


| Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung | | | | | | | | |  BUNDESGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG |
|--|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|--|
| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev | |
| NAAN | NNNNNNNNNN | NNAAANN | AANNNA | AANN | AAAA | AA | NNNN | NN | Blatt: 655 |
| SG | 0330 | | | | EA | TF | 0002 | 00 | |

Anhang 2 Herausforderungen bei der Entwicklung von Endlagerkonzepten in kristallinem Wirtsgestein

Anhang 2.1 Einleitung

In § 7 Abs. 6 Nr. 2 EndlSiUntV wird ausgeführt, dass im Rahmen der rvSU davon ausgegangen werden kann, „dass technische und geotechnische Barrieren ihre Funktion grundsätzlich in dem jeweils vorgesehenen Zeitraum erfüllen, sofern dies nach dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik nicht ausgeschlossen erscheint“. Dies hat Auswirkungen auf die Auslegung eines Endlagersystems im kristallinen Wirtsgestein, insbesondere, wenn entsprechend § 23 Abs. 4 StandAG ein wesentlich auf technischen oder geotechnischen Barrieren beruhendes Endlagersystem zu Grunde gelegt wird. Nach Stand von Wissenschaft und Technik ist für ein Endlagersystem, welches nicht auf einem Konzept mit einschlusswirksamem Gebirgsbereich basiert, ein Nachweis des sicheren Einschusses der Radionuklide für eine Million Jahre nicht abschließend darstellbar. Dieses Konzept ist jedoch in der Wechselwirkung zwischen einer günstigen Geologie und den darauf abgestimmten technischen und geotechnischen Maßnahmen grundsätzlich möglich. Das StandAG, die EndlSiAnfV und EndlSiUntV geben einen klaren Weg vor, auf dem eine entsprechende Bearbeitung erfolgen soll. Wie allgemein für die rvSU gültig, erlaubt die EndlSiUntV eine generische Betrachtung der Herangehensweise und Bearbeitung der vorläufigen Auslegung des Endlagers, was in den nachfolgenden Kapiteln für das kristalline Wirtsgestein dargestellt werden soll.

Das Endlagersystem hat die Aufgabe, die hochradioaktiven Abfälle zu konzentrieren und sicher einzuschließen und damit von der Biosphäre fernzuhalten (§ 26 Abs. 2 StandAG). Das Sicherheitskonzept eines Endlagersystems gibt die wesentliche Strategie wieder, wie dieses Ziel des Einschusses und der Konzentration erreicht werden soll. In dem Sicherheitskonzept werden die Barrieren des Endlagersystems, ihre Sicherheitsfunktionen und das gegenseitige Zusammenwirken der Barrieren beschrieben. Der sichere Einschuss muss innerhalb der wesentlichen Barrieren so erfolgen, dass die Radionuklide aus den radioaktiven Abfällen weitestgehend am Ort ihrer ursprünglichen Einlagerung verbleiben (§ 4 Abs. 4 EndlSiAnfV). Die folgenden beiden Sicherheitskonzepte sind denkbar und in der EndlSiAnfV vorgesehen:

- A) Ein Sicherheitskonzept, bei dem der sichere Einschuss der radioaktiven Abfälle durch ein oder mehrere einschlusswirksamen Gebirgsbereiche, die die wesentliche Barriere bilden, gewährleistet wird (Endlagersystem Typ 1).
- B) Ein Sicherheitskonzept für das Wirtsgestein Kristallingestein, sofern in diesem kein einschlusswirksamer Gebirgsbereich ausgewiesen werden kann, bei dem der sicherere Einschuss der radioaktiven Abfälle durch für die jeweilige geologische Umgebung geeignete technische und geotechnische Barrieren (wesentliche Barriere) gewährleistet wird (Endlagersystem Typ 2).

Eine detailliertere Beschreibung der beiden Sicherheitskonzepte befindet sich in Kapitel 4.1.3.2. Beide Sicherheitskonzepte sind für das kristalline Wirtsgestein grundsätzlich denkbar, was Auswirkungen auf die vorläufige Auslegung des Endlagers gemäß § 6 Abs. 4 EndlSiUntV hat. Dort sind die „wesentlichen Barrieren [...], deren grundlegende Eigenschaften und deren räumliche Erstreckung

**Methodenbeschreibung zur Durchführung
der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen
gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung**




| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN | NNNNNNNNNN | NNAAANN | AANNNA | AANN | AAAA | AA | NNNN | NN |
| SG | 0330 | | | | EA | TF | 0002 | 00 |

Blatt: 656

sowie die [...] weiteren Barrieren des Endlagersystems“ zu beschreiben (§ 6 Abs. 4 Nr. 1 Endl-SiUntV). Dies führt zu Herausforderungen bei der vorläufigen Auslegung des Endlagers, die nachfolgend kurz gezeigt und in den darauffolgenden Kapiteln weiter erläutert werden. Weiterhin werden erste Annahmen für die vorläufige Auslegung des Endlagers formuliert.

Für das Endlagersystem Typ 1 besteht die Herausforderung in der Ausweisung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs als wesentlich Barriere. An diesen sind hohe Anforderungen im Hinblick auf den Einschluss der Radionuklide gestellt, insbesondere der Grenzwert der Gebirgsdurchlässigkeit (§ 23 Abs. 5 Nr. 1 StandAG), der mit Blick auf kristallines Wirtsgestein stark von dem Kluftsystem und dessen Eigenschaften am Standort abhängig sein wird. Inwiefern dieses Konzept in Deutschland umgesetzt werden kann, ist auf Basis der derzeit vorliegenden und zukünftigen Datenlage, insbesondere Erkundungsergebnisse, zu überprüfen. Weiterhin gibt es, im Vergleich zu den Wirtsgesteinen Steinsalz und Tongestein, wenige Forschungsarbeiten und -ergebnisse auf nationaler und internationaler Ebene im kristallinen Wirtsgestein bzgl. des Endlagersystems Typ 1 auf denen die Arbeiten der BGE aufbauen können.

Für das Endlagersystem Typ 2, bei dem der sichere Einschluss durch die technischen und geotechnischen Barrieren gewährleistet werden muss, werden entsprechend hohe Anforderungen an diese Barrieren gestellt, die geologischen Barrieren haben dagegen eine untergeordnete Rolle. In Schweden, Finnland und Kanada wird dieses Konzept (Typ 2) verfolgt und befindet sich dort teilweise bereits in der Umsetzung. Daher ist davon auszugehen, dass dieses Konzept grundsätzlich nach dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik umsetzbar ist. Es ist aber zu beachten, dass in diesen Ländern das endzulagernde Inventar und die regulatorischen Anforderungen von Deutschland abweichen.

| Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung | | | | | | | | |  BUNDESGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG |
|---|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|--|
| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev | |
| NAAN | NNNNNNNNNN | NNAAANN | AANNNA | AANN | AAAA | AA | NNNN | NN | Blatt: 657 |
| SG | 0330 | | | | EA | TF | 0002 | 00 | |

Anhang 2.2 Kristalline Gesteinsformationen als Wirtsgestein für die Endlagerung


Anhang 2.2.1 Datenlage zu kristallinen Wirtsgesteinsformationen

Kristalline Wirtsgesteine umfassen Plutonite (Le Maitre et al. 2002), also z. B. Granite und Granodiorite, und hochgradig regionalmetamorphe Gesteine der Fazies Amphibolit, Eklogit und Granulit (Eskola 1915), wie z. B. Gneise und Granulite (BGE 2020j). Kompakte, ungestörte kristalline Gesteinseinheiten besitzen günstige Eigenschaften als Wirtsgestein für geologische Tiefenlagerung und erfüllen die Anforderung an die Barrierewirksamkeit eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (Mindestanforderungen nach § 23 Abs. 5 StandAG). Kristalline Wirtsgesteine können jedoch im Felsverband Klüfte enthalten, die sich z. B. durch geologische Prozesse (z. B. Störungszonen, Entlastung und tektonische Hebung oder Abkühlungsprozesse) gebildet haben. Das Trennflächengefüge in kristallinen Wirtsgesteinen kann die Gebirgsdurchlässigkeit erhöhen und die Barrierewirkung herabsetzen.

Oberflächennahe Vorkommen von kristallinen Gesteinen sind in Deutschland weitgehend kartiert und ausgewiesen. In geologische Karten sind neben Aufschlussdaten von Gesteinen auch interpretierte Erkundungsdaten aus Bohrungen, Geophysik und Fernerkundung eingeflossen. Die Datendichte von Erkundungsergebnissen, v. a. Tiefbohrungsdaten und geophysikalische Daten, zu kristallinen Wirtsgesteinsformationen in größeren Tiefen ist stark vom Erkundungszweck abhängig und geologische Daten sind regional in Deutschland sehr uneinheitlich verteilt.

Erkundungsbohrungen aus der Erdöl-Erdgas-Erkundung und Projekten zur Tiefengeothermie in sedimentären Becken, Störungszonen und Grabensystemen tangieren kristalline Gesteinsformationen oft nur zufällig, da diese meist nicht die Zielhorizonte der Erkundung waren. Schichtenverzeichnisse und geophysikalische Bohrdaten aus solchen Tiefenbohrungen besitzen deshalb nur informativen Wert für die Bestätigung des Vorkommens von kristallinen Wirtsgesteinen. Ein Beispiel dafür sind die beschriebenen Kernproben aus Erdöl-Erdgas-Erkundungsbohrungen in Süddeutschland, die oft nur wenige Meter an kristallinen Wirtsgesteinen in der Endteufe erbohrt haben (Drong 2003). Zudem sind Gebiete wie z. B. der Oberrheingraben, die hervorragend exploriert und für die Tiefengeothermie besonders interessant sind, aufgrund der großen geothermischen Anomalie und der starken tektonischen Überprägung für eine geologische Tiefenlagerung von radioaktiven Abfällen grundsätzlich nicht geeignet (siehe Anhang 6 in BGE 2020k).

Eine hervorragende Datenquelle für kristalline Wirtsgesteine stellen wiederum Explorationsergebnisse aus der Buntmetall- und Uranerkundung dar. Vor allem Tiefbohrungen aus der Uranerkundungsphase in den 1950er bis 1980er Jahren produzierten lange Kernstrecken und geophysikalische Logs von Uran-spezialisierten Graniten und ihren Nebengesteinen und führten zu umfangreichen Erkundungsberichten. Die Kuppelbereiche von hochfraktionierten Li-Sn-Graniten waren das Erkundungsziel der Zinnerkundung im Erzgebirge und Erkundungsdaten zu hydrothermalen Ganglagerstätten (v. a. Ag-Zn-Pb- und Fluorit-Baryt-Mineralisationen), die immer in Diskontinuitäten in kristallinen Gesteinen, sprich Störungen, entstanden sind, finden sich beinahe für jede Zone des variszischen Grundgebirges in Deutschland.

| | | | | | | | | | |
|---|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|---|------------|
| Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung | | | | | | | |  BUNDEGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG | |
| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev | Blatt: 658 |
| NAAN | NNNNNNNNNN | NNAAANN | AANNNA | AANN | AAAA | AA | NNNN | NN | |
| SG | 0330 | | | | EA | TF | 0002 | 00 | |

Die große Mehrheit der Plutonite in Deutschland sind jedoch wenig fraktionierte und spezialisierte Granit- und Granodioritkörper, die bis auf die oberflächennahe Nutzung als Naturwerksteinbrüche keine wirtschaftliche Verwendung finden. Erkundungsdaten über die Beschaffenheit dieser kristallinen Wirtsgesteinsformationen in Teufen zwischen 300 m und 1500 m fehlen fast vollständig.

Anhang 2.2.2 Gebirgsdurchlässigkeit in kristallinen Wirtsgesteinsformationen

Bei kristallinem Wirtsgestein sind die Gesteinsparameter Permeabilität und Gebirgsdurchlässigkeit von besonderer Bedeutung für die Integrität eines möglichen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs. Ein geringes Grundwasserangebot ist die entscheidende Voraussetzung für die Ausweisung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (§ 23 Abs. 5 StandAG, Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit kleiner 10^{-10} m/s) und begrenzt somit auch die Korrosion der Endlagerbehälter und verhindert die Mobilisation und den Transport von Radionukliden.

Die Gebirgsdurchlässigkeit setzt sich aus der Durchlässigkeit (hydraulische Permeabilität) des kristallinen Gesteinskörpers selbst (bestimmt durch den durchflusswirksamen Porenraum bzw. effektive Porosität des kristallinen Gesteinstyps) sowie des Trennflächengefüges im Gebirgsbereich (z. B. Klüfte, Störungen) zusammen. Die Variationsbreite der hydraulischen Permeabilität von kristallinen Wirtsgesteinen ist aus Laborversuchen dieser Gesteinstypen bekannt. Die Gebirgsdurchlässigkeit, wie auch die Parameter Transmissivität, Dispersivität oder auch Klüftigkeitsziffern von kristallinen Wirtsgesteinsformationen, können nur zuverlässig im Rahmen der übertägigen Erkundung von Standortregionen erhoben werden. Das umfasst Erkundungsmethoden, wie z. B. Bohrkernaufnahmen, und vor allem geophysikalische, optische und hydraulische Messverfahren, z. B. Pumpversuche mit Packern oder dem „Posiva flow log device“ (Komulainen et al. 2018) in offenen und nicht verrohrten Bohrlöchern.

Die Gebirgsdurchlässigkeit ist in großen Störungszonen und Scherzonen um Größenordnungen höher als in intakten ungeklüfteten oder wenig geklüfteten kristallinen Gesteinskörpern (z. B. Achtziger-Zupančič et al. 2016; Scibek 2020; Snowdon et al. 2021). Klufnetzwerke (fracture networks) in Störungszonen bestimmen den Großteil der Transmissivität und damit die Gebirgsdurchlässigkeit in kristallinen Gesteinsformationen in der obersten kontinentalen Kruste (Faulkner et al. 2010; Mitchell & Faulkner 2012). Störungszonen und ihre hydraulisch wirksamen Klufnetzwerke sollten deshalb bei der übertägigen Erkundung von Standortregionen identifiziert werden.

Die Gebirgsdurchlässigkeit in kristallinen Gesteinsformationen zeigt darüber hinaus eine starke Tiefenabhängigkeit. In Abbildung A. 6 sind Permeabilitätsdaten (aufgetragen gegen die Tiefe) aus dem deutschen Erzgebirge im Vergleich zu weltweiten Datenkompilationen in kristallinen Gesteinen dargestellt (Achtziger-Zupančič et al. 2017). Wenngleich generell große Schwankungen in der hydraulischen Permeabilität und Gebirgsdurchlässigkeit für die verschiedenen Tiefenstufen zu beobachten sind, ist ein insgesamt stark abnehmender Permeabilitäts-Tiefen-Trend in allen Datenkompilationen deutlich zu erkennen (Abbildung A. 6). Auch wenn die Permeabilitätswerte mit zunehmender Tiefe spärlicher werden, unterstreichen die für Deutschland veröffentlichten Daten, dass die Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit (kleiner 10^{-10} m/s; entspricht ca. 10^{-17} m² Permeabilität in Abbildung A. 6) in kristallinen Gesteinsformationen gemäß § 23 StandAG erst in Tiefen von mindestens

Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN | NNNNNNNNNN | NNAAANN | AANNNA | AANN | AAAA | AA | NNNN | NN |
| SG | 0330 | | | | EA | TF | 0002 | 00 |

Blatt: 659

500 m u. GOK im Median erreicht werden kann (Abbildung A. 6). Diese Beobachtungen decken sich auch mit Erkundungsergebnissen zu kristallinen Gesteinsformationen in der Schweiz (Nagra 1994). Man sollte zudem beachten, dass der gezeigte Datensatz für das deutsche Erzgebirge die hydrogeologischen Verhältnisse in stark gestörten und geklüfteten Bereichen des kristallinen Grundgebirges widerspiegelt.

Auf Grund der beschriebenen hydrogeologischen Randbedingungen sollte eine erweiterte Anwendung der Mindestanforderung Mindesttiefe im Schritt 2 der Phase I in Betracht gezogen werden. Dies könnte z. B. eine pauschale Erweiterung der Mindestanforderungen auf eine Mindesttiefe von 500 m direkt bezogen auf die obere Begrenzung von kristallinen Wirtsgesteinsformationen und nicht auf die Geländeoberkante umfassen (vgl. Abbildung A. 7).

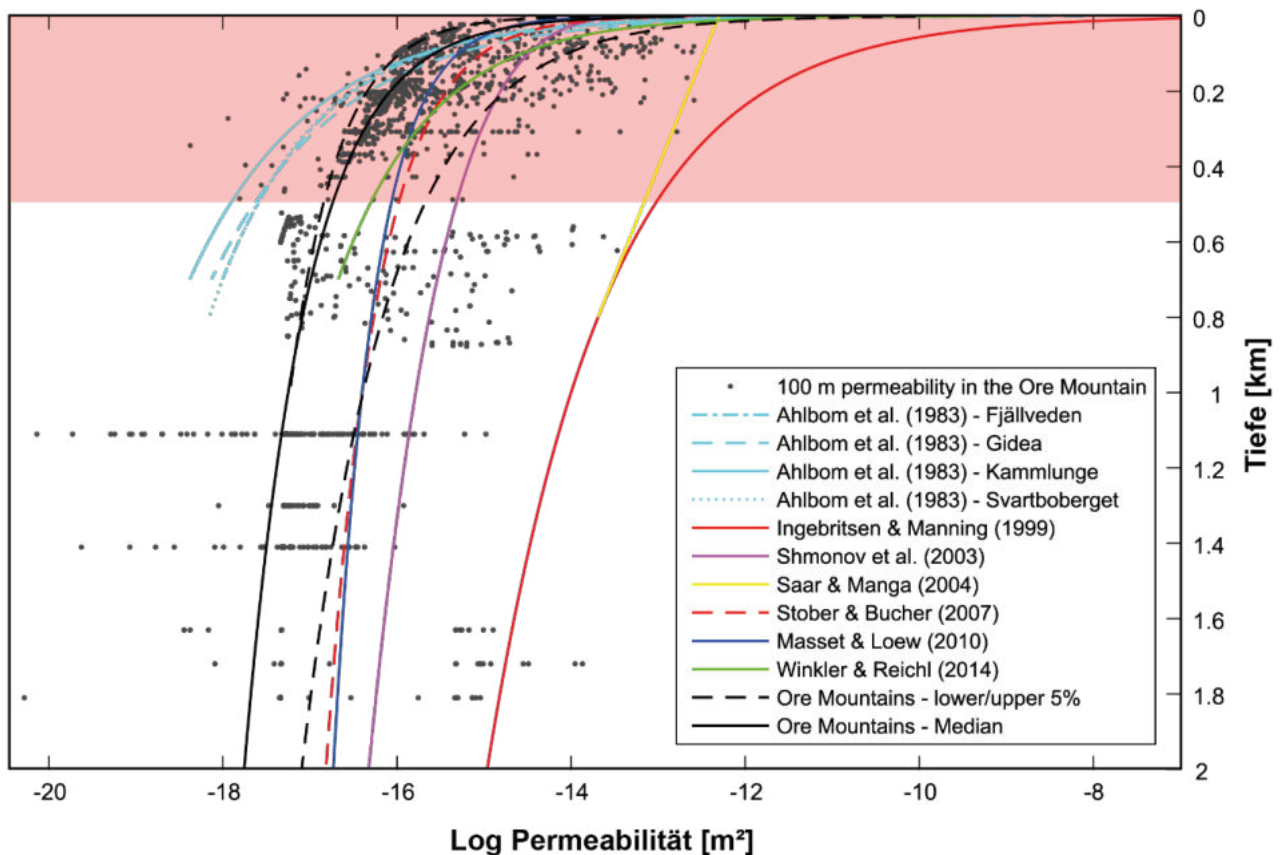


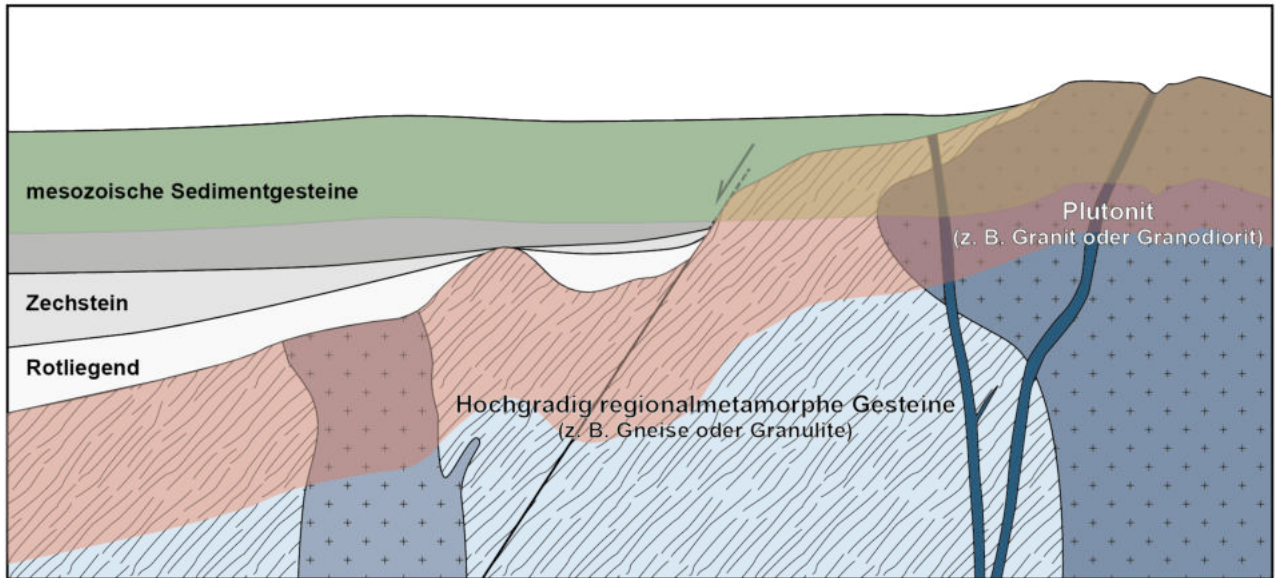
Abbildung A. 6: Gebirgsdurchlässigkeit im deutschen Erzgebirge (Ore mountains) (Achtziger-Zupančič et al. 2017).
im Vergleich mit weiteren Regressionskurven zur Gebirgsdurchlässigkeit aus der Literatur (Ahlbom et al. 1983a; Ahlbom et al. 1983b; Ahlbom et al. 1983c; Ahlbom et al. 1983d; Ingebritsen & Manning 1999; Masset & Loew 2010; Saar & Manga 2004; Shmonov et al. 2003; Stober & Bucher 2007; Winkler & Reichl 2014); Permeabilitätsdaten des Erzgebirges (Achtziger-Zupančič et al. 2017) hier dargestellt als Regressionskurve des Log Median der Permeabilität [m²] mit zunehmender Tiefe; Abbildung verändert nach Achtziger-Zupančič et al. (2017).

Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung



| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN | NNNNNNNNNN | NNAAANN | AANNNA | AANN | AAAA | AA | NNNN | NN |
| SG | 0330 | | | | EA | TF | 0002 | 00 |

Blatt: 660



Legende

- Kristallines Wirtsgestein (Plutonite)
- Kristallines Wirtsgestein (Hochgradig regionalmetamorphe Gesteine)
- Anwendung der Mindestteufe nach § 23 StandAG (300 m)
- Erhöhte Gebirgsdurchlässigkeit in den oberen 500 m in kristallinen Wirtsgesteinsformationen im Grundgebirge (größer als 10^{-10} m/s)

Abbildung A. 7: Geologische Modellvorstellung zur Gebirgsdurchlässigkeit in kristallinen Wirtsgesteinen in Deutschland.

Roter Bereich zeigt die erhöhte Gebirgsdurchlässigkeit in den oberen 500 m in kristallinen Wirtsgesteinsformationen (größer als 10^{-10} m/s).

Anhang 2.2.3 Hydrochemie von tiefen Grundwässern in kristallinen Wirtsgesteinsformationen

Es gibt vergleichsweise wenige hydrochemische Analysen von tiefen Grundwässern (d. h. von Wässern in Teufen größer 500 m) in kristallinen Gesteinsformationen in Deutschland (Stober et al. 2014). Bekannte Grundwasserdaten aus sehr tiefen Bohrungen, d. h. über 2500 m Bohrteufe, stammen aus den Bohrungen Bühl, Soultz-sous-Forêts (Frankreich nahe deutscher Grenze), Urach 3 und den Kontinentalen Tiefbohrungen (KTB-VB und KTB). Diese sehr tiefen Grundwässer im kristallinen Grundgebirge sind oftmals hoch mineralisierte Thermalwässer (Stober et al. 2014), d. h. mit einem Gesamtlösungsinhalt (total dissolved solids, [TDS]) von mehreren 10 g/kg bis 100er g/kg, die an thermische Anomalien (Urach) und/oder große Graben (Bühl)- oder Störungszonen (KTB) gebunden sind (Tabelle A. 1).



| Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung | | | | | | | | |  BGE BUNDESGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG |
|--|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|---|
| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev | |
| NAAN | NNNNNNNNNN | NNAAANN | AANNNA | AANN | AAAA | AA | NNNN | NN | Blatt: 661 |
| SG | 0330 | | | | EA | TF | 0002 | 00 | |

Tabelle A. 1: Auswahl an Analysen des Gesamtlösungsinhalts (TDS) von tiefen Grundwässern in kristallinen Gesteinsformationen (Stober et al. 2014; Achtziger-Zupancič et al. 2017; Röckel & Stober 2017)

| Bohrung / Bergwerk | Teufe | Geologische Strukturen | Kristallines Wirtsgestein | Chemische Signatur | Gesamtlö- sungsinhalt (TDS) |
|--|----------------------|---|---|---|-----------------------------------|
| Bühl | 2699 m | Grabenstruktur, Oberrheingraben | Gneis | Na-Ca-Cl- SO ₄ -HCO ₃ | 200 g/kg |
| Soultez-sous- Forêts (GPK 1 und GPK 2) | 3600 m und 5080 m | Grabenstruktur, Oberrheingraben | Granit | Na-Ca-Cl- SO ₄ -HCO ₃ | 100 g/kg |
| Urach 3 | 4444 m | Geothermische Anomalie im kristal- linen Grundgebirge | Gneis, Diat- exit, Migmatit | Na-Ca-Cl- SO ₄ -HCO ₃ | 80 g/kg |
| Vorbohrung zur Kontinentalen Tiefbohrung KTB-VB | 4000 m | Störungszone, Zone Erbdorf- Vohenstrauß | Paragneis und Amphibolit | Ca-(Na)-Cl- HCO ₃ | 62 g/kg |
| Weißensstadt | 1835 m | Hydraulisch wirk- same Störungszo- nen in Granitpluton, Fichtelgebirge | Granit | Na-(Ca)-Cl- (SO ₄) | 0,3 bis 0,4 g/kg |
| Schlema-Al- beroda | 1800 m | Gera-Jáchymov- Störungszone | Granit (Glim- merschiefer, Schiefer und Phyllite sind keine kristalli- nen Wirtsges- teine) | Na-Ca-Mg- Cl-SO ₄ | 0,3 bis 0,35 g/kg |
| Freiberg | 600 m | Hydrothermale Erz- gänge in Freiburger Graugneisdom | Orthogneis | Na-Ca-SO ₄ - HCO ₃ -Cl | 0,01 bis 0,15 g/kg |

Diese hoch mineralisierten Thermalwässer sind fast ausnahmslos aufsteigende Na-Cl-Tiefenwässer mit hohen CO₂-Konzentrationen (Stober et al. 2014). Lediglich die tiefen Grundwässer der KTB-VB zeigen hohe Calcium-Konzentrationen, die auf die besondere Mineralogie der kristallinen Gesteine am Standort der Kontinentalen Tiefbohrungen zurückzuführen sind und durch Gesteins-Wasser-Wechselwirkung in den tiefreichenden Störungszone mobilisiert wurden (Stober & Bucher 2005). Am Standort der KTB wurden kristalline Gesteinsabfolgen von zerscherten, verfalteten und wechselgelagerten Paragneisen mit mafischen kristallinen Gesteinen wie Metagabbros und Amphiboliten erbohrt, die hohe Modalbestände an Ca-reichem Plagioklas, Hornblende und Klinopyroxen aufweisen.

Die oben genannten Beispiele sind vermutlich nicht repräsentativ für tiefe Grundwässer in kristallinen Wirtsgesteinsformationen in endlagerrelevanten Teufen zwischen 300 m und 1500 m in Deutschland. Die bekannten tiefen Grundwässer der Tiefbohrungen Bühl, Soultez-sous-Forêts,

| Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung | | | | | | | | |  BUNDESGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG |
|---|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|--|
| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev | |
| NAAN | NNNNNNNNNN | NNAAANN | AANNNA | AANN | AAAA | AA | NNNN | NN | Blatt: 662 |
| SG | 0330 | | | | EA | TF | 0002 | 00 | |

Urach 3 und KTB-VB sind allesamt in ähnlichen geologischen Settings zu verorten, an denen hoch-mineralisierte Tiefenwässer sedimentären Ursprungs (Stober & Bucher 1999) in tiefreichenden Störungs-zonen im kristallinen Grundgebirge und an Diskordanzen zwischen sedimentären Einheiten mit z. T. salinaren Abfolgen und liegendem verwittertem Grundgebirge zirkulieren (Boiron et al. 2010; Stober & Bucher 2015).

Es gibt noch eine weitere Gruppe von Grundwasseranalysen in kristallinen Wirtsgesteinen, die aus tiefen Bergwerken und Bohrungen abseits von sedimentären Einheiten stammen, und die insgesamt günstigere geochemische Eigenschaften für die Endlagerung aufweisen (Tabelle A. 1). Exemplarisch für diese tiefen Grundwässer in kristallinen Wirtsgesteinsformationen werden hier hydrochemische Analysedaten der Tiefbohrung Weißenstadt (Röckel & Stober 2017) im Fichtelgebirge gezeigt. Das niedrige Cl/Br-Verhältnis von ca. 80 und die erhöhten Fluorid-Konzentrationen sind Indikatoren dafür, dass die Hydrochemie dieser tiefen Grundwässer im Wesentlichen durch die Gesteins-Wasser-Wechselwirkung mit kristallinem Wirtsgestein (Fichtelgebirgsgranit) bestimmt wird (Röckel & Stober 2017; Stober & Bucher 1999). Die Abnahme des Cl/Br-Verhältnisses mit der Teufe deutet auf einen abnehmenden Einfluss von oberflächennahem Grundwasser mit zunehmender Teufe hin (Röckel & Stober 2017).

Generell kann man erwarten, dass tiefe Grundwässer in kristallinen Wirtsgesteinsformationen im endlagerrelevanten Teufenbereich zwischen 300 m und 1500 m aufgrund von Gesteins-Wasser-Wechselwirkung gewöhnlich einen pH-Wert im neutralen bis gering alkalischen Bereich zwischen 7 und 9 besitzen; vgl. Tabelle A. 2 und Stober et al. (2014). Mit zunehmender Teufe sollten grundsätzlich anoxisch-reduzierende hydrochemische Verhältnisse vorherrschen und der Gesamtlösungs-inhalt von tiefen Grundwässern in kristallinen Gesteinsformationen gering (TDS = einige 100er mg/kg bis 1000er mg/kg) sein, v. a. im Vergleich zu Meerwasser (TDS rund 35 g/kg) oder sedimentären Formationswässern [sedimentary or basinal brines] (TDS größer 35 g/kg).

Der Gesamtlösungs-inhalt nimmt generell mit zunehmender Teufe geringfügig zu (Stober et al. 2014). Kolloide und Komplexbildner sollten in tiefen Grundwässern in kristallinen Gesteinsformationen gewöhnlich eher in kleineren, insignifikanten Mengen auftreten, und die Konzentrationen von Karbonat-Spezies sind vermutlich in felsischen kristallinen Wirtsgesteinsformationen zu vernachlässigen (vgl. Tabelle A. 2).



| Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung | | | | | | | | |  BUNDESGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG |
|--|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|---|
| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev | |
| NAAN | NNNNNNNNNN | NNAAANN | AANNNA | AANN | AAAA | AA | NNNN | NN | Blatt: 663 |
| SG | 0330 | | | | EA | TF | 0002 | 00 | |

Tabelle A. 2: Hydrochemische Analysedaten aus der Tiefbohrung Weißenstadt (verändert nach Röckel & Stober 2017); n.b. bedeutet nicht bestimmt

| | Einheit | PPV1 | PPV3 | 1790 m |
|------------------------|--------------|---------------|---------------|---------------|
| Teufenabschnitt | m | 380 – 1835 | 570 – 1835 | 1790 |
| Temperatur | °C | 21,7 | 22,3 | n.b. |
| pH-Wert | – | 8,18 | 8,35 | n.b. |
| el. Leitf. 25 °C | µS/cm | 464 | 501 | n.b. |
| Sauerstoff gelöst | mg/kg | 2,99 | 6,64 | n.b. |
| Kationen | | | | |
| Natrium | mg/kg | 65,50 | 90,00 | 106,00 |
| Kalium | mg/kg | 0,81 | 0,87 | 1,95 |
| Calcium | mg/kg | 20,00 | 24,00 | 32,10 |
| Magnesium | mg/kg | 0,25 | 0,25 | 0,25 |
| Lithium | mg/kg | 0,11 | 0,19 | 0,21 |
| Ammonium | mg/kg | n.b. | n.b. | n.b. |
| Strontium | mg/kg | 0,10 | 0,19 | 0,36 |
| Eisen | mg/kg | 0,20 | 0,15 | 0,94 |
| Mangan | mg/kg | 0,05 | 0,01 | 0,04 |
| Anionen | | | | |
| Chlorid | mg/kg | 52,50 | 100,00 | 127,00 |
| Hydrogenkarbonat | mg/kg | 92,70 | 55,40 | 61,00 |
| Sulfat | mg/kg | 22,70 | 50,40 | 60,00 |
| Bromid | mg/kg | 0,53 | 1,21 | n.b. |
| Jodid | mg/kg | 0,008 | 0,011 | n.b. |
| Fluorid | mg/kg | 6,54 | 7,79 | n.b. |
| Hydrogenphosphat | mg/kg | 0,03 | 0,10 | n.b. |
| Spurenelement | | | | |
| Arsen | mg/kg | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| Blei | mg/kg | n.b. | n.b. | – |
| Barium | mg/kg | 0,003 | 0,003 | 0,015 |
| Aluminium | mg/kg | 0,04 | 0,04 | 0,59 |
| SiO ₂ | mg/kg | 35,55 | 30,16 | n.b. |
| | | | | |
| TDS | mg/kg | 297,59 | 360,77 | 390,47 |
| Cl/Br | mg/mg | 99,06 | 82,64 | n.b. |

| Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung | | | | | | | | |  BUNDESGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG |
|--|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|--|
| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev | |
| NAAN | NNNNNNNNNN | NNAAANN | AANNNA | AANN | AAAA | AA | NNNN | NN | Blatt: 664 |
| SG | 0330 | | | | EA | TF | 0002 | 00 | |

Insgesamt kann man deshalb von günstigen hydrochemischen Randbedingungen in kristallinen Wirtsgesteinen ausgehen. Im Referenzdatensatz für kristalline Wirtsgesteine (BGE 2020b) wurden deshalb zum Zwischenbericht Teilgebiete vier der fünf aufgeführten Indikatoren von Anlage 10 (zu § 24 Abs. 5) StandAG (pH-Bedingungen, Redoxmilieu, Kolloide/Komplexbildner, Karbonatkonzentration) als „günstig“ bewertet.

Anhang 2.3 Kristallines Wirtsgestein mit einschlusswirksamem Gebirgsbereich (Endlagersystem Typ 1)

Anhang 2.3.1 Einschlusswirksamer Gebirgsbereich als wesentliche Barriere

In einem Endlagersystem Typ 1 beruht der sichere Einschluss der radioaktiven Abfälle im Bewertungszeitraum auf einem oder mehreren einschlusswirksamen Gebirgsbereichen in Zusammenwirken mit den geotechnischen und technischen Barrieren des Endlagersystems (§ 4 Abs. 3 EndlSi-AnfV). Ein einschlusswirksamer Gebirgsbereich wird gemäß § 2 Nr. 9 StandAG definiert als „*der Teil eines Gebirges, der bei Endlagersystemen, die wesentlich auf geologischen Barrieren beruhen, im Zusammenwirken mit den technischen und geotechnischen Verschlüssen den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle in einem Endlager gewährleistet*“. Die Anforderungen an die Beschaffenheit eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs sind in den Kriterien (Ausschlusskriterien, Mindestanforderungen und geowissenschaftliche Abwägungskriterien) des StandAG definiert (vgl. §§ 22 bis 24 StandAG). Die bestimmende Mindestanforderung an das kristalline Wirtsgestein, die maßgeblich zur Entscheidung beiträgt, ob ein einschlusswirksamer Gebirgsbereich ausweisbar ist, ist die Gebirgsdurchlässigkeit (§ 23 Abs. 5 StandAG).

Etwa 60 % der Datenwerte zur Gebirgsdurchlässigkeit (Abbildung A. 8) aus Achtziger-Zupančič et al. (2017) zeigen eine Gebirgsdurchlässigkeit kleiner 10^{-10} m/s. Diese Datenkompilation wurde aus hydrogeologischen Messdaten und Beschreibungen zu ehemaligen erzgebirgischen Bergwerken gewonnen. Die Gebirgsdurchlässigkeits-Werte repräsentieren komplette Bergwerks-Sohlen, Stollenabschnitte oder 100 m mächtige Gebirgsabschnitte in den kristallinen Gesteinen. Die Mehrheit der hydraulischen Datenwerte aus Teufen größer 600 m stammt jedoch aus zwei Bergwerken, Pöhla-Tellerhäuser (U-Sn-Zn-In) und Schlema-Alberoda (U). Die Nebengesteine dieser Bergwerke sind zudem nicht nur kristalline Wirtsgesteine wie Granite, sondern v. a. auch Glimmerschiefer, Skarne und Hornfelse. Die hydrogeologischen Daten zeigen somit ein deutliches statistisches Bias und charakterisieren die hydrogeologischen Randbedingungen in einer bedeutenden Störungszone des Erzgebirges, der Gera-Jáchymov-Zone. Dennoch zeigt die Datenkompilation von Achtziger-Zupančič et al. (2017), dass in einer Mehrheit der repräsentierten kristallinen Gebirgskörper die Mindestanforderung Gebirgsdurchlässigkeit (§ 23 Abs. 5 StandAG) erfüllt werden könnte.

**Methodenbeschreibung zur Durchführung
der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen
gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung**



| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN | NNNNNNNNNN | NNAAANN | AANNNA | AANN | AAAA | AA | NNNN | NN |
| SG | 0330 | | | | EA | TF | 0002 | 00 |

Blatt: 665

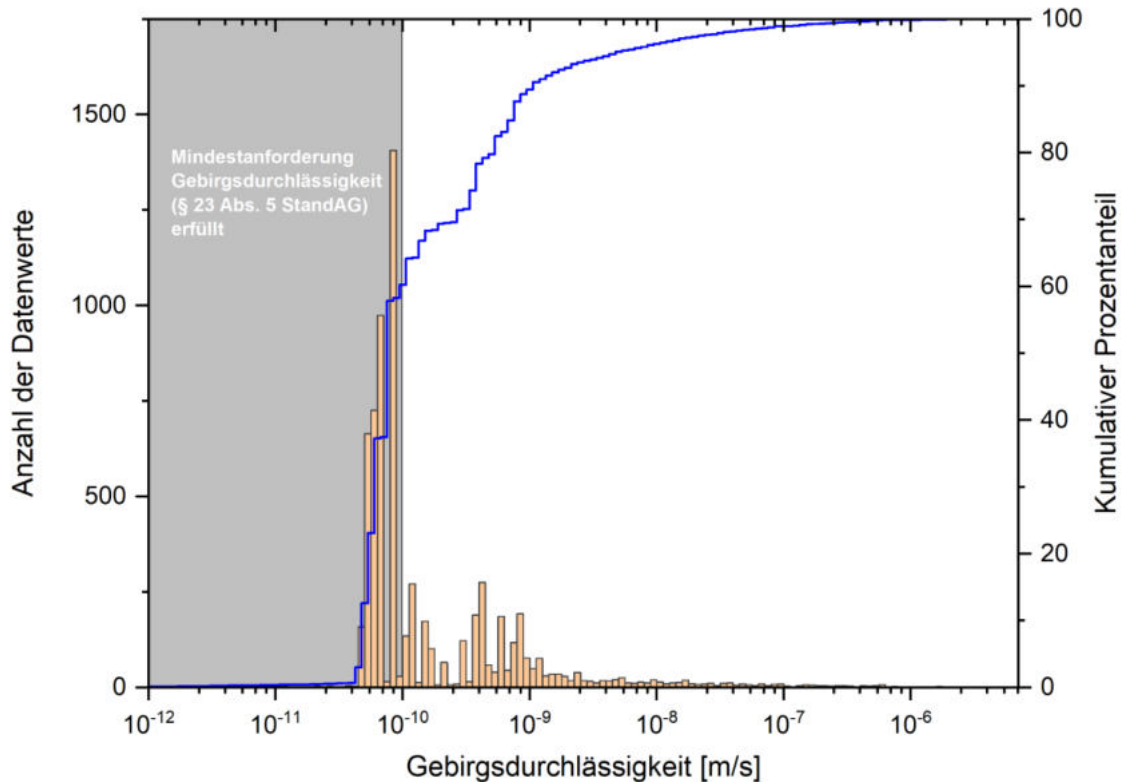


Abbildung A. 8: Histogramm der Gebirgsdurchlässigkeit in kristallinen Gesteinsformationen des Erzgebirges [log Skalierung der x-Achse]. Kumulativer Prozentanteil der Gebirgsdurchlässigkeit dargestellt als blaue Kurve; Daten stammen aus Achtziger-Zupančič et al. (2017).

Anhang 2.4 Kristallines Wirtsgestein ohne einschlusswirksamen Gebirgsbereich (Endlagersystem Typ 2)

Der Einschluss und die Rückhaltung der radioaktiven Abfälle im Einlagerungsort wird in diesem Konzept insbesondere durch die technischen und geotechnischen Barrieren übernommen. Dabei werden entsprechend hohe Anforderungen an die Integrität dieser Barrieren gestellt. Ausschlaggebend hierfür sind insbesondere die in den nachfolgenden Kapiteln aufgeführten Prozesse und Anforderungen.

Anhang 2.4.1 Langzeitintegrität des Endlagerbehälters

Anhang 2.4.1.1 Einwirkungen durch Korrosion

Die Langzeitintegrität des Endlagerbehälters und damit der sichere Einschluss der radioaktiven Abfälle wird hauptsächlich durch die ablaufenden Korrosionsprozesse nach der Einlagerung über den Bewertungszeitraum bestimmt. Diese Prozesse wiederum sind insbesondere von der Wahl des Werkstoffs in Verbindung mit der Zusammensetzung der Wässer im Endlagerbereich und der Schutzwirkung der geotechnischen Barrieren abhängig. Da derzeit in Deutschland noch kein Endlagerbehälterkonzept für kristallines Wirtsgestein vorliegt, die BGE aber die Arbeiten auf diesem Gebiet erst vor kurzem aufgenommen hat und somit eine Werkstoffwahl noch nicht getroffen wurde,

**Methodenbeschreibung zur Durchführung
der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen
gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung**



| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN | NNNNNNNNNN | NNAAANN | AANNNA | AANN | AAAA | AA | NNNN | NN |
| SG | 0330 | | | | EA | TF | 0002 | 00 |

Blatt: 666

kann auf diese Thematik nur allgemein eingegangen werden. Eine Detailbetrachtung der spezifischen Prozesse kann und wird erst zu einem späteren Zeitpunkt erfolgen, wenn erste Festlegungen (z. B. Wahl des Behälterwerkstoffes) getroffen wurden. Nach derzeitigem Kenntnisstand sind vor allem metallische Werkstoffe als Endlagerbehältermaterial geeignet (King 2017; Padovani et al. 2017). Teilweise wird auch über die Verwendung von Keramiken nachgedacht – ausgereifte Konzepte hierzu gibt es aber derzeit noch nicht (King 2017). Diese beiden Werkstoffarten stehen wegen ihrer guten Korrosionsbeständigkeit im Fokus, da dies für den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle auf Basis der technischen und geotechnischen Barrieren essentiell ist.

Die Arbeiten der BGE im Bezug zum Thema Endlagerbehälter werden sich an dem jeweiligen Wissensstand orientieren, und dieser wird in die Ausarbeitungen mit einbezogen. Je nachdem, ob nun ein Metall oder eine Keramik als Behältermaterial verwendet wird, unterscheiden sich die Veränderungsprozesse des Behälterwerkstoffes. Keramiken werden bei den zu erwartenden chemischen Zusammensetzungen der Wässer im Endlagerbereich mit einer geringen Rate in Lösung gehen. Im Gegensatz dazu werden Metalle korrodieren, wobei die Korrosionsart und -rate, d. h. welche Korrosionsprozesse und wie viel Materialabtrag stattfinden wird, sehr stark von der Wahl des Werkstoffes und der chemischen Zusammensetzung der Wässer abhängen.

Weiterhin ist auch die Entwicklung der chemischen Randbedingungen beziehungsweise Zusammensetzung der Wässer im Endlager über den Bewertungszeitraum von besonderer Bedeutung. Durch das Auffahren der Hohlräume, die Bewetterung während des Endlagerbetriebs und durch die Einlagerung der radioaktiven Abfälle wird sich die chemische Zusammensetzung der Wässer ändern, da diese wieder in Kontakt mit Luft und damit Sauerstoff stehen. Bis zum Verschluss des Einlagerungsbereichs und während der Übergangsphase wird die Korrosion durch Sauerstoff der relevante Korrosionsprozess sein. Darauf folgend und damit über den Bewertungszeitraum hinaus wird sich der anaerobe Zustand von vor der Einlagerung einstellen. Zudem können ablaufende Prozesse (z. B. Vergletscherung und anschließendes Abschmelzen des Gletschers) die Zusammensetzung verändern. SKB und Posiva, die für die Endlagerung der hochradioaktiven Stoffe verantwortlichen Institutionen in Schweden und Finnland, haben hier bereits entsprechende Abschätzungen für die ersten 10.000 Jahre nach dem Verschluss des jeweils eigenen Endlagers getroffen (King et al. 2012). Die Entwicklung der chemischen Zusammensetzung der Grundwässer in dem Zeitraum nach diesen 10.000 Jahren ist dabei maßgeblich durch die Prognose der Klimaentwicklung bestimmt. In Deutschland sind entsprechende Betrachtungen durchzuführen und eigene Szenarien zu erarbeiten, da es regionale Unterschiede im Vergleich zu diesen Ländern gibt, insbesondere je nach Standort in Deutschland (z. B.: Nord- oder Süddeutschland).

Anhang 2.4.1.2 Schutzwirkung durch geotechnische und geologische Barrieren

Die Langzeitintegrität des Behälters ergibt sich weiterhin über das Zusammenspiel mit den geotechnischen Barrieren, insbesondere durch das den Behälter umgebende Buffermaterial. Diesen geotechnischen Barrieren werden eigene Aufgaben bzw. Anforderungen zugesprochen (vgl. auch Kapitel 4.1.3.3), um den Behälter bestmöglich vor Einwirkungen und Prozessen (z. B. höhere Belas-

2020-10-26_PM_QMV02_Textblatt A4 Hochformat_REV02

**Methodenbeschreibung zur Durchführung
der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen
gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung**



| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev |
|---------|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|
| NAAN | NNNNNNNNNN | NNAAANN | AANNNA | AANN | AAAA | AA | NNNN | NN |
| SG | 0330 | | | | EA | TF | 0002 | 00 |


Blatt: 667

tungen durch eine Gletscherauflast oder mikrobielle Korrosion) zu schützen und somit seine Langzeitintegrität bestmöglich gewährleisten zu können. Die vorhandene Wassermenge um den Behälter herum soll reduziert werden, um ablaufende Korrosionsprozesse zu verzögern bzw. zu minimieren. Dies soll erreicht werden, indem der Buffer eine geringe Durchlässigkeit aufweist, sodass der Lösungstransport nur durch Diffusion stattfinden kann. Gleichzeitig soll das Anströmen des Wassers, also der advective Stofftransport, an den Behälter durch den Buffer verhindert werden, sodass anhaftende Korrosionsprodukte, die eine Schutzwirkung der Behälteroberfläche aufweisen können, nicht fortgespült werden. Weiterhin dient der Buffer der Einstellung eines gewollten und konstanten geochemischen Milieus um den Behälter herum, das zur Langzeitintegrität der Behälter beitragen soll. Dadurch wird es möglich sein das Verhalten des Endlagerbehälters bei den gegebenen Randbedingungen über lange Zeiträume prognostizieren zu können. Inwiefern diese Anforderungen eingehalten werden können, ist stark abhängig von den späteren geologischen Gegebenheiten vor Ort, insbesondere dem Kluftsystem und potenziellen Wasserangebot am Standort selbst.

Durch die begrenzte Datenlage zum derzeitigen Zeitpunkt im Standortauswahlverfahren lassen sich noch keine genauen Aussagen treffen und es kann nur davon ausgegangen werden, dass man mit den entsprechenden technischen Planungen des Endlagers diese Zielvorstellungen erreichen wird. Die entsprechenden Verschluss- und Abdichtbauwerke müssen so platziert werden, dass (potenzielle) Zutrittswege von Lösungen abgedichtet werden, sodass der Zutritt von Wasser in das Endlager minimiert wird. Die Anzahl dieser Barrieren kann zum jetzigen Zeitpunkt allerdings nicht abgeschätzt werden. Unter Umständen werden viele dieser Barrieren notwendig sein, für die dann entsprechende Nachweise ihrer Funktionsfähigkeit zu führen sind.

Neben der Korrosion der Behälter im kristallinen Wirtsgestein ist insbesondere die mechanische Belastung auf den Endlagerbehälter ein entscheidender Faktor für die Langzeitintegrität. Bei der konstruktiven Auslegung müssen statische – und, sofern auftretend, dynamische – Zug- und Druckbelastungen und Scherbeanspruchungen auf den Endlagerbehälter im Einlagerungsbereich berücksichtigt werden. Die Größenordnung der Zug- bzw. Druckspannungen hängt insbesondere von der Tiefe und dem Wirtsgestein ab. Scherbeanspruchungen werden maßgeblich durch ein ungleichmäßiges Quellverhalten des Buffermaterials (in Tongestein oder kristallinem Wirtsgestein) oder Bewegungen entlang von Klüften bzw. Scherzonen entstehen. Klüfte bzw. Scherzonen treten insbesondere im kristallinen Wirtsgestein auf (s. Anhang 2.2.2) und sind dementsprechend in der Endlagerauslegung zu berücksichtigen. Möglicherweise sollten Bereiche mit vielen oder großen Klüften bzw. Scherzonen aus Gründen der besseren Prognostizierbarkeit der Langzeitsicherheit gemieden werden. Kriterien hierfür sind allerdings noch zu erarbeiten und weiter zu untersuchen.

Seitens SKB und Posiva wurden Sicherheitsfunktionen für ein Endlagersystem im Kristallin formuliert (Posiva Oy & SKB 2017), die auch die oben benannten Aspekte zu großen Teilen beinhalten. Die Übertragbarkeit dieser, bzw. grundlegender, Gedanken auf ein deutsches Konzept ist bei den kommenden Arbeiten zu überprüfen.

| Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung | | | | | | | | |  BUNDESGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG |
|---|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|---|
| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev | |
| NAAN | NNNNNNNNNN | NNAAANN | AANNNA | AANN | AAAA | AA | NNNN | NN | Blatt: 668 |
| SG | 0330 | | | | EA | TF | 0002 | 00 | |


Anhang 2.4.1.3 Fertigungs- und Prüfverfahren

Die Endlagerbehälter sind in der späteren Produktion und bei dem Verschluss durch geeignete Prüfprozesse und -abläufe so zu überwachen, dass die Eigenschaften zur Erfüllung der Anforderungen zum sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle gewährleistet und eingehalten werden. Insbesondere der Verschluss des Behälters, d. h. nach der Befüllung mit radioaktiven Abfällen, wird der entscheidende Prozess sein, da auf diesem eine hohe Anforderung hinsichtlich der Behälterintegrität liegt. Dieser Prozess muss daher bestmöglich überwacht und das Ergebnis überprüft werden. Die besondere Herausforderung ergibt sich hierbei dadurch, dass die Prüfung nur von außen durchgeführt werden kann. Vor der Befüllung mit radioaktiven Abfällen ist eine Prüfung von sowohl innen als auch außen möglich, was die Detektion von Mängeln im Vergleich besser ermöglicht.

Durch das in Deutschland vorhandene Abfallinventar (vgl. Kapitel 2) wird es eine hohe Stückzahl an Endlagerbehältern (mehrere Tausend) geben, die alle dem gleichen Standard entsprechen müssen. Statistisch gesehen wird es dazu kommen, dass einige Verschlüsse nicht den gesetzten Anforderungen entsprechen werden. Hierbei sind dann insbesondere an die Prüfeinrichtungen hohe Anforderungen hinsichtlich der Detektion von Fehlern im Prozess zu stellen, sodass die nicht den Anforderungen entsprechenden Behälter identifiziert werden. Ob diese Behälter dann durch Maßnahmen zur Endlagerung qualifiziert werden können oder ob diese wieder geöffnet und die Abfälle in neue Behälter verpackt werden müssen, hängt von den später zu definierenden Kriterien an die Qualität des Verschlusses ab. Es ist dabei zu betonen, dass im Falle des einschlusswirksamen Gebirgsbereichskonzeptes ebenfalls hohe Anforderungen an den Verschluss des Behälters gelegt werden. Dieser muss ebenfalls dicht sein und über einen bestimmten Zeitraum seine Integrität beibehalten (BGE 2021b). In diesem Fall kann der Zeitraum allerdings deutlich kürzer ausfallen als bei dem technischen und geotechnischen Konzept. Das Schadensausmaß eines defekten Behälters ist vernachlässigbar, da der einschlusswirksame Gebirgsbereich langfristig die Hauptfunktion des sicheren Einschlusses übernimmt.

Anhang 2.4.2 Nachweis der Behälterintegrität über den Bewertungszeitraum

Derzeit ist noch unklar, wie der Nachweis der Behälterintegrität konkret über den Bewertungszeitraum durchgeführt werden kann. In der Technik bewährt hat sich die Durchführung von Versuchen über den – sofern möglich – gesamten vorgesehenen Produktlebenszyklus oder die Durchführung von Versuchen, die durch entsprechende Prüfparameter mehrere Jahre oder Jahrzehnte in kürzerer Versuchszeit abdecken. Da der Bewertungszeitraum laut § 1 Abs. 2 StandAG allerdings eine Million Jahre beträgt, werden diese Optionen nicht für den Nachweis über den gesamten Zeitraum in Frage kommen. Sehr wahrscheinlich ist die Betrachtung von geologischen oder ähnlichen Analogieprozessen und der Extrapolation des Verhaltens eines vergleichbar kurzen Zeitraums. Genannt sei hier insbesondere die Korrosionsrate, die über einen kurzen Zeitraum (Wochen, Monate bzw. wenige Jahre) ermittelt werden kann. Anschließend wird diese Korrosionsrate über den Bewertungszeitraum extrapoliert und damit der Materialabtrag an dem Endlagerbehälter abgeschätzt. Durch den Ver-

| Methodenbeschreibung zur Durchführung der repräsentativen vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Endlagersicherheitsuntersuchungsverordnung | | | | | | | | |  BUNDESGESELLSCHAFT FÜR ENDLAGERUNG |
|---|-------------|----------------|------------|-----------|---------|----|----------|-----|--|
| Projekt | PSP-Element | Funktion/Thema | Komponente | Baugruppe | Aufgabe | UA | Lfd.-Nr. | Rev | |
| NAAN | NNNNNNNNNN | NNAAANN | AANNNA | AANN | AAAA | AA | NNNN | NN | Blatt: 669 |
| SG | 0330 | | | | EA | TF | 0002 | 00 | |

gleich zwischen Materialabtrag, inklusive Betrachtung und Bewertung weiterer ablaufender Korrosionsprozessen, und Wandstärke des Behälters kann überprüft werden, ob dieser bis zum Ende des Bewertungszeitraums seine Integrität beibehalten wird.

In Schweden und Finnland wird der Nachweis wie in dem vorherigen Absatz beschrieben für einen regulatorisch vorgeschriebenen Zeitraum von 100 000 Jahren durchgeführt. Die Untersuchungen legen aber nahe, dass der Behälter über einen deutlich längeren Zeitraum seine Integrität beibehalten wird, zu konkreten möglichen Zeiträumen werden aber keine Aussagen getroffen (Raiko 2005; King et al. 2012).

Anhang 2.4.3 Annahmen für das Endlagersystem Typ 2

Wie in Anhang 2.1 aufgeführt gibt es seitens der Verordnung für die rvSU die Annahme, bei der davon ausgegangen werden kann, dass die technischen und geotechnischen Barrieren ihre Funktion grundsätzlich erfüllen, sofern dies nicht durch den aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik ausgeschlossen erscheint (§ 7 Abs. 6 Nr. 2 EndlSiUntV). Es soll in Schritt 2 der Phase I des Standortauswahlverfahrens eine fachliche Begründung erfolgen, warum die jeweilige Annahme aus Sicht der BGE nach dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik nicht ausgeschlossen erscheint. Dies wird erst bei zukünftigen Arbeiten erfolgen.