

Projekt CHRISTA

Machbarkeitsuntersuchung zur Entwicklung einer Sicherheits- und Nachweismethodik für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle im Kristallingestein in Deutschland



PROJ	PSP	OBJ	FUNK	KOMP	BAUG	AG	UA	LFNR	RV
FE						BE	BY	0002	00

DOKID: 11766770

ULV-Nr.: 646903

Projekt CHRISTA

Machbarkeitsuntersuchung zur Entwicklung einer Sicherheits- und Nachweismethodik für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle im Kristallingestein in Deutschland

Autoren:

Michael Jobmann (Editor)
Dirk-Alexander Becker
Jörg Hammer
Steffen Jahn
Andree Lommerzheim
Nina Müller-Hoeppé
Ulrich Noseck
Jürgen Krone
Jan Richard Weber
Axel Weitkamp
Jens Wolf

Auftraggeber: BMWi vertreten durch KIT, Projektträger Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

FKZ: 02E11375A/B

Berichtsnummer: TEC-20-2016-AB

Peine 24.10.2016

Die diesem Bericht zugrunde liegenden Arbeiten wurden im Auftrag des BMWi von der BGR sowie vertreten durch den Projektträger Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie (KIT) unter den Förderkennzeichen 02E11375A und 02E11375B von der GRS gGmbH bzw. DBE TECHNOLOGY GmbH durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt liegt jedoch allein bei den Autoren.



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie



PTKA
Projektträger Karlsruhe

Karlsruher Institut für Technologie

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Hintergrund	5
2	Grundlagen für die Formulierung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes im Kristallingestein	7
2.1	Sicherheitsanforderungen.....	7
2.2	Struktureller Aufbau von Kristallingesteinen.....	7
2.3	Sicherer Einschluss	9
2.3.1	Der einschlusswirksame Gebirgsbereich (ewG).....	9
2.3.2	Der einschlusswirksame Bereich (ewB)	14
2.4	Integrität von Kristallingesteinen	15
2.4.1	Integritätskriterien	16
2.4.2	Integritätsnachweis	17
2.5	Indikative Modellrechnungen zur Radionuklidmigration	20
2.5.1	Rechenwerkzeuge	21
2.5.2	Rechenfälle.....	22
2.5.3	Datengrundlage	25
2.5.4	Ergebnisse der Modellrechnungen	28
2.5.5	Schlussfolgerungen	32
3	Einlagerungs- und geotechnisches Barrierenkonzept.....	34
3.1	Behälterkonzept.....	34
3.2	Einlagerungs- und Verschlusskonzept im KBS-3-Konzept	38
3.2.1	Versatz der Einlagerungsstrecken	41
3.2.2	Versatz der Zugangs- und Transportstrecken	41
3.2.3	Verfüllung von Grubenbereichen ohne hydraulische Anforderungen	42
3.2.4	Verfüllung der Erkundungsbohrungen.....	42
3.2.5	Verschlussbauwerke und ihre Funktion	42
3.2.6	Betrachtung der aufgelockerten Konturzone	44
3.3	Konstruktive Lösungen von Verschlussbauwerken im Kristallingestein.....	44
3.4	Umsetzung für einen multiplen ewG	47
3.4.1	Abdichtungskonzept mit Asphaltabdichtung.....	47
3.4.2	Kombinierte Verschlussmodule.....	52
4	Synthese bisheriger Untersuchungen im Kristallingestein	53
4.1	Bisherige Untersuchungen in Deutschland	53
4.1.1	Voruntersuchungen zur Kristallinstudie	53
4.1.2	Kristallinstudie: Untersuchung und Bewertung von Regionen in nicht-salinaren Formationen	57
4.1.3	Digitale Aufbereitung der Daten	60

4.2	Erwartete Erkenntniszuwächse	61
4.2.1	Datenbanken, Fach- und Geoinformationssysteme	62
4.2.2	Weitere Forschungsprojekte mit Bezug zu Kristallingestein als Wirtsgestein in Deutschland.....	63
4.3	Zusammenstellung der in Kristallingesteinen eingesetzten geologisch-geophysikalischen Standorterkundungsmethoden	67
4.3.1	Ziele und Methoden bei der Anwendung von Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen sowie bei der übertägigen Standorterkundung.....	68
4.3.2	Ziele und Methoden bei der untertägigen Standorterkundung.....	83
4.3.3	Zusammenstellung grundlegender Parametern für kristalline Wirtsgesteine	98
4.4	Klassifikation des Eignungsgrades kristalliner Gesteine	102
5	Diskussion und Bewertung.....	108
5.1	Sicherheits- und Nachweiskonzept	108
5.2	Bewertung der Ergebnisse der indikativen Modellrechnungen	109
5.3	Anwendbarkeit vorhandener Berechnungswerkzeuge	110
5.4	Anwendung der Integritätskriterien	111
5.5	Verschlusskonzepte.....	111
5.6	Bisherige Untersuchungen zu kristallinen Wirtsgesteinen in Deutschland.....	112
5.7	Standorterkundung und Eigenschaften kristalliner Gesteine	112
6	Schlussfolgerungen und Ausblick	114
7	Literaturverzeichnis.....	116

1 Einleitung und Hintergrund

In den vergangenen Jahrzehnten erfolgten in den deutschen Forschungseinrichtungen wie auch in den mit der Endlagerung radioaktiver Abfälle direkt oder indirekt befassten Institutionen umfangreiche Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zu konzeptionellen und sicherheitstechnischen Fragen der Endlagerung ausgedienter Brennelemente und hoch radioaktiver Abfälle. Im Kontext und im Kontakt mit der internationalen Forschungsgemeinschaft wurden die Methodik und die Werkzeuge zur Führung des Sicherheitsnachweises für die Nachverschlussphase erarbeitet und weiterentwickelt.

Aufgrund der mit dem Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde Abfälle (Standortauswahlgesetz – StandAG) vom 23. Juli 2013 initiierten Neuausrichtung der Suche nach einem Standort für ein Endlager für Wärme entwickelnde Abfälle sind neben den Wirtsgesteinen Steinsalz in steiler und flacher Lagerung und Tongestein auch Kristallingestein zu untersuchen. Dies ist ein wesentlicher Punkt, der auch im aktuellen Förderkonzept des BMWi (2015-2018) seinen Niederschlag dahingehend gefunden haben, zu klären, welchen Stellenwert kristalline Wirtsgesteine unter den spezifisch deutschen Randbedingungen für die Endlagerung haben können. Um einen objektiven Vergleich von Endlagersystemen in unterschiedlichen Wirtsgesteinen durchführen und letztendlich bewerten zu können, müssen entsprechende Grundlagen vorhanden sein.

Maßgebend für die Entwicklung von Sicherheits- und Nachweiskonzepten sind zunächst die Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle (BMU 2010). In diesen Sicherheitsanforderungen ist das sogenannte „ewG-Konzept“ verankert (vgl. Kapitel 2.2), welches besagt, dass vom Antragsteller ein einschlusswirksamer Gebirgsbereich (ewG) ausgewiesen werden muss, der im Zusammenwirken mit den technischen Verschlüssen den sicheren Einschluss der Abfälle gewährleistet. Das Einschlussvermögen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (Integrität) muss über den Nachweiszeitraum von einer Million Jahre sicherstellen, dass allenfalls nur geringfügige Mengen radioaktiver Stoffe in die Biosphäre freigesetzt werden können. Die Sicherheitsanforderungen schließen Kristallingestein nicht explizit aus, trotzdem ist es offensichtlich, dass das ewG-Konzept eigentlich auf die Wirtsgesteine Salz und Tonstein fokussiert ist, da explizit für Salinar- und Tongesteine Kriterien genannt werden, anhand derer die Integrität des ewG zu prüfen ist. Für Kristallingestein fehlen solche Kriterien.

Im Rahmen des Projektes CHRISTA sollten zunächst die Grundlagen für die Formulierung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes im Kristallingestein untersucht werden. Dies betrifft die mögliche Ausweisung eines ewG im Kristallin, die Möglichkeit zum Nachweis der Integrität des Wirtsgesteins sowie Berechnungen zur Migration von Radionukliden. Darüber hinaus wurde untersucht, in wie weit sich das in Schweden und Finnland bereits für konkrete Standorte bis zur Genehmigungsreife entwickelte Konzept zur Endlagerung in skandinavischen Kristallingesteinen auf die deutschen Verhältnisse übertragen werden kann. Es wird als KBS-3-Konzept bezeichnet und beruht vorrangig auf der Einschlusswirksamkeit von Behältern mit einem Kupfermantel.

Abschließend wurde neben der Synthese bisheriger Untersuchungen im Kristallingestein in Deutschland geprüft, welche Erkundungsmethoden verfügbar sind, die im Zusammenhang mit der Ausweisung eines ewG im Kristallin benötigt werden.

Die Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe gemäß § 3 StandAG (Endlagerkommission) ist auf die gleiche Fragestellung gestoßen und hat dies im Abschnitt 5.5.4 *Nachweisführung über den sicheren Einschluss der radioaktiven Stoffe* ihres Abschlussberichtes dargelegt, der zeitgleich mit dem Ende des Vorhabens vorgelegt wurde (Deutscher Bundestag 2016). Aufgrund der zeitlichen Überschneidung konnte in dem CHRISTA Projekt keine Diskussion der Aussagen des Berichtes der Endlagerkommission erfolgen.

2 Grundlagen für die Formulierung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes im Kristallingestein

2.1 Sicherheitsanforderungen

Die Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle (BMU 2010)¹ fordern für den Sicherheitsnachweis eine Langzeitaussage zur Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches (ewG) über einen Zeitraum von einer Million Jahren. Hierfür ist vom Antragsteller der ewG räumlich und zeitlich eindeutig zu definieren. In den Sicherheitsanforderungen werden zwei allgemeingültige Anforderungen an den ewG formuliert. Der Antragsteller hat zu zeigen, dass²

Anforderung 1:

die Ausbildung von solchen sekundären³ Wasserwegsamkeiten innerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs ausgeschlossen ist, die zum Eindringen oder Austreten ggf. schadstoffbelasteter wässriger Lösungen führen können und dass

Anforderung 2:

ggf. im einschlusswirksamen Gebirgsbereich vorhandenes Porenwasser nicht am hydrogeologischen Kreislauf im Sinne des Wasserrechts außerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs teilnimmt. Dies gilt als erfüllt, wenn die Ausbreitung von Schadstoffen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich durch advektive Transportprozesse allenfalls vergleichbar zur Ausbreitung durch diffusive Transportprozesse erfolgt.

Darüber hinaus werden in den Sicherheitsanforderungen weitere Anforderungen explizit für Salinar- und Tongestein definiert, an Hand derer die Integrität des ewG zusätzlich zu prüfen ist. Für ein Endlager in Kristallingestein werden keine weiteren spezifischen Anforderungen formuliert. Die Sicherheitsanforderungen gehen von einem Endlagerkonzept aus, bei dem die radioaktiven Abfälle in einer tiefen geologischen Formation mit hohem Einschlussvermögen endgelagert werden. In den folgenden Kapiteln wird der Frage nachgegangen, in wieweit diese grundlegende Anforderung — unterlegt durch die beiden o.g. Anforderungen — die Ausweisung eines ewG in Kristallingestein ermöglicht oder für Kristallingestein eine Anpassung des aktuellen ewG-Konzeptes notwendig macht.

2.2 Struktureller Aufbau von Kristallingesteinen

Kristallingesteine sind geologische Einheiten, die aus magmatischen und/oder metamorphen Gesteinen bestehen. Sie sind als ursprünglich sedimentäre oder magmatische Gesteine durch tektonische Prozesse oder durch mächtige überdeckende Gesteinspakete im Laufe der Erdgeschichte durch gebirgsbildende Prozesse entstanden. Die metamorphen Einheiten sind dabei zunächst in tiefere Bereiche der Erdkruste gelangt, dort bei höheren

¹ Im folgenden Text als „Sicherheitsanforderungen“ abgekürzt.

² Kursiv gesetzte Passagen sind den Sicherheitsanforderungen entnommen.

³ Sekundäre Wasserwegsamkeiten werden hier als Wegsamkeiten verstanden, die durch die Auffahrung des Endlagers oder die Einlagerung Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle entstehen. Im Gegensatz dazu stellen hydraulisch wirksame Klüfte natürlichen Ursprungs primäre Wasserwegsamkeiten dar.

Druck- und Temperaturbedingungen metamorph überprägt (z.T. sogar geschmolzen – Migmatisierung und Anatexis) und anschließend im Lauf der Gebirgsbildung wieder in Richtung der Erdoberfläche gehoben worden. Die magmatischen Einheiten sind in der Regel in der Spätphase der Gebirgsbildung in die metamorphen Gesteinskomplexe eingedrungen. Auf Grund ihrer Entwicklung weisen metamorphe Gesteine (häufigster Vertreter: Gneis) häufig eine geregelte und damit anisotrope Struktur auf (Paralleltextur, Bänderung etc.). Magmatische Gesteine (z.B. Granite) haben infolge des Aufstieges der magmatischen Schmelzen dagegen meist eine ungeregelte und massive, eher isotrope Struktur. Auch wenn eine ungeordnete Struktur aus Sicht der geomechanischen Eigenschaften (z.B. Festigkeit) generell vorteilhaft ist, haben viele hochmetamorphe Gesteine auf Grund ihrer Genese ähnlich hohe Festigkeiten wie die magmatischen Gesteine. Die hier beschriebene Entstehungsgeschichte impliziert, dass die im Weiteren diskutierten metamorphen Gesteine unter hohen Druck- und Temperaturbedingungen entstanden sind und somit der Klasse der hochgradig metamorphen (hochmetamorphen) Gesteine zuzuordnen sind. Niedriggradige metamorphe Gesteine haben z.T. deutlich abweichende Eigenschaften. Im Folgenden wird keine Unterscheidung zwischen magmatischen und metamorphen Gesteinen getroffen, sondern zusammenfassend von Kristallingesteinen gesprochen.

Entscheidend für die Bewertung der Kristallingesteine als Wirtsgestein für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle sind besonders deren hydrogeologische Eigenschaften. In metamorphen oder magmatischen Kristallingesteinen spielt die Parendurchlässigkeit nur eine untergeordnete Rolle. Die Grundwasserbewegung findet vor allem auf Klüften statt. Die Kluftbildung erfolgt bei der Abkühlung und Druckentlastung in Folge des Aufstiegs der Gesteine in Bereiche, die für die Endlagerung in Frage kommen sowie bei tektonischen Beanspruchungen der in der Regel sehr alten Kristallingesteine. Das Ausmaß der Kluftbildung ist vor allem von der Gebirgsfestigkeit und von den regionalen tektonischen Bedingungen abhängig. Auf Grund des hohen Alters vieler Kristallingesteine sind die Klüfte allerdings häufig durch migrierende hydrothermale Lösungen oder Grundwässer mineralisiert worden und nicht mehr hydraulisch aktiv. Im Falle der Einlagerung von Wärme entwickelnden Abfällen ist auch eine mechanische Belastung durch den Wärmeeintrag ins Gebirge zu betrachten. Kristalline Gesteine weisen kein Selbstheilungsvermögen auf, so dass sowohl die vorhandenen, hydraulisch aktiven Klüfte als auch die bei der Auffahrung entstehenden Auflockerungszonen nur mit technischen Maßnahmen hydraulisch unwirksam gemacht werden können.

Auch wenn Kristallin auf Grund seiner sehr guten Festigkeitseigenschaften ein Endlagerbergwerk in großen Tiefen erlaubt, wird davon ausgegangen, dass ein Endlager deutlich unterhalb von 1.000 m unter der Geländeoberfläche auf Grund der dort herrschenden natürlichen Temperaturen nur mit sehr hohem Aufwand (z.B. massiv gekühlte Bewetterung) sicher betrieben werden kann. Laut KlimaBergV § 4 dürfen bei Effektivtemperaturen von mehr als 30°C außerhalb des Salzbergbaus Personen nicht beschäftigt werden. Für einige spezielle Sonderfälle dürfen Personen bis zu einer Effektivtemperatur von 32°C beschäftigt werden. Legt man einen geothermischen Gradienten von 3 K pro 100 m zugrunde, wären nach heute geltendem Gesetz Endlager deutlich unterhalb von 1.000 m unter der Geländeoberfläche kaum zu betreiben.

Neben den arbeitssicherheitlichen Aspekten ist zu berücksichtigen, dass aufgrund der hohen Gebirgstemperatur in großen Tiefen möglicherweise die für die Endlagerung Wärme entwickelnder Abfälle zur Verfügung stehende Temperaturdifferenz nur noch klein ist und sich damit der Flächenbedarf des Endlagers bzw. die Kühlzeiten der Abfälle signifikant vergrößern.

2.3 Sicherer Einschluss

2.3.1 Der einschlusswirksame Gebirgsbereich (ewG)

Der ewG ist gemäß den aktuellen Sicherheitsanforderungen definiert als

der Teil des Endlagersystems, der im Zusammenwirken mit den technischen Verschlüssen (Schachtverschlüsse, Kammerabschlussbauwerke, Dammbauwerke, Versatz, ...) den Einschluss der Abfälle sicherstellt.

Damit unterscheidet sich diese Definition von der im Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd) entwickelten Definition. Dort wird der ewG definiert als

der Teil der geologischen Barrieren, der bei normaler Entwicklung des Endlagers für den Isolationszeitraum – im Zusammenwirken mit technischen und geotechnischen Barrieren – den Einschluss der Abfälle sicherstellen muss (AkEnd 2002).

Obwohl die Sicherheitsanforderungen auf die Nennung der ‚geologischen Barriere‘ verzichten, ist der ewG eindeutig kein technisches Gebilde, sondern ein ‚Gebirgsbereich‘. Die Sicherheitsanforderungen gehen von einem Endlagerkonzept aus, bei dem die radioaktiven Abfälle in einer tiefen geologischen Formation mit hohem Einschlussvermögen endgelagert werden. Es kann somit unterstellt werden, dass der Autor der Sicherheitsanforderungen den Einschluss der Radionuklide am Ort der Einlagerung maßgeblich durch die Einschlusswirksamkeit des ewG realisiert wissen wollte, und dass ein Endlagerkonzept, bei dem der Einschluss der Radionuklide ausschließlich auf der Wirksamkeit von technischen Barrieren beruht, nicht in der Intention des Verordnungsgebers lag. Gemäß Sicherheitsanforderungen wäre somit die Ausweisung eines ewG ohne Einschlusswirksamkeit oder mit der Ausdehnung Null unzulässig.

Bei der räumlichen Ausweisung des ewG wird unterstellt, dass die Sicherheitsanforderungen dem Antragsteller eine möglichst große Flexibilität einräumen wollen, d.h. unter anderem, dass es innerhalb der Wirtsgesteinsformation mehrere voneinander getrennte ewG-Bereiche geben kann und keine unmittelbare Vorgabe für die Ausdehnung des ewG gibt, solange nicht fundamentale Sicherheitsprinzipien verletzt werden. So ist z.B. eine Ausweisung eines ewG bis an die Erdoberfläche voraussichtlich nicht mit den in den Sicherheitsanforderungen dargelegten Sicherheitsprinzipien in Einklang zu bringen. In den Sicherheitsanforderungen heißt es im Sicherheitsprinzip 4.1: *Die radioaktiven und sonstigen Schadstoffe in den Abfällen müssen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich konzentriert und eingeschlossen und damit möglichst lange von der Biosphäre ferngehalten werden.*

Bei der zeitlichen Ausweisung werden die Sicherheitsanforderungen so ausgelegt, dass der ausgewiesene ewG für den gesamten Nachweiszeitraum von einer Million Jahre erhalten bleiben muss.

2.3.1.1 Mögliche Formen eines ewG

Der AkEnd hat in seinem Abschlussbericht verschiedene Konfigurationen definiert, die im Folgenden wiedergegeben werden, um die Diskussion zur Ausweisung eines ewG für Kristallingestein zu veranschaulichen. Gemäß AkEnd (2002) lassen sich hinsichtlich ihrer Anordnung innerhalb der geologischen Barriere zwei konfigurative Haupttypen ableiten (siehe Abb. 2.1):

Typ A: Das Wirtsgestein ist hinsichtlich seiner Barrierewirksamkeit sicherheitsrelevanter Bestandteil des ewG.

In diesem Fall sind Wirtsgestein und ewG Teil ein und desselben Gesteinskörpers (bzw. mehrerer Gesteinskörper mit übereinstimmenden barrierewirksamen Eigenschaften). Dieser Gesteinskörper muss in erster Linie die funktionalen Eigenschaften des ewG aufweisen, aber auch die Errichtung eines Endlagerbergwerks erlauben.

Typ B: Das Wirtsgestein ist hinsichtlich seiner Barrierewirksamkeit kein sicherheitsrelevanter Bestandteil des ewG.

Bei Wirtsgestein und ewG handelt es sich um verschiedene Gesteinskörper mit unterschiedlichen barrierewirksamen Eigenschaften. Der Wirtsgesteinskörper muss vor allem für die Standsicherheit von Endlagerhohlräumen günstige mechanische Eigenschaften aufweisen und gegenüber Auswirkungen der Abfälle unempfindlich sein, während der umgebende ewG günstige barrierewirksame Eigenschaften aufweisen muss, um advektive bedingte Radionuklidausträge in das genutzte Grundwasser zu verhindern. Da an Konfigurationen dieses Typs mindestens zwei Gesteinstypen mit unterschiedlichen Eigenschaften beteiligt sind und entsprechende Konfigurationen auf unterschiedliche Weise aufgebaut sein können, ergibt sich für Typ B eine größere Anzahl grundsätzlich möglicher Konfigurationsvarianten. All diese Varianten können jedoch hinsichtlich des Lagebezugs von Wirtsgesteinskörper und ewG zwei Untertypen der Fallgruppe Typ B zugeordnet werden:

Typ Ba (Abb. 2.1):

Der Wirtsgesteinskörper wird vom ewG vollständig umschlossen.

Typ Bb (Abb. 2.2):

Die Umschließung des Wirtsgesteinskörpers durch den ewG ist unvollständig.

Beide Untertypen können – beispielsweise nach der Art ihrer geologischen Entstehung oder der geometrischen Anordnung der Gesteinskörper im Detail – in weitere Untertypen unterschieden werden. Innerhalb der Fallgruppe Typ Bb lassen sich Untertypen insbesondere

danach unterscheiden, wie weit die Umschließung des Wirtsgesteinskörpers durch den ewG geht bzw. welche Barrierewirksamkeit der ewG innerhalb einer solchen Konfiguration aufweist.

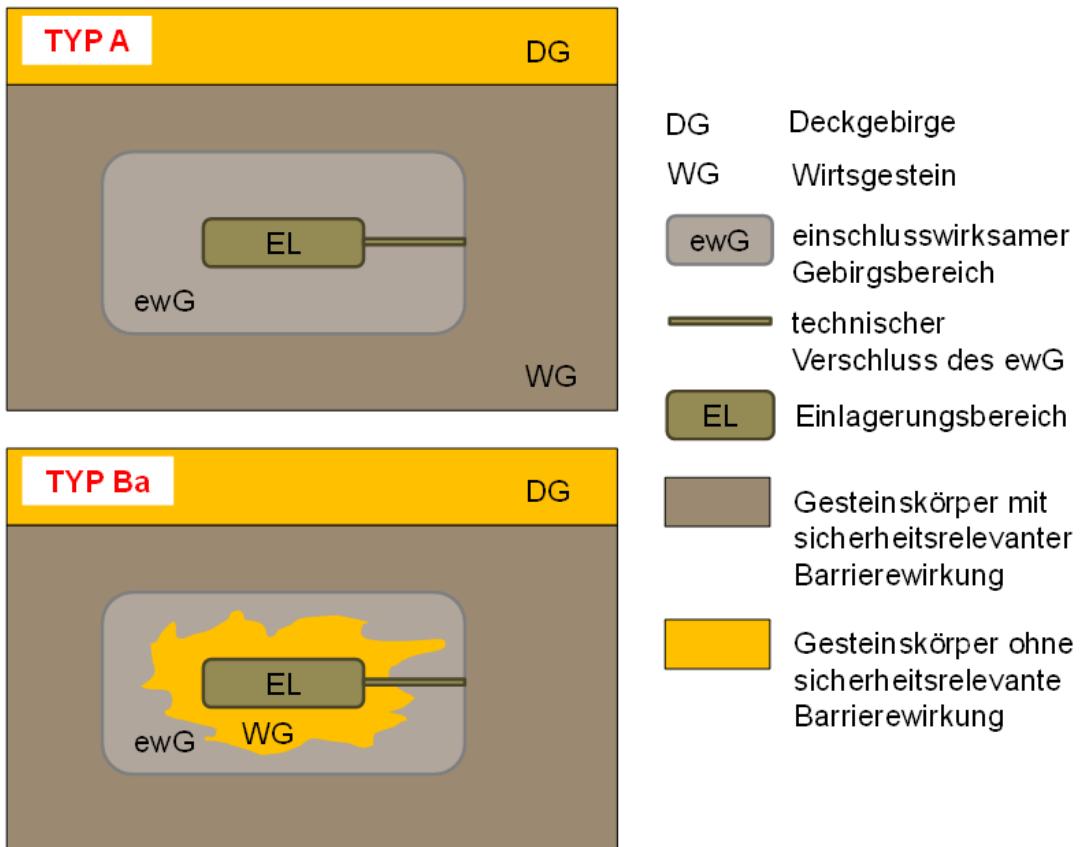


Abb. 2.1: Haupttypen der Konfigurationen zwischen Wirtsgestein und ewG nach AkEnd (2002); schematisch, ohne Maßstab.

Für Typ Bb gibt es mehrere Abbildungen zu möglichen Konfigurationen in AkEnd (2002). Abb. 2.2 zeigt eine für Kristallingestein relevante, mögliche Situation eines über-deckten, nicht im Sinne des ewG-Konzeptes barrierefähigen Wirtsgesteins. Die Schichten des Deckgebirges in Abb. 2.2 zeigen eine nahezu söhlige Lagerung, aus Sicht des Einschlussgedankens könnten aber auch Lagerungsverhältnisse, in denen ein Intrusivkörper zur Aufwölbung der Deckschichten geführt hat, eine interessante Option sein.

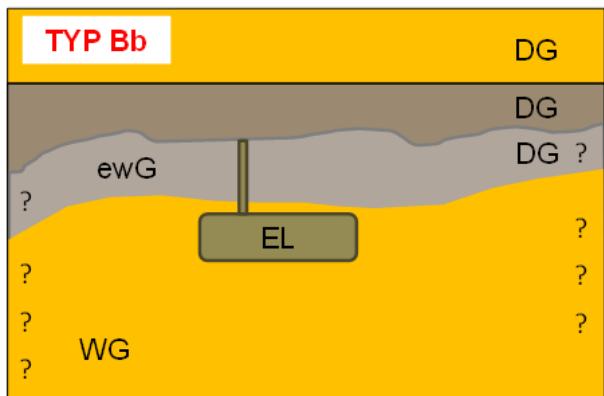


Abb. 2.2:

Konfigurationstyp Bb: Unvollständige Umschließung des Wirtsgesteinskörpers durch den ewG nach AkEnd (2002); schematisch, „?“ bedeutet weitere Ausdehnung unbekannt, Legende siehe Abb. 2.1.

2.3.1.2 Ausweisung eines ewG in Kristallingesteinen

Als Bewertungsgrundlage, inwieweit sich Kristallingesteine mit den derzeit gültigen Sicherheitsanforderungen in Einklang bringen lassen, werden zwei Aspekte herangezogen:

- a) Generelle Zielsetzung der Sicherheitsanforderungen: Ist das betrachtete Wirtsgestein eine geologische Formation mit hohem Einschlussermögen?
- b) Anforderungen an den ewG: Können die beiden allgemeingültigen Anforderungen an den ewG erfüllt werden?

Ungeklüftetes Kristallingestein stellt ein Gestein mit hohem Einschlussermögen dar. Allerdings sind ausgehend von der Entstehungsgeschichte, den bisherigen Bergbauerfahrungen und geologischen Befunden sowie der allgegenwärtigen tektonischen Überprägung von insbesondere alten Kristallingesteinen ungeklüftete Gesteine dieses Typs in der Endlagerteufe in der notwendigen Ausdehnung nicht zu erwarten. Kristallingesteine, die ein mineralisiertes Kluftsystem aufweisen, können vergleichbar gute einschlussermögsame Eigenschaften haben wie ungeklüftetes Gestein. Kristallinbereiche mit mineralisierten Klüften sind auf Grund der Entstehungsgeschichte der Kristallingesteine wahrscheinlicher als ungeklüftete Bereiche.

Für beide Ausprägungen muss im Sinne von *Anforderung 1* über entsprechende Analysen ausgeschlossen werden, dass sich durch die Errichtung des Endlagers und die anschließende Einlagerung Wärme entwickelnder Abfälle neue, hydraulisch aktive und lang aushaltende Klüfte im Wirtsgestein ausbilden oder mineralisierte Klüfte wasserwegsam werden. Die hohe Festigkeit kristalliner Gesteine ist dabei vorteilhaft. Zum Nachweis des Integritätserhalts solcher Bereiche wären Untersuchungen an Gesteinen mit mineralisierten Klüften notwendig, anhand derer sich ggf. quantitative Integritätskriterien ableiten ließen.

Für ein Kristallingestein mit einem nicht mineralisierten transportwirksamen Kluftsystem stellt *Anforderung 2* eine hohe Anforderung dar. Es ist im Regelfall nicht davon auszugehen, dass die Transportgeschwindigkeit im Kluftsystem in der Größenordnung diffusiver Transportgeschwindigkeiten liegt und das Kluftwasser innerhalb eines im Kristallin ausgewiesenen ewG nicht am hydrogeologischen Kreislauf außerhalb des ewG teilnimmt. Beispielsweise zeigen Untersuchungen und Modellrechnungen zum finnischen Endlagerstandort Olkiluoto, dass die hydraulische Leitfähigkeit der Kristallininformation mit zunehmender Teufe abnimmt, es aber nicht auszuschließen ist, dass in Teilbereichen des vorgesehenen Endlagerbergwerks hydraulisch wirksame Kluftnetzwerke existieren. In den Rechenfällen für den Langzeitsicherheitsnachweis wird ein Transportpfad berücksichtigt, der von ausgewählten Bohrlöchern durch die Formation führt und Abstandsgeschwindigkeiten aufweist, die im Bereich von 1 m pro Jahr liegen (POSIVA 2012a).

Ein ewG, dessen Dichtwirkung allein auf den hydraulischen Eigenschaften von geklüftetem Kristallingestein beruht (Typ A, Abb. 2.1), kann aus diesem Grund *Anforderung 2* der Sicherheitsanforderungen voraussichtlich nicht erfüllen. Ein ewG für ein Endlager im geklüfteten Kristallin muss daher einer Konfiguration entsprechen, in welcher der ewG in Gesteinen mit besseren einschlussermögsamen Eigenschaften liegt, so dass *Anforderung 2* erfüllt werden kann. Das Wirtsgestein Kristallin wird dann vollständig oder teilweise von dem einschlus-

wirksamen Gestein umschlossen (Typ B, Abb. 2.1). Ein vollständig vom ewG umschlossenes Wirtsgestein (Typ Ba) ist auf Grund der geologischen Entstehungsgeschichte der Kristallin-gesteine nicht zu erwarten (vgl. Kapitel 2.2.1). Stattdessen müssen Konfigurationen gefunden werden, in denen das kristalline Wirtsgestein teilweise umschlossen ist (Typ Bb).

Für Kristallingestein ist hier vor allem eine Überdeckung des Kristallin mit barrierefirksamen Gesteinsschichten eine denkbare Option (Abb. 2.2), wenn sichergestellt werden kann, dass die als ewG dienende Überdeckung für den gesamten Nachweiszeitraum erhalten bleibt. Erforderlich ist neben einer geringen Durchlässigkeit dieser Überdeckung sowohl eine ausreichende Mächtigkeit als auch eine ausreichende kontinuierliche horizontale Erstreckung. Dies wäre im Zuge einer geowissenschaftlichen Langzeitprognose, die im Rahmen der Entwicklung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes zu erstellen ist, zu analysieren. Für ein Endlager in einer solchen geologischen Konfiguration fehlen in Deutschland ein Sicherheits- und Nachweiskonzept, ein Endlagerkonzept, ein Verfüll- und Verschlusskonzept sowie orientierende generische Sicherheitsanalysen. Zu diskutieren wäre darüber hinaus noch die Frage, ob diese Konfiguration mit der Zielsetzung der Sicherheitsanforderungen unter Nr. 6.1 („...einschlusswirksamen Gebirgsbereichs. Die radioaktiven Abfälle müssen in diesem Gebirgsbereich so eingeschlossen sein, dass sie dort verbleiben...“) in Übereinstimmung zu bringen ist, nach der die Abfälle im ewG eingeschlossen und nicht nur durch den ewG von Grundwasser führenden Schichten getrennt sein sollen.

Es ist auch denkbar, in Kristallingesteinen mehrere ewG-Bereiche (Typ „multipler ewG“) auszuweisen, die auf Grund geringer oder hydraulisch unwirksamer Klüftung im Zusammenspiel mit technischen Barrieren und Maßnahmen die radioaktiven Abfälle einschließen und von hydraulisch wirksamen Zonen trennen (Abb. 2.3).

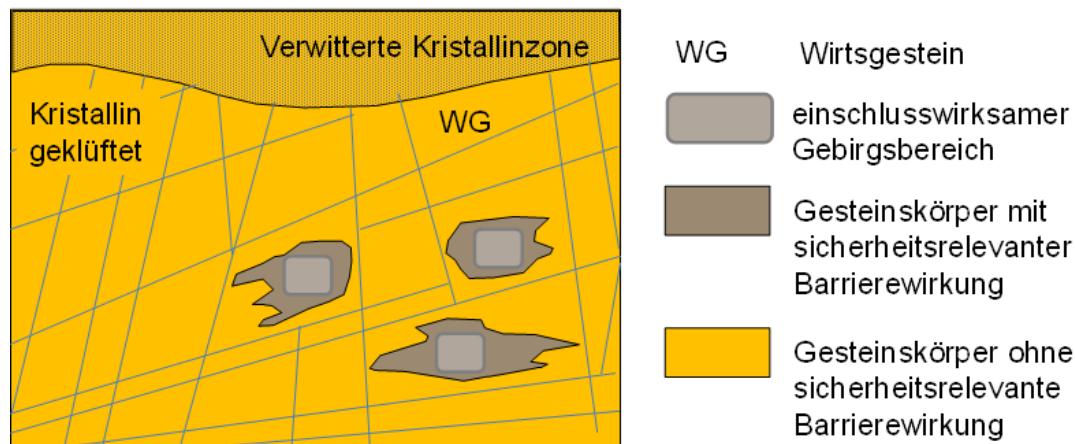


Abb. 2.3: Aufteilung eines ewG auf geeignete Teilbereiche („multipler ewG“) im Kristallin ohne Berücksichtigung von bergtechnischen Zugängen. — schematisch, ohne Maßstab.

Ein technischer Verschluss, z.B. durch verschiedene Verschluszbauwerke und diverse Injektionsmaßnahmen, von Teillbereichen in einem geklüfteten Kristallingestein ist technisch durchführbar, allerdings mit hohen Anforderungen für die Nachweisführung. Je nach dem Grad des Einschlussvermögens und dem Anteil der notwendigen technischen Maßnahmen bleibt bei diesem Konzept zu prüfen, ob es mit der grundlegenden Anforderung an eine tiefe

geologische Formation mit hohem Einschlusssvermögen in Einklang zu bringen ist und ob hierfür Sicherheitsnachweise geführt werden können.

Tab. 2.1 fasst die Darlegungen zu möglichen Konfigurationen eines ewG im Kristallin zusammen.

Tab. 2.1: Varianten zur Ausweisung eines ewG im Kristallin

Konfigurations-typ	Geologie Wirtsgestein	Vorkommen	erfüllt Zielsetzung der Sicherheitsanforderungen	erfüllt Anforderungen an ewG
TYP A	ungeklüftet	unwahrscheinlich	ja	standortspezifisch
TYP A	hydraulisch unwirksame Klüfte	wenig wahrscheinlich	ja	standortspezifisch
TYP A	gekläftet	wahrscheinlich	nein	nein
TYP Ba	nicht existent			
TYP Bb	gekläftet	wahrscheinlich	zu prüfen	ja
Multipler ewG	siehe Abb. 4.1	zu prüfen	zu prüfen	ja

2.3.2 Der einschlusswirksame Bereich (ewB)

Eine denkbare Alternative zur Ausweisung eines der im vorigen Unterkapitel genannten ewG-Typen wäre die Ausweisung eines einschlusswirksamen Bereiches (ewB) anstelle eines einschlusswirksamen Gebirgsbereiches (ewG). Dieser Gedanke wurde seitens der Entsorgungskommission (ESK) in dem Diskussionspapier „Evaluation der Rand- und Rahmenbedingungen, Bewertungsgrundsätze sowie der Kriterien des Arbeitskreises Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd)“ erläutert (ESK 2015).

Bei dem Konzept des einschlusswirksamen Bereiches (ewB) wird davon ausgegangen, dass der sichere Einschluss allein durch technische Barrieren gewährleistet werden kann. Analog zu den Anforderungen des AkEnd und denen der Sicherheitsanforderungen wäre für diesen ewB die Integrität, d.h. der Erhalt der einschlusswirksamen Eigenschaften, über den Nachweiszeitraum analog zum ewG nachzuweisen.

Im Zusammenhang mit dem KBS-3-Konzept könnte der ewB durch den Behälter allein oder gemeinsam mit dem Buffer, der jeden einzelnen Behälter umgibt, dargestellt werden. Rein geometrisch gesehen wäre letzteres im Prinzip eine Extremform des im vorigen Unterkapitel beschriebenen multiplen ewG, nur dass kein Kredit von einer möglichen Barrierefürsamenit des Gebirges genommen wird. Ein Problem in diesem Zusammenhang ist die notwendige Mächtigkeit der einzelnen Buffer. Die äußere Grenze jedes einzelnen Buffers wäre dann die räumliche Nachweisgrenze, an der die Geringfügigkeit der Freisetzung gemäß dem vereinfachten Nachweis gezeigt werden muss. Abschätzungen zum diffusiven Transport von Radionukliden (vgl. Kapitel 2.5.2) deuten darauf hin, dass bei einem Nachweiszeitraum von 1 Million Jahren die notwendige Mächtigkeit des Buffers signifikant größer sein müsste als im KBS-3-Konzept. Dabei stellt sich zum einen die Frage der Sinnfälligkeit solch ausgedehnter Buffer und zum anderen erscheint die Herstellbarkeit derartig ausgedehnter Buffer kaum nachweisbar zu sein.

Bei der großen Anzahl der einzulagernden Behälter (ca. 15.000, DBETEC (2016)) und damit der notwendigen Einlagerungslöcher und Buffer ist auch noch ein anderes Problem zu berücksichtigen. Es ist nicht auszuschließen, dass eine geringe Anzahl der Buffer während des Nachweiszeitraumes aufgrund von Implementierungsdefiziten frühzeitig ausfällt, so dass diese ihre Funktion nicht mehr wahrnehmen können. Entsprechend dem aktuellen Stand der Technik bei großtechnischen Fertigungsprozessen und in Anlehnung an Untersuchungen in Endlagerprojekten anderer Länder im Zusammenhang mit der Fertigung von Endlagerbehältern (Ebert & Müller-Hoeppel 2009, SKB 2003, 2006) wird angenommen, dass maximal 0,1 % der implementierten Buffer (ca. 15 Buffer) von Beginn an unerkannte maßgebliche Installationsfehler aufweisen, die zu einem vorzeitigen Versagen führen können. Das bedeutet, dass bei etwa 10 ewB der Nachweis der Geringfügigkeit der Freisetzung am Rand der ewB nicht allein aufgrund des Rückhaltevermögens des Buffers geführt werden kann, sondern weitere Barrieren notwendig wären. Insgesamt sollte das Zusammenspiel zwischen Behälter und Buffer und dem Ausfall einer oder beider Barrieren mit Blick auf die Eintrittswahrscheinlichkeit durch Prozessanalysen geklärt werden.

Eine solche Barriere könnte der Behälter sein, dessen Standfestigkeit allerdings nur für den derzeit im KBS-3 Konzept verankerten Nachweiszeitraum von 100.000 Jahren und nicht für die gemäß Sicherheitsanforderungen festgesetzten 1 Million Jahre bewertet wurde.

Darüber hinaus müsste jeder einzelne ewB, sofern dies nicht nur der Behälter ist, mit einem Verschluss für seinen Zugang versehen werden, für den die gleichen Aussagen hinsichtlich der Installationsfehler gelten wie für den Buffer.

Aus den vorgenannten Gründen wird das ewB-Konzept im Folgenden nicht weiter betrachtet.

2.4 Integrität von Kristallingesteinen

In den Sicherheitsanforderungen ist die Ausweisung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereiches streng mit der Prüfung seiner „Integrität“ verknüpft. Der Begriff Integrität ist in den Sicherheitsanforderungen wie folgt definiert:

Der Begriff „Integrität“ beschreibt den Erhalt der Eigenschaften des Einschlussermögens des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs eines Endlagers.

Für die wahrscheinlichen Entwicklungen ist für den einschlusswirksamen Gebirgsbereich auf der Grundlage einer geowissenschaftlichen Langzeitprognose nachzuweisen, dass die Integrität dieses Gebirgsbereichs über den Nachweiszeitraum von einer Million Jahre sichergestellt ist. Die bisher gültigen Kriterien und die sich daraus ableitenden Möglichkeiten zum Nachweis werden in den folgenden Kapiteln beschrieben.

2.4.1 Integritätskriterien

Zur Prüfung der Integrität ist laut den Sicherheitsanforderungen (Kapitel 7.2.1) zum einen zu zeigen, dass die Anforderungen 1 und 2 (vgl. Kapitel 2) erfüllt sind. Zum anderen ist bei Salinar- und Tongesteinen die Integrität zusätzlich anhand folgender Kriterien zu prüfen:

- *Die zu erwartenden Beanspruchungen dürfen die Dilatanzfestigkeiten der Gesteinsformationen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs außerhalb der Auflockerungszonen nicht überschreiten* (Dilatanz-Kriterium).
- *Die zu erwartenden Fließdrücke dürfen die Fließdruckbelastbarkeiten der Gesteinsformationen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht in einer Weise überschreiten, die zu einem erhöhten Zutritt von Grundwässern in diesen einschlusswirksamen Gebirgsbereich führt* (Fließdruck-Kriterium).
- *Durch die Temperaturentwicklung darf die Barrierewirkung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht unzulässig beeinflusst werden* (Temperatur-Kriterium).

Die ersten beiden Kriterien zielen, ähnlich wie die Anforderung 1, auf die mechanische Unversehrtheit und die hydraulische Dichtheit ab und geben konkrete Hinweise, zumindest qualitativ, wie die Integrität zu prüfen ist. In beiden Fällen wird von Gesteinsfestigkeiten ausgegangen, die durch Druck- oder Zugbelastungen ggf. überschritten werden, wodurch die Eigenschaften des ewG durch Erzeugung von Wegsamkeiten beeinträchtigen werden könnten.

Im Falle von kristallinen Gesteinen kann im Allgemeinen davon ausgegangen werden, dass die Gesteinsfestigkeiten ausreichend hoch sind, so dass die Bildung von Wegsamkeiten bei einer geeigneten Endlagerplanung vermieden werden kann. Im Falle vorhandener Kluftstrukturen kann das nicht so ohne weiteres vorausgesetzt werden. Vorhandene offene Klüfte könnten durch Endlagereinfluss entweder weiter geöffnet oder aber auch geschlossen werden. Mineralisierte Klüfte könnten an den Kontaktzonen ggf. Schwächezonen aufweisen, die insgesamt zu einer reduzierten Festigkeit des Gebirges führen könnten. In der Geomechanik wird daher zwischen Gesteins- und Gebirgsfestigkeit unterschieden. Letztere wird in der Regel niedriger angesetzt.

Das dritte Kriterium (Temperatur-Kriterium) zielt einerseits zwar auch über thermisch induzierte Spannungen auf die mechanische Unversehrtheit ab, aber durch Temperaturveränderungen kann es prinzipiell auch zu chemischen/mineralogischen/biologischen Veränderungen im ewG kommen, die die Integrität beeinträchtigen könnten. Für das Temperatur-Kriterium ist eine ganze Reihe von temperaturabhängigen Prozessen relevant, die hinsichtlich ihrer Wirkung innerhalb des ewG zu analysieren bzw. zu prüfen sind.

Gemäß der Formulierung in den Sicherheitsanforderungen wird davon ausgegangen, dass die in Kapitel 2 gegebenen Anforderungen 1 und 2 an den ewG prinzipiell ausreichen, um die Integrität eines ewG gemäß obiger Definition in Kristallingestein zu prüfen. Eine weitere Aufspaltung in spezielle Teilkriterien, wie es für Salinar- und Tongesteine in den Sicherheitsanforderungen angegeben ist, erscheint zwar prinzipiell nicht zwingend notwendig, wäre aber schon aus Gründen einer analogen Behandlung aller Wirtsgesteine im Rahmen von Sicherheits- und Nachweiskonzepten wünschenswert. Dies gilt insbesondere

dann, wenn andere ewG-Typen definiert bzw. angewendet werden, die sich von denen bisheriger Salinar- oder Tonsteinkonzepte unterscheiden. Beispielsweise ist es bei Anwendung des ewG-Typs „multipler ewG“ je nach Lage bzw. Anordnung nicht ausgeschlossen, dass sich einzelne ewG-Komponenten gegenseitig durch ihr THM-Verhalten beeinflussen.

2.4.2 Integritätsnachweis

Gemäß der Diskussion in Kapitel 2.3.1 kommen für Kristallingestein zwei ewG-Typen in Frage:

- Typ „überlagernder ewG“ (Typ Bb) und
- Typ „multipler ewG“

Typ Bb (überlagernder ewG)

Bei diesem Typ ist der ewG ein Teil einer sedimentären Überdeckung des Wirtsgesteins, die aus barrierefirksamen Salz- oder Tongestein bestehen kann. Dieser ewG-Typ wird auch als „überlagernder ewG“ bezeichnet. In diesem Fall muss sichergestellt werden, dass der Teil der Überdeckung, der als ewG ausgewiesen wird, für den gesamten Nachweiszeitraum erhalten bleibt. Dies ist durch eine geowissenschaftliche Langzeitprognose (z.B. keine Ausräumung durch eiszeitliche Rinnenbildung während zukünftiger Kaltzeiten) zu bewerten.

Da es sich bei dem ewG um einen Teil der sedimentären Überdeckung aus Salz- oder Tonstein handelt (Abb. 2.4), der ewG also aus Sedimenten und nicht aus kristallinem Gestein besteht, sind alle oben genannten Kriterien, wie in den Sicherheitsanforderungen für Salz und Tonstein gefordert, prinzipiell anzuwenden. Der Integritätsnachweis wird hier also für Tonstein oder Salz und nicht für geklüftetes kristallines Gestein geführt. In diesem Fall könnten z.B. die in den Projekten ANSICHT⁴ (Ton) und VSG⁵ (Salz) entwickelten Verfahren zum Einsatz kommen.

Beim Typ Bb sinkt der Einfluss, den thermo-mechanische Effekte aus dem Endlager auf den ewG haben, mit zunehmender Distanz „d“ zwischen ewG und Endlager (Abb. 2.4).

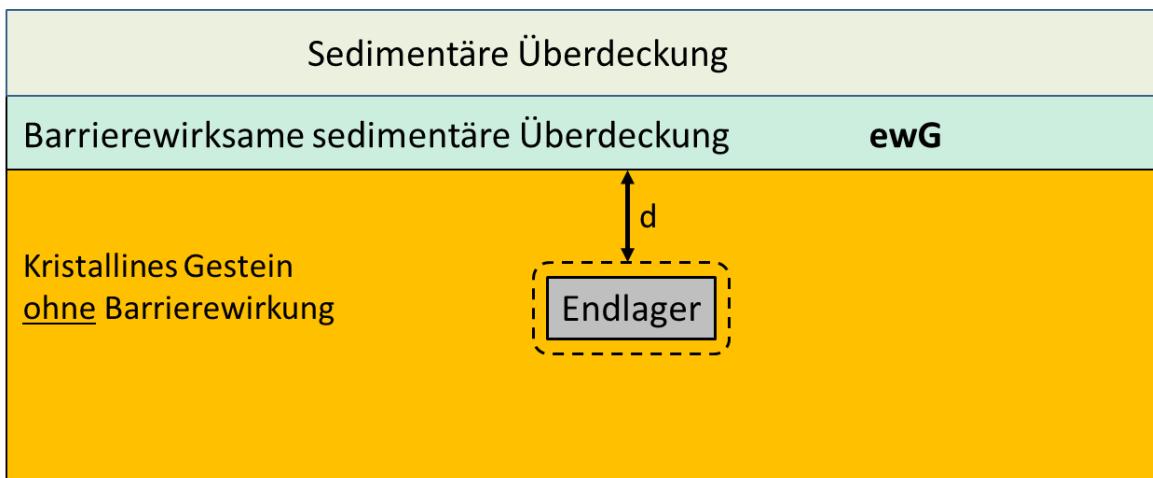


Abb. 2.4: Überlagernder ewG (ewG-Typ Bb).

⁴ ANSICHT: FuE-Vorhaben zur Entwicklung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes in Tonformationen in Deutschland

⁵ VSG: FuE-Vorhaben zur Durchführung einer vorläufigen Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben

Hier wäre durch eine Sensibilitätsstudie zu untersuchen, ob es eine Mindestentfernung (Sicherheitsdistanz) zum ewG gibt, oberhalb derer eine durch das Endlager bedingte Integritätsverletzung nicht zu erwarten ist. Dies könnte, bei Endlager induzierten Prozessen, zu einem „vereinfachten“ Integritätsnachweis auf Basis der geometrischen Konfiguration führen. In diesem Fall ist nur zu zeigen, dass die *Anforderung 2* (vgl. Kapitel 2) erfüllt ist. *Anforderung 1* ist für diese Prozesse dann auch mit abgedeckt.

Ist die Entfernung gering oder grenzt das Endlager direkt an den ewG, so ist der Integritätsnachweis, ohne eventuelle Vereinfachungen, gemäß der obigen Kriterien, ähnlich wie z.B. im Tonstein, zu führen.

Typ „multipler ewG“

Bei dem ewG-Typ „multipler ewG“ bestehen die einzelnen ewG-Komponenten prinzipiell alle aus dem ewG-Typ A (Abb. 2.1). Dieser ewG umschließt also vollständig eine einzelne Endlagerkomponente. In diesem Fall ist aber davon auszugehen, dass der als ewG ausgewiesene Gesteinsbereich aus kristallinem Gestein besteht. Die Wahl von Lage und Größe der einzelnen ewG-Komponenten geschieht dergestalt, dass Gesteinsbereiche ausgewählt werden, die nicht mit hydraulisch wirksamen Klüften durchzogen sind (grüne Bereiche in Abb. 2.5).

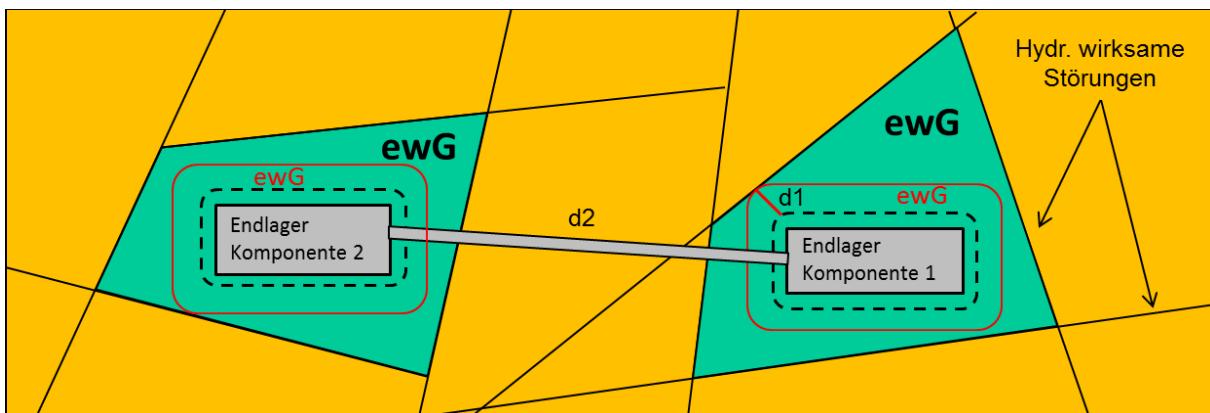


Abb. 2.5: Darstellung zweier benachbarter ewG (ewG-Typ „multipler ewG“).

Solche hydraulisch wirksamen Klüfte definieren die Ränder einzelner Komponenten. Allerdings ist davon auszugehen, dass in den einzelnen Komponenten sich eine mehr oder weniger große Anzahl von mineralisierten Klüften befindet, die unter Umständen potenzielle mechanische Schwächezonen darstellen können. Zur Vereinfachung des Integritätsnachweises für diese ggf. schiefwinkligen Gebilde könnte abdeckend die kürzeste Distanz „d1“ zur nächstgelegenen hydraulisch wirksamen Kluft ermittelt werden. Diese Distanz würde dann die Mächtigkeit eines sich daraus ergebenden „regelmäßigen“ ewG, der eine Endlagerkomponente vollständig umschließt, ergeben.

Bei dem Typ „multipler ewG“ ist es je nach Lage bzw. Anordnung der einzelnen Endlagerkomponenten nicht ausgeschlossen, dass sich einzelne Endlagerkomponenten gegenseitig beeinflussen, d.h. Auswirkungen auf den ewG einer benachbarten Komponente haben. In solchen Fällen wäre beispielsweise zu prüfen, ob es eine Sicherheitsdistanz „d2“ gibt, ober-

halb derer eine gegenseitige Beeinflussung als nicht mehr relevant angesehen werden kann. Ist das der Fall, braucht der Integritätsnachweis ggf. an nur an einer Komponente stellvertretend für alle, unter abdeckenden Annahmen, geführt zu werden. Das heißt, der Integritätsnachweis wäre dann ggf. nur für ein REK (Repräsentative Endlager-Komponente) zu führen. Diese Möglichkeit bleibt zu prüfen.

Zur Anwendung der in den Sicherheitsanforderungen spezifizierten Integritätskriterien lässt sich folgendes festhalten:

Dilatanz-Kriterium

Wenn man davon ausgeht, dass sich eine mehr oder weniger große Anzahl von mineralisierten, also verheilten, Klüften innerhalb eines einzelnen ewG befindet, die unter Umständen potenzielle mechanische Schwächezonen darstellen können, muss der Nachweis der mechanischen Unversehrtheit und damit die Einhaltung des Dilatanz-Kriteriums in kristallinem Gestein auf eine Weise geführt werden, die es ermöglicht, unterschiedlich starke Klüftigkeiten in ihrer reduzierenden Wirkung auf die Festigkeit des Gesteins mit zu berücksichtigen. Dies erscheint unter Verwendung eines entsprechend geeigneten Stoffgesetzes möglich. E. Hoek und E. T. Brown haben in den letzten ca. 15 Jahren ein Stoffgesetz, primär aus praktischen Erfahrungen, entwickelt, welches den Grad der Klüftung in die Berechnungen zum Festigkeitsverhalten eines Hartgestein einbezieht (Hoek & Brown 1997, Hoek et al. 2002, Hoek 2007, Hoek & Marinos 2007). Im Prinzip entspricht dies einem abgeminderten Mohr-Coulomb Stoffgesetz für intaktes Gestein. Nach einer entsprechenden Qualifizierung dieses Stoffgesetzes für Kristallin-Standorte in Deutschland erscheint die Anwendung des Dilatanz-Kriteriums für die einzelnen ewG-Komponenten möglich.

Fluiddruck-Kriterium

Da die Zugfestigkeit des Gesteins durch die Klüftigkeit und mögliche Vorschädigung aus der Belastungshistorie beeinflusst sein kann und im Extremfall, z. B. bei lediglich geschlossenen aber nicht mineralisierten bzw. verheilten Klüften, zu Null werden könnte, ließe sich als Kriterium die effektive Zugspannung selbst auswerten. Die hydraulisch-mechanische Kopplung basiert dabei auf dem Ansatz der effektiven Spannungen, der auf Terzaghi & Fröhlich (1936) zurückgeführt werden kann. Hiernach stehen die totalen (äußereren) Spannungen im Gleichgewicht mit den effektiven Spannungen, die auf das Korngerüst wirken und über den Biot-Koeffizienten mit dem Fluiddruck verknüpft sind.

In Bereichen, in denen zu allen Zeiten die größte effektive Hauptspannung kleiner oder gleich Null ist, gilt das Fluiddruck-Kriterium als erfüllt. Dieser Ansatz über die effektive Zugspannung wird auch im ANSICHT-Projekt erfolgreich verwendet (Jobmann et al. 2016a). Dort geht es zwar nicht um die Behandlung von Klüften, aber auch für bestimmte Tonsteine wurden Zugfestigkeiten nahe Null bestimmt. Durch diesen Spannungsbasierteren Ansatz wird von den Zugfestigkeiten der Tonsteine kein Kredit genommen.

Mit diesem Ansatz erscheint das Fluiddruck-Kriterium auch auf kristalline Gesteine anwendbar zu sein.

Temperatur-Kriterium

Wie bereits oben erwähnt, beinhaltet das Temperatur-Kriterium eine ganze Reihe von temperaturabhängigen Prozessen, die hinsichtlich ihrer Wirkung auf den ewG zu analysieren bzw. zu prüfen sind. Aus einer entsprechenden Analyse sollte ein Kriterium quantifiziert werden. Eine Anwendung des Temperatur-Kriteriums analog zu Salz- und Tongesteinen ist somit gegeben.

In dem Zusammenhang ist zu prüfen, inwieweit thermische Restriktionen für die Auslegung des Endlagers aus der Temperaturverträglichkeit anderer Komponenten des Endlagersystems (z.B. technische und geotechnische Barrieren) resultieren.

2.5 Indikative Modellrechnungen zur Radionuklidmigration

Im Kapitel 2.2 wurden verschiedene denkbare Konstellationen für ein Endlager im Kristallin gestein im Hinblick auf das Konzept des ewG diskutiert. Ziel der in diesem Kapitel dargestellten Untersuchungen ist, diejenigen Möglichkeiten, die dabei betrachtenswert erschienen, anhand von orientierenden Modellrechnungen zur Ausbreitung von Radionukliden hinsichtlich ihrer prinzipiellen Funktionsfähigkeit zu bewerten und zugleich die Anwendbarkeit der bei der GRS vorrangig im Hinblick auf Salz- und Tonformationen entwickelten Berechnungswerkzeuge auf Endlager im Kristallin zu testen. Die Modellrechnungen haben weder repräsentativen noch abdeckenden Charakter und sollen lediglich eine erste generische Einschätzung ermöglichen. Sie basieren auf den Arbeiten, die im Rahmen des Vorhabens Spent Fuel Performance Assessment (SPA, Baudoin et al. 2000) durchgeführt wurden. Die zugrundeliegenden Daten und Modellansätze werden detailliert in Lührmann et al. (2000) beschrieben.

Die möglichen Konstellationen sind in Abb. 2.6 schematisch dargestellt (der vom AkEnd nicht definierte Fall eines verteilten, „multiplen“ ewG wird hier und im Folgenden als Rechenfall TYP M bezeichnet).

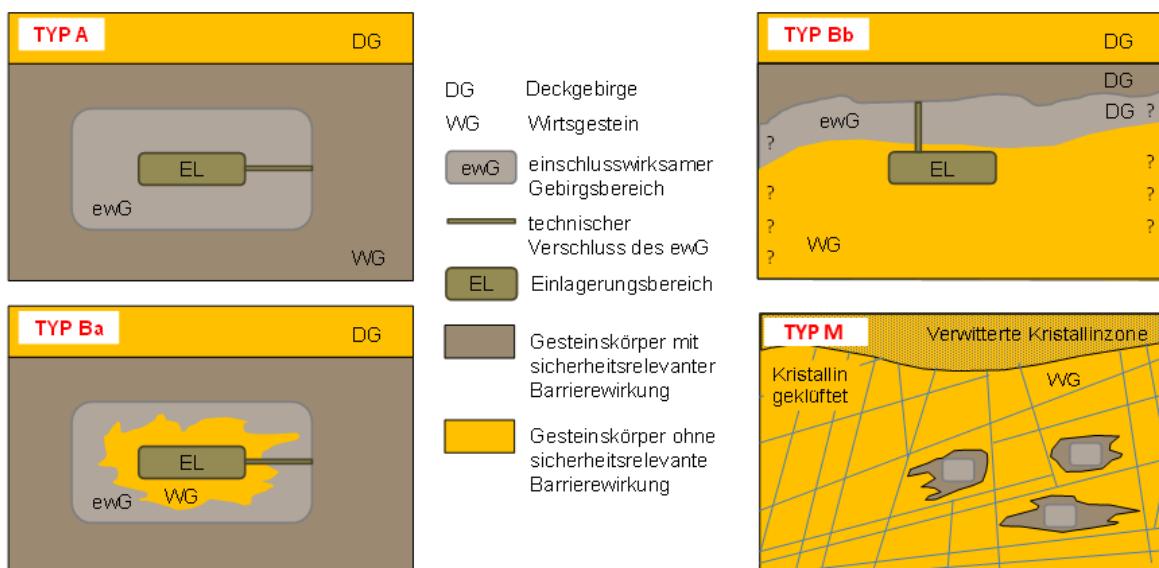


Abb. 2.6: Denkbare Konstellationen von Wirtsgestein und ewG (Typ M noch ohne bergtechnische Zugänge).

Beim Typ A ist der Einlagerungsbereich direkt umschlossen von Kristallingestein. Sollte dieses keine hydraulisch wirksamen Klüfte aufweisen, so wird über die Gesteinsbarriere keine nennenswerte Freisetzung von Radionukliden erfolgen. Inwieweit eine Freisetzung über die abgedichteten Zugänge erfolgt, verbleibt zu prüfen. Eine solche Konfiguration ist aber gemäß Tab. 2.1 nicht zu erwarten. Ist das Gestein jedoch geklüftet, dann ist ein Grundwasserfluss zu erwarten, der einen advektiven Transport von aus den Endlagerbehältern freigesetzten Radionukliden durch das Wirtsgestein in das Deckgebirge verursacht. Diese Situation widerspricht der Anforderung 2 und wurde bereits früher modelliert (Lührmann et al. 2000, Becker et al. 2002). Typ A wird deshalb hier im Weiteren nicht berücksichtigt.

Beim Typ Ba wird davon ausgegangen, dass der Einlagerungsbereich zwar zunächst in einem Gesteinskörper ohne Barriewirksamkeit liegt, dieser aber seinerseits von barriewirksamem Gestein vollständig umschlossen ist. Da eine solche Gegebenheit jedoch aus geologischer Sicht äußerst unwahrscheinlich erscheint, wird sie ebenfalls nicht weiter betrachtet (Tab. 2.1).

Der Typ Bb entspricht aus sicherheitsanalytischer Sicht dem Typ Ba mit dem Unterschied, dass hier der ewG durch eine ausgedehnte abdeckende Schicht gebildet wird. Solche Konstellationen sind möglich und geologisch nachgewiesen. Deshalb wird der Fall hier modelltechnisch betrachtet. Dabei interessiert vor allem die Frage, welche Ausdehnung und Mächtigkeit die abdeckende Schicht haben muss, um die Anforderungen an einen ewG zu erfüllen.

Die Möglichkeit eines aufgeteilten „multiplen“ ewG (Typ M), ist im Zusammenhang mit geklüftetem Kristallingestein von besonderem Interesse, da sich ggf. kleinere kluftfreie und somit barriewirksame Bereiche identifizieren oder technisch herstellen lassen, in denen jeweils begrenzte Einlagerungsbereiche angelegt werden können. Dieser Fall wird ebenfalls durch Modellrechnungen untersucht.

2.5.1 Rechenwerkzeuge

Die Modellrechnungen wurden mithilfe verschiedener Module des bei der GRS entwickelten Pakets RepoTREND (Reiche 2016) durchgeführt. Die folgenden Module kamen dabei zum Einsatz:

- XENIA: Universelle und flexible Benutzeroberfläche mit Datenbankanbindung.
- CLAYPOS: Nahfeldmodul für Radionuklidmobilisierung aus Abfallgebinden und eindimensional-diffusiven Transport durch eine Abfolge von Gesteinsschichten in radialer oder planarer Geometrie.
- GeoTREND: Familie von Fernfeldmodulen für eindimensionalen, adviktiven und diffusiven Radionuklidtransport über einen Transportweg durch verschiedene hydraulisch leitende Gesteinsformationen (Reiche 2014a). Eingesetzt wurde der Code GeoTREND-COFRAME für den Transport durch ein geklüftet-poröses Medium

mit Matrixdiffusion und Berücksichtigung von Kolloiden, wobei die Kolloidkonzentration auf null gesetzt wurde⁶.

- BioTREND: Biosphärenmodul zur Berechnung der radiologischen Konsequenzen einer Radionuklidfreisetzung auf Basis vorgegebener Dosiskonversionsfaktoren (Reiche 2014b).

2.5.2 Rechenfälle

Entsprechend der oben dargestellten Unterscheidung werden zwei Basisrechenfälle für die Typen Bb und M definiert. Davon ausgehend werden durch gezielte Parametervariationen jeweils besonders interessierende Fragestellungen betrachtet. Der Nachweiszeitraum für die Sicherheit eines Endlagers für Wärme entwickelnde Abfälle wurde in den aktuellen Sicherheitsanforderungen auf 10^6 Jahren eingegrenzt, da Aussagen über den geologischen Untergrund über deutlich mehr als 10^6 Jahre nicht belastet werden können. Dennoch ist es gerade für indikative Rechnungen sinnvoll, den Darstellungszeitraum zum besseren Verständnis der Systementwicklung darüber hinaus zu verlängern, da das Verhalten der langlebigen Radionuklide untersucht werden kann. Es ist auch nicht zu erwarten ist, dass sich die Geologie schlagartig nach 10^6 Jahren ändern wird. Alle Rechnungen wurden daher über einen Modellzeitraum von 10^7 Jahren ausgeführt.

Für die hier durchgeföhrten Rechenfälle wurde eine Berechnung der Strahlenexposition nach einem vorgegebenen Transportweg durch das Kristallingestein durchgeführt. Dabei werden auch Prozesse außerhalb des ewG, z.B. Sorption und Verdünnung, berücksichtigt. Es handelt sich nicht um einen vereinfachten Nachweis im Sinne der Sicherheitsanforderungen. Wie die Durchführung eines vereinfachten Nachweises am Rande des ewG vom Typ Bb oder Typ M erfolgen kann, ist noch zu klären. In den Berechnungen wird beispielhaft davon ausgegangen, dass die Barrieren Behälter und Buffer existieren, da diese sicher Komponenten des Endlagersystems sein werden.

2.5.2.1 Fall Bb

Im Basisfall Bb wird zunächst mit CLAYPOS die Freisetzung von Radionukliden aus den Abfällen sowie daran anschließend die radiale Diffusion durch einen Bentonitbuffer gerechnet. Für die hier durchgeföhrte Machbarkeitsstudie wird unterstellt, dass die Behälter alle gleichzeitig nach 1.000 Jahren ausfallen und die Bentonitbuffer über den Modellzeitraum ihre Funktionalität behalten. Die errechneten Ausströme werden an das Fernfeldmodul GeoTREND-COFRAME übergeben, welches den Weitertransport mit dem Grundwasserstrom im geklüfteten Kristallin berechnet. Der für den Fall entscheidende Parameter ist dabei die Länge des Transportwegs, weil dadurch die horizontale Ausdehnung der abdeckenden Tonschicht dargestellt wird. Hierfür werden im Basisfall 2.000 m angenommen; darüber hinaus werden Varianten mit Transportweglängen von 200 m, 10.000 m und als Extremfall 100.000 m betrachtet. In Abb. 2.7 ist der Ausbreitungsweg für den Rechenfall schematisch dargestellt.

⁶ Das Fernfeldmodul GeoTREND-FRAME, welches zur Modellierung des Transports durch ein geklüftet-poröses Medium eigentlich vorgesehen ist, erwies sich aufgrund einer Inkompatibilität mit CLAYPOS als nicht geeignet. Deshalb musste ersatzweise das Modul COFRAME verwendet werden, welches eigentlich für kolloidgetragenen Transport vorgesehen ist.

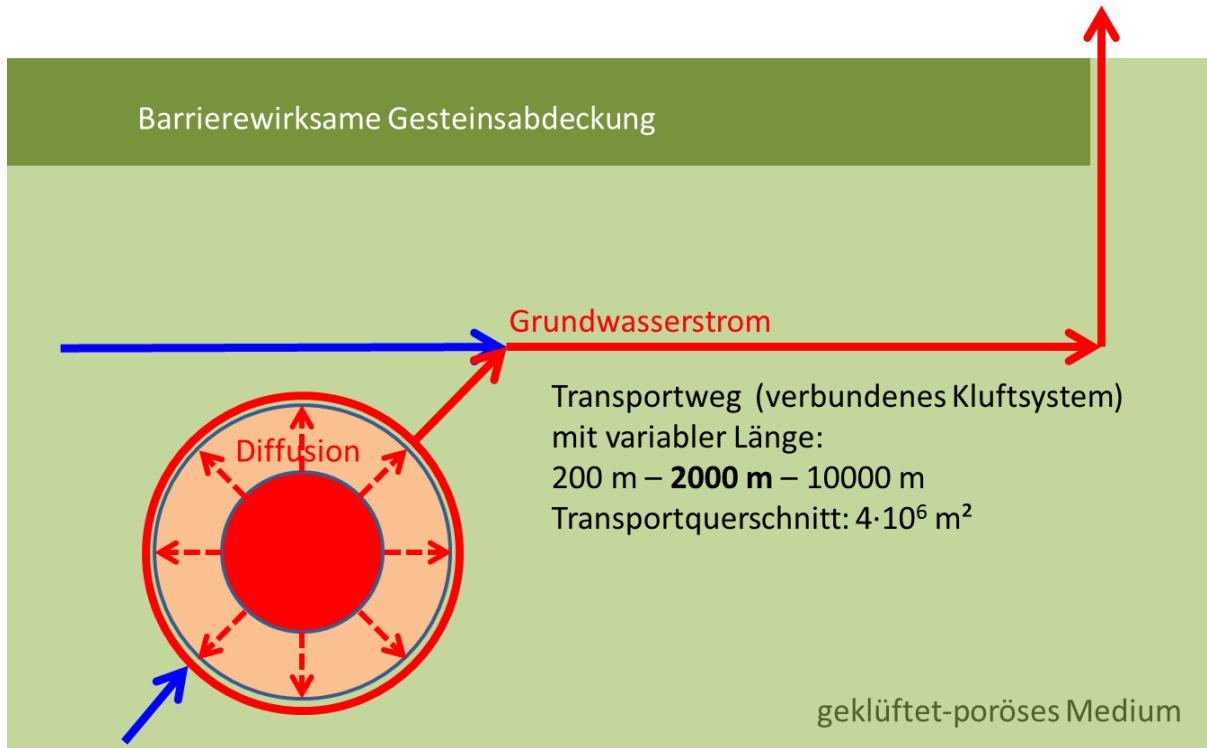


Abb. 2.7: Modellierter Transportweg für den Fall Bb.

Ein Radionuklidtransport durch die überdeckende Tonschicht (ewG) selbst wird nicht modelliert, weil angenommen wird, dass dieser aufgrund der guten und hinreichenden Rückhalteeigenschaften des Tons gegenüber dem Transport in geklüftetem Kristallin in jedem Fall vernachlässigbar wäre. Für das Ziel der Berechnung, einer indikativen Abschätzung der erforderlichen Ausdehnung eines überdeckenden ewG in der Fläche, ist dies auch unerheblich. Abschließend wird mit dem Biosphärenmodul BioTREND für einen am Rand des ewG in die Biosphäre eintretenden kontaminierten Grundwasserstroms eine Individualdosisrate als Bewertungsgröße errechnet.

2.5.2.2 Fall M (multipler ewG)

Für den Basisfall M war ursprünglich vorgesehen, drei identische Nahbereichsteile mit jeweils einem Drittel des Radionuklidinventars zu betrachten und die Radionuklidströme zusammenzuführen (siehe Abb. 2.8). Dies erwies sich jedoch mit dem vorhandenen Instrumentarium ohne Anpassungen als nicht modellierbar, da die Einzelrechnungen unterschiedliche Zeiträste erzeugen und ohne Interpolationsrechnung nicht superponierbar sind. Deshalb wurden für die hier beschriebenen Modellrechnungen ersatzweise nur zwei Nahbereichsteile betrachtet und mit zwei unterschiedlich langen Fernfeldpfaden gekoppelt, die separat gerechnet und betrachtet wurden (Abb. 2.9). In dieser Ersatzkonfiguration repräsentiert die Rechnung mit dem längeren Transportpfad zwei Nahbereichsteile. Dabei wurde an der Annahme festgehalten, dass jeder Nahbereichsteil ein Drittel des Gesamtinventars enthält, da die Ergebnisse dann besser vergleichbar sind, als bei unterschiedlichen Inventaren für beide Transportwege.

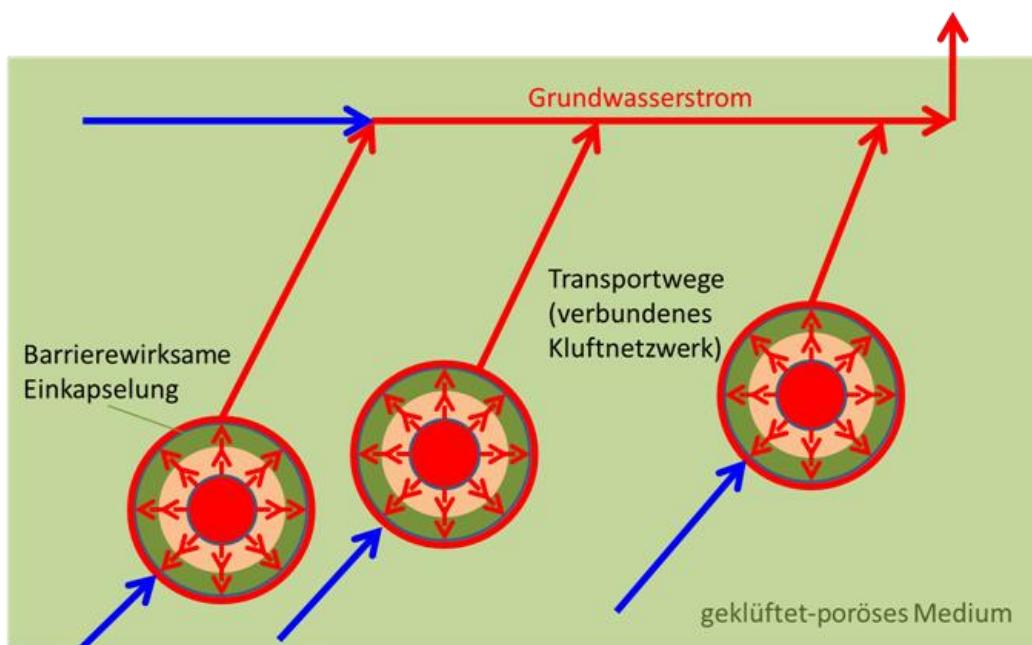


Abb. 2.8: Modellierter Transportweg für den Fall M.

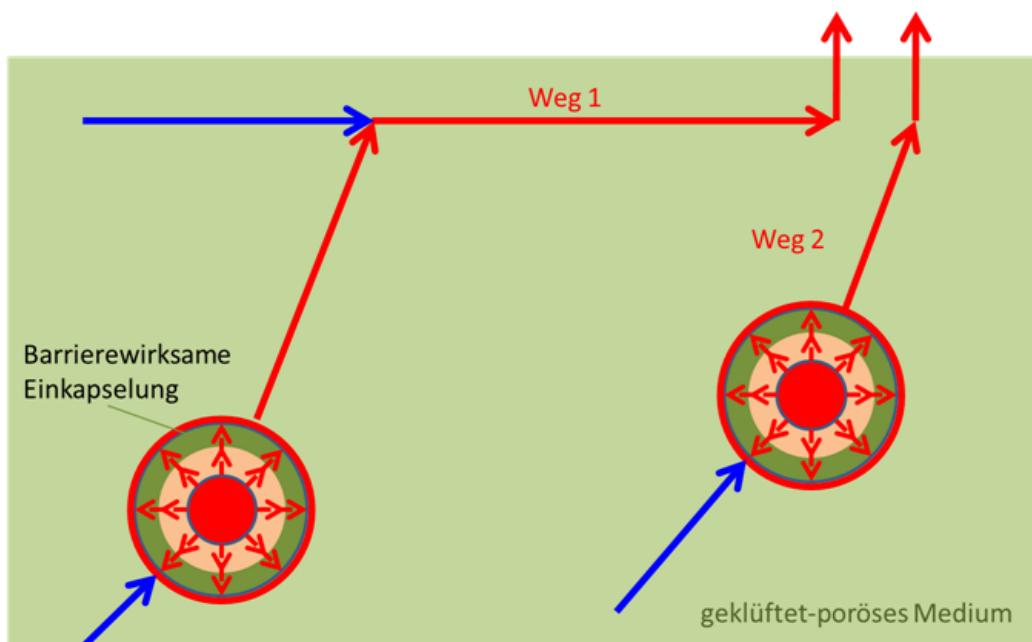


Abb. 2.9: Modelltechnische Ersatzkonstellation für den Fall M.

Im Vergleich zum Nahbereich des Falles Bb wird hier zusätzlich zum Bentonitbuffer eine weitere barrierefürksame, d.h. nur diffusiv zu überwindende Schicht aus Kristallingestein angenommen, deren Stärke im Basisfall 1 m und in einer Variante 0,5 m beträgt. Geotechnische Barrieren zur Abdichtung des Zugangs bleiben hier zunächst unberücksichtigt. Die Diffusion durch beide Schichten wird mit CLAYPOS berechnet, der daran anschließende Transport durch das Fernfeld mit GeoTREND-COFRAME. Als Bewertungsgröße wird wiederum eine Individualdosisrate mit BioTREND berechnet.

Bei den hier dargestellten Rechnungen werden die Verschlüsse der zwangsweise erforderlichen Durchörterung des Kristallingesteins nicht als Wegsamkