

Geschäftsstelle

Kommission
Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe
gemäß § 3 Standortauswahlgesetz

Arbeitsgruppe 3
Entscheidungskriterien sowie Kriterien
für Fehlerkorrekturen

Beratungsunterlage zu TOP 7 der 14. Sitzung am 24. November 2015

Einschlusswirksamer Gebirgsbereich und einschlussbezogene Kriterien
bei Kristallingestein

von Dr. Detlef Appel, 20. 11.2015

<p>Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe K-Drs. /AG3-53</p>

Einschlusswirksamer Gebirgsbereich und einschlussbezogene Kriterien bei Kristallingestein

Detlef Appel, 20.11.2015

(unter Verwendung eines Entwurfs von Prof. Kudla sowie eines im Forschungsvorhaben CHRISTA erarbeiteten Papiers "Möglichkeiten der Ausweisung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereiches für ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle im Kristallingestein", Version vom 16.09.2015)

Gemäß Standortauswahlgesetz (StandAG 2013) soll die "Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe" Vorschläge für wirtsgesteinstypunabhängige Kriterien sowie spezifische Kriterien für die Wirtsgesteinstypen Salz, Ton und Kristallin vorschlagen.

Eine wesentliche Grundlagen für den Kriterienvorschlag sollen die "Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle - Stand 30. September 2010" (BMU 2010) bilden; diese müssen durch den letztlich ausgewählten Standort erfüllt werden. Weitere Grundlage sind die Empfehlungen des Arbeitskreises Auswahlverfahren Endlagerstandorte für Kriterien für ein Auswahlverfahren für Endlagerstandorte (AKEND 2002). Beiden liegt das ewG-Konzept zugrunde, wonach die geologischen Barrieren den Hauptbeitrag zur Langzeitsicherheit des Endlagers leisten sollen, und zwar insbesondere durch den Einschluss der radioaktiven Abfälle im einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG). Das ist derjenige Gebirgsbereich eines Endlagersystems, der "im Zusammenwirken mit den technischen Verschlüssen (Schachtverschlüsse, Kammerabschlussbauwerke, Dammbauwerke, Versatz, ...) den Einschluss der Abfälle sicherstellt" (BMU 2010). Ein wichtiger Beitrag der technischen Verschlüsse zum Einschluss der Abfälle besteht in der "Reparatur" von mit Errichtung und Betrieb des Endlagers verbundenen Eingriffen in den ewG.

Danach, ob das Wirtsgestein Teil des ewG ist, bzw. - wenn das nicht der Fall ist - wie ewG und Wirtsgestein im Gebirge angeordnet sind und welche Rolle im Hinblick auf den Einschluss für beide daraus resultiert, hat AKEND (2002) drei grundsätzliche Konfigurationstypen abgeleitet:

- Typ A: Das Wirtsgestein ist hinsichtlich seiner Barrierenwirksamkeit sicherheitsrelevanter Bestandteil des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs. Wirtsgestein und

ewG sind Teile ein und desselben Gesteinskörpers (bzw. mehrerer Gesteinskörper mit übereinstimmenden barrierewirksamen Eigenschaften).

- Typ B: Das Wirtsgestein ist hinsichtlich seiner Barrierenwirksamkeit kein sicherheitsrelevanter Bestandteil des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches, wobei zu unterscheiden sind
 - Typ Ba: Der Wirtsgesteinskörper wird vom einschlusswirksamen Gebirgsbereich vollständig umschlossen.
 - Typ Bb: Die Umschließung des Wirtsgesteinskörpers durch den einschlusswirksamen Gebirgsbereich ist unvollständig.

