallbehälter aus dem Endlager zurückgeholt werden. Rückholbarkeit setzt voraus, dass Vorkehrungen getroffen worden sind, die eine Rückholung der Abfallbehälter erleichtern bzw. gewährleisten.“

Vorschlag neu:

Rückholbarkeit: „Im Endlagersystem implementierte konzeptionelle und technische Maßnahmen, die es ermöglichen oder erleichtern, den eingelagerten radioaktiven Abfall zurückzuholen, wenn dieser bereits in einem Endlager eingelagert ist und die Einlagerungsbereiche und Zugangsstrecken teilweise oder vollständig verschlossen sind. Rückholbarkeit setzt voraus, dass Vorkehrungen getroffen worden sind, die eine Rückholung der Abfallbehälter erleichtern bzw. gewährleisten.“

Wenn die Rückholbarkeit auch noch für einen Zeitraum X nach dem Verschluss des Endlagers beschreiben werden soll (siehe ESK), ließe sich definieren:

„und das Endlager teilweise oder vollständig verschlossen ist“.

Rückholung: „Die aktive Maßnahme der Rückholung von Abfallbehältern.“

Bergbarkeit

Keine Definition in Nea 2011 [2].

Definition nach ESK 2011 [1]:

„**Bergung** (engl. recover): Die aktive Maßnahme der Bergung des Abfalls bzw. der Abfallbehälter. Hiermit ist generell die Rückholung der Abfälle zu einem fortgeschrittenen

Anhang 3 zum Schreiben Minister Wenzel an die Geschäftsstelle der Endlagerkommission vom 18.09.2015

Zeitpunkt gemeint, bei der die Integrität der Abfallbehälter nicht mehr notwendigerweise gewährleistet ist.“

Definition nach BMU 2010 [3]:

„Bergung radioaktiver Abfälle: Als **Bergung** wird die Rückholung radioaktiver Abfälle aus dem Endlager als Notfallmaßnahme bezeichnet.“

Definition nach StandAG 2013 [4]:

„**Bergung**: die ungeplante Rückholung von radioaktiven Abfällen aus einem Endlager als Notfallmaßnahme“

Vorschlag aus K-Drs. 99:

*Unter **Bergbarkeit** wird eine Rückholung von Behältern mit hochradioaktiven Abfall verstanden, wenn das Endlagerbergwerk vollständig verschlossen (verwahrt, abgedichtet) ist. Für die Bergung des hochradioaktiven Abfalls sind keine speziellen Vorkehrungen getroffen worden bzw. sind keine speziellen Vorkehrungen bekannt.“*

Vorschlag neu:

„**Bergbarkeit**: Die Bergung (Rückholung) des Abfalls bzw. der Abfallbehälter zu einem Zeitpunkt nach dem vollständigen Verschluss des Endlagers. Für die Bergung des hochradioaktiven Abfalls sind spezielle Vorkehrungen für einen Zeitraum X getroffen worden bzw. sind spezielle Vorkehrungen für einen Zeitraum X bekannt. Nach dem Zeitraum X ist die Integrität der Abfallbehälter nicht mehr notwendigerweise gewährleistet und die getroffenen Vorkehrungen u. U. nicht mehr wirksam.“

Wiederauffindbarkeit

Vorschlag:

„**Wiederauffindbarkeit**: Die Möglichkeit, die Abfälle in einer ferneren Zukunft wieder aufzufinden. Hierfür sind über Maßnahmen an der Erdoberfläche (Markierungen, Dokumentationen) spezielle Vorkehrungen getroffen worden.“

Für einen Zeitraum X nach Verschluss sind auch Maßnahmen untertage denkbar, die die Wiederauffindbarkeit erleichtern, das fällt dann eher in das Monitoring-Thema.

Anhang 3 zum Schreiben Minister Wenzel an die Geschäftsstelle der Endlagerkommission vom 18.09.2015

Monitoring

Vorschlag:

„**Monitoring während** der Betriebsphase des Endlagers: direkte messtechnische Überwachung des gesamten Endlagers und seiner Komponenten, Dokumentation, Umgebungsüberwachung“

„**Monitoring nach** der Betriebsphase des Endlagers: indirekte messtechnische Überwachung von Teilsystemen des Endlagers für einen Zeitraum X, Dokumentation, Umgebungsüberwachung“

Quellen:

[1] *Rückholung / Rückholbarkeit hochradioaktiver Abfälle aus einem Endlager – ein Diskussionspapier* Ausschuss Endlagerung radioaktiver Abfälle der Entsorgungskommission, 2011

<http://www.entsorgungskommission.de/plaintext/downloads/epanlage2el19homepage.pdf>

[2] *Reversibility and Retrievability (R&R) for the Deep Disposal of High-Level Radioactive Waste and Spent Fuel*, Nuclear Energy Agency (NEA), Final Report, Paris, 2011

<http://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=NEA/RWM/R%28201>

[3] *Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle* BMU 2010

[4] *Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle und zur Änderung anderer Gesetze (Standortauswahlgesetz – StandAG)* 2013

Fehlerkorrektur / Reversibilität

Phase vor der Einlagerung

Betriebsphase Endlager

Nachbetriebsphase Endlager 

Rückholbarkeit der Abfälle

Bergbarkeit der Abfälle
(Behälter intakt) x-Jahre

Bergbarkeit der Abfälle
(Behälter u. U. nicht mehr intakt)
x-Jahre

Überbrückungslagerung

Alle Abfälle in einem oder mehreren Zwischenlagern

abnehmende Abfallmenge
im Zwischenlager

Zwischenlager
leer

Rückbau

Monitoring

Dokumentation 

Markierungen? 

Wiederauffindbarkeit 

Überwachung/ Monitoring Zwischenlager

Monitoring Endlager
und Zwischenlager

Monitoring
Endlager

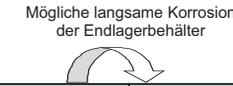
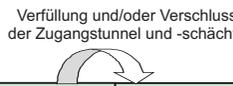
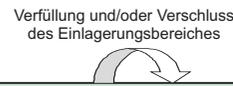
Monitoring im
verschlossenen Endlager

kein Monitoring
Umgebungsüberwachung x Jahre

Entwicklung Endlager

Standortsuche

Standortentscheidung



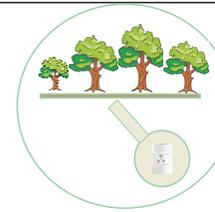
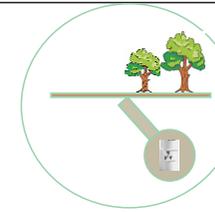
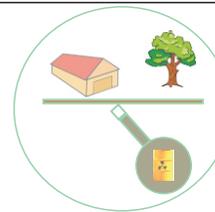
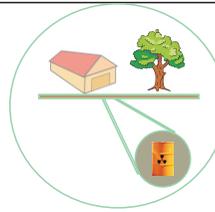
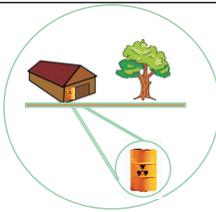
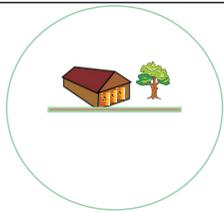
Schritt 1 (nach NEA 2011)
Verpackter Abfall in einem oder mehreren Zwischenlagern

Schritt 2 und 3
Abfalleinlagerung in Einlagerungszellen und (sukzessive) Verfüllung der Einlagerungsbereiche

Schritt 4
Abfall im verfüllten Endlager

Schritt 5
Abfall im verschlossenen Endlager

Schritt 6
langfristige Entwicklung des Endlagers



Gewährleistung der Endlagersicherheit

Active Überwachung erforderlich

- nimmt ab

Passive Sicherheit nimmt zu

Rückholbarkeit / Bergbarkeit

Rückholung

zunehmend schwerer

Aufwendungen / Kosten für die Rückholung / Bergung steigen