Von den genannten Konfigurationstypen ist für die Fragestellung nur Typ A von Bedeutung. Typ Ba kommt mit kristallinen Gesteinen als Wirtsgestein auf Grund ihrer charakteristischen Entstehungsbedingungen nicht vor. Typ Bb ist in der Realität mit Kristallinvorkommen als Wirtsgestein, die durch potenziell einschlusswirksame Sedimentgesteine als ewG überlagert werden, zwar vertreten, die Qualität des Einschlusses hängt in diesem Fall konfigurationstypgemäß aber von den Eigenschaften der überlagernden Gesteine (ewG) ab und zum anderen davon, welche konfigurationsunabhängigen Verhältnisse zusätzlich zum Einschluss beitragen können. Einen Spezialfall des Typs Bb mit Kristallin als Wirtsgestein und überlagerndem Salz als ewG haben jüngst SCHREIBER et al. (2015) dargestellt.

AkEnd-Kriterien zur Beurteilung des Einschlussvermögens mittels Gebirgsdurchlässigkeit

Die AkEnd-Kriterien in AKEND (2002) sind überwiegend wirtsgesteinsunabhängig, teilweise wirtsgesteinsdifferenziert formuliert worden. Explizit (auch) auf Granit beziehen sich nur wenige Kriterien, insbesondere die Mindestanforderung zur flächenmäßigen Ausdehnung des ewG für die Realisierung des Endlagers (10 km²) und das auf das ewG-Volumen bezogene Abwägungskriterium. Bei wichtigen direkt einschlussrelevanten Kriterien, insbesondere der Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers und der Geschwindigkeit des dadurch verursachten Stofftransports, wird nicht zwischen den Gesteinstypen differenziert. Dasselbe gilt für die Beurteilung des Stofftransports durch Diffusion. Vielmehr stand bei der Kriterienformulierung das übergeordnete Ziel des Einschlusses im Vordergrund, so dass mit Einhaltung der An-

forderungen wesentliche Voraussetzungen für den Einschluss der radioaktiven Abfälle im ewG gewährleistet sind, und zwar unabhängig vom betrachteten Wirtsgesteinstyp.

Die Bestimmung der Abstandsgeschwindigkeit ist in frühen Phasen des Auswahlverfahrens mangels belastbarer Eingangsdaten nicht möglich. Die Beurteilung des Einschlussvermögens wird in dieser Zeit mittels des Indikators "Gebirgsdurchlässigkeit" beurteilt. Die Gebirgsdurchlässigkeit ist nicht nur eine wichtige Eingangsgröße zur Bestimmung der Abstandsgeschwindigkeit, sondern auch ein Indikator für das Grundwasserangebot im ewG, für die Art des maßgeblichen Transportmechanismus und für die mögliche Geschwindigkeit der Grundwasserbewegung.

Für die Gebirgsdurchlässigkeit wird in AKEND (2002) als Mindestanforderung festgelegt, dass der einschlusswirksame Gebirgsbereich aus Gesteinstypen bestehen muss, denen eine Gebirgsdurchlässigkeit kleiner als 10^{-10} m/s zugeordnet werden kann. Mit Blick auf das Grundwasserangebot im ewG ist die Gebirgsdurchlässigkeit eines ins Auge gefassten Wirtsgesteinskörpers wie folgt zu beurteilen: günstig $<10^{-12}$ m/s, bedingt günstig 10^{-12} - 10^{-10} m/s.

Gebirgsdurchlässigkeit kristalliner Gesteine

Im Hinblick auf die charakteristischen Werte für die Gebirgsdurchlässigkeit (k_f -Wert in m/s) bestehen zwischen den Wirtsgesteinstypen Steinsalz, Tonstein und kristallinen Gesteinen (Granit) deutliche Unterschiede. Dies gilt auch für deren Ursachen. Generell muss bei kristallinen Gesteinen mit deutlich höheren Gebirgsdurchlässigkeiten gerechnet werden als bei Tonstein und Steinsalz, während die Gesteins- oder Matrixdurchlässigkeiten durchaus ähnliche Werte aufweisen können:

- Durchlässigkeitsbestimmend ist bei kristallinen Gesteinen generell das Vorhandensein von (potenziell) wassergängigen Trennfugen oder ausgedehnteren Zonen mit Wasserführung (und verringerter mechanischer Festigkeit). Kristallinvorkommen mit durchgängig geringer Gebirgsdurchlässigkeit sind daher selten. Hinzu kommen an Einschaltungen anderer Gesteinstypen und Verwitterungszonen gebundene Bereiche mit erhöhter Durchlässigkeit, wie dies auch bei anderen Wirtsgesteinstypen der Fall sein kann.

- Die Trennfugen und größere wassergängige Strukturen gehen auf im Detail nach Art und Intensität unterschiedliche mechanische Beanspruchung, im Wesentlichen durch tektonische Vorgänge, zurück. Nach den Dimensionen solcher Strukturen sowie Intensität bzw. Auswirkungen der verursachenden Vorgänge lassen sich (potenziell) wassergängige Strukturen nach ihrem regionalen oder lokalen Charakter, ihrer Entstehung und Bedeutung für die Gebirgsdurchlässigkeit unterscheiden.
- Entsprechend den Ausprägungen der verursachenden tektonischen Prozesse können diese Gruppen potenziell wasserleitender Trennfugen jeweils unterschiedlich regelmäßige und unterschiedlich ausgedehnte Trennfugensysteme oder -netze bilden. Auf Grund des im Vergleich zu den beiden anderen Wirtsgesteinsgruppen spröden Bruchverhaltens kristalliner Gesteine können einmal entstandene Trennfugen in größerem Ausmaß als bei den anderen Wirtsgesteinstypen über geologische Zeiträume erhalten bleiben.

Wegen des Trennfuginventars ist nicht auszuschließen, dass als ewG eines Endlagers geeignete ausreichend große Gebirgsbereiche, in denen die vom AkEnd formulierten Anforderungen zur Gebirgsdurchlässigkeit eingehalten werden, innerhalb eines Suchgebietes nicht oder nur zufällig gefunden werden können. Eine solche Befürchtung hat in der Schweiz zur Aufgabe der ursprünglichen Endlagerpläne mit Granit als Wirtsgestein zugunsten von Tonstein geführt. Angesichts des Platzbedarfs für ein Endlager in Kristallingestein ist die Mindestanforderung "Gebirgsdurchlässigkeit" und damit eine Voraussetzung für die Ausweisung eines ewG in Kristallingestein in Deutschland möglicherweise sogar nicht erfüllbar. Allerdings ist festzuhalten, dass hinreichende Informationen zu den einschlussrelevanten Eigenschaften deutscher Kristallinvorkommen nach derzeitiger Kenntnis noch nicht erhoben worden sind.

Hinweise auf "ewG-Äquivalent" aus Schweden und Finnland

Vor diesem Hintergrund ist zu prüfen, ob der ewG entsprechend den Anforderungen nach AkEnd als Kernelement des Einschlusses der radioaktiven Abfälle in tiefen geologischen Formationen für kristalline Gesteine anders gefasst oder sogar aufgegeben werden muss oder ob dafür ein "ewG-Äquivalent" identifiziert werden kann. Dann könnte der ewG-Ansatz entsprechend Konfigurationstyp A bei AkEnd (s.o.: Wirtsgestein ist Teil des ewG) für Kristallingesteine aufrecht erhalten bleiben. Hinweise dazu

können möglicherweise aus dem sehr ähnlichen Vorgehen bei der Entwicklung der Endlager für abgebrannte Brennelemente in Schweden und Finnland abgeleitet werden, das im Hinblick auf das generelle Vorgehen bei der Standortauswahl und den Umgang mit einschlussrelevanten Fragen, insbesondere zur Durchlässigkeit kurz beschrieben werden soll:

- Granit bzw. granitartige Gesteine wurden in Schweden und Finnland auf Grund ihrer Zusammensetzung, ihres Gefüges, ihrer geomechanischen und hydraulischen Eigenschaften und ihres Wärmeleitvermögens für die Endlagerung hoch radioaktiver Abfälle gegenüber anderen plutonischen und metamorphen Gesteinen bevorzugt (auch auf Grundlage der Betrachtung anderer Gesteinstypen).
- Innerhalb dieses Gesteinstyps wurden große Gesteinsvorkommen bevorzugt, die in den genannten Eigenschaften dem gut bekannten und beurteilbaren "durchschnittlichen" schwedischen bzw. finnischen Granit nahe kommen, um Komplikationen durch lokale Ausbildungsbesonderheiten zu reduzieren, Konflikte auf Grund des möglichen Lagerstättenpotenzials besonderer Granitvorkommen zu vermeiden und die Gefahr für das unbeabsichtigte Eindringen in das Lager zu reduzieren (das Vorkommen großer Mineralvorkommen bzw. Lagerstätten kann zur Aufgabe eines solchen Standortes führen). Da diese Bedingungen in beiden Ländern von zahlreichen Kristallinvorkommen erfüllt werden, spielte die Bereitschaft der Kommunen, Untersuchungen und letztlich das Endlager zu akzeptieren, eine wichtige Rolle bei der Auswahl der heutigen Standorte.
- Ein wie hier kurz beschriebenes Granitvorkommen bildet den langzeitstabilen Rahmen für die sichere Lagerung kupferummantelter Brennelementbehälter in vertikalen Bohrlöchern (bzw. in hier nicht behandelten horizontalen Lagerstrecken) außerhalb größerer Störungszonen und in Wirtsgesteinsbereichen mit möglichst geringer Anzahl bzw. Dichte wasserführender Trennfugen. Das Lagerkonzept ist im Grundsatz bereits in den 1980er Jahren entwickelt worden.
- Den Behältern und ihrer langzeitigen Funktion kommt darin sehr hohe sicherheitliche Bedeutung zu. Die Behälter sind allseits von Buffermaterial aus Bentonit umgeben, die Einlagerungs- und Zugangsstrecken werden mit einem Gemisch aus Bentonit und Gebirgsausbruch verfüllt.
- Dem hydrochemischen Angriff auf die Behälter wird durch Vorgaben zum Grundwasserchemismus (insbesondere reduzierende Bedingungen) begegnet. Die Ben-

tonit-Buffer sollen einerseits durch Quellen den Wasserzutritt aus wasserführenden Trennfugen in die Lagerlöcher verhindern und andererseits - im Falle einer Freisetzung aus dem Behälter - die Radionuklidausbreitung ins und im Wirtsgestein verhindern bzw. verzögern. Zur Vermeidung von Kolloidbildung und Kolloidtransport soll die Summe der Konzentrationen von Ca- und Mg-Ionen im Grundwasser größer als 4 mg/l sein, zur Vermeidung der Reduzierung des Quellvermögens des Bentonit muss die Gesamtmineralisation des Grundwassers <100 g/l sein.

- In der Summe sind bei der Standortwahl nur wenige Anforderungen mit direktem Bezug zum Einschlussvermögen des Wirtsgesteins zur Anwendung gekommen. Insbesondere haben allgemeingültige Ausschlussverhalte bzw. -kriterien keine wichtige Rolle gespielt. Ausgenommen hiervon waren und sind Zonen mit erhöhter Wasserdurchlässigkeit und entsprechender Wasserführung, zu denen Sicherheitsabstände einzuhalten waren und sind. Für die Einrichtung von Zugangs- und Einlagerungsstrecken zu den verschiedenen Lagerteilen und zur Positionierung der einzelnen Lagerlöcher und die Bewertung der bei ihrer Vorbereitung angetroffenen Verhältnisse kommt in Finnland eine sogenannte Gesteinseignungsklassifikation (Rock Suitability Classification) zur Anwendung, die sich derzeit noch in der Entwicklung bzw. Anpassung an die aktuellen Aufgaben befindet. Eine bereits bestehende Vorgabe sagt z.B., dass beim Lagerbau zu passierende Bruchzonen bestimmte Durchlässigkeits- bzw. Transmissivitätswerte nicht überschreiten sollen.¹
- Im Hinblick auf das Einschlussvermögen sind Granit und verwandte Gesteinstypen dadurch gekennzeichnet, dass bei ihnen ein großer Kontrast besteht zwischen der Gebirgsdurchlässigkeit und der Gesteinsdurchlässigkeit, die die Durchlässigkeit der Gesteinsmatrix widerspiegelt. Diese Gesteinsdurchlässigkeit liegt bei in Schweden und Finnland untersuchten Kristallinvorkommen im Größenbereich von etwa 10^{-11} bis 10^{-15} m/s und damit um mehrere Größenordnungen unter den Werten für die Gebirgsdurchlässigkeit. Das entspricht Werten, die bei Salz und Tonstein sowohl für die Gesteins- und Gebirgsdurchlässigkeit festgestellt

¹ Die in der Rock Suitability Classification erwarteten Vorgaben und Hinweise sollen daraufhin geprüft werden, ob daraus in Kriterien umsetzbare Anforderungen an kristalline Gesteine und Hinweise zur Ableitung eines ewg-Äquivalents abgeleitet werden können

werden. Ein ausreichend großer Gebirgsbereich mit diesen Durchlässigkeitswerten käme also als "ewG-Äquivalent" in Frage. Ein Ausschlusskriterium bzw. eine Mindestanforderung wurde zur Gebirgsdurchlässigkeit im Lagerbereich nicht formuliert. Als Vorteil wird angesehen, wenn ein Großteil des Gebirges im Lagerbereich über eine Durchlässigkeit von $<10^{-8}$ m/s verfügt, ein Wert der von den Vorstellungen von einem ewG entfernt ist.

Resume

Aus den geschilderten Zusammenhängen ergeben sich keine Hinweise auf ein "ewG-Äquivalent", das die Defizite im Einschlussvermögen kristalliner Gesteine, insbesondere von Granit, ausgleichen könnte. Ansätze zum ewG-konformen Umgang mit den Verhältnissen wären daran zu erkennen, dass insgesamt ausreichend große Gebirgsblöcke mit "Homogenbereichen" geringer Durchlässigkeit zwischen zu meidenden größeren Kluft- bzw. Störungszonen identifiziert werden könnten, in denen unter Beachtung erforderlicher Sicherheitsabstände zu wasserführenden Elementen alle Lagerlöcher für die Endlagerbehälter platziert werden könnten. Im Extremfall könnte theoretisch jeder Behälter mit Bentonitdichtung, das Lagerloch allseits umgebendem gering durchlässigem Homogenbereich des Wirtsgesteins und zugehörigem Versatzmaterial in der zugehörigen Einlagerungsstrecke ein eigenständiges Ensemble mit einschlusswirksamem Gebirgsbereich darstellen.

Die Tatsache, dass Trennfugen verschiedener Dimensionen und mit und ohne Wasserführung bei den Endlagerprojekten in Schweden und Finnland regelmäßig in Bohrlöchern angetroffen werden, zeigt einerseits die Notwendigkeit einer Rock Suitability Classification zum Umgang mit wasserführenden Trennfugen. Sie macht andererseits deutlich, dass die Antwort auf die Frage nach einem ewG in kristallinen Gesteinen oder wenigstens nach einem ewG-Äquivalent maßgeblich durch die Häufigkeit bzw. Dichte und die Öffnungsweite von Trennfugen unterschiedlicher Entstehung und Ausprägung bestimmt wird.

Dies gilt auch für Kristallinvorkommen in Deutschland, die im Rahmen von BGR (1994) betrachtet worden sind und für die diesbezüglich qualitative und halbquantitative Unterschiede zwischen den Vorkommen festgestellt wurden.²

2 BGR (1994): Endlagerung stark wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands - Untersuchung und Bewertung von Regionen in nichtsalinaren Formationen.- November 1994, Archiv-Nr. 112642 (Hannover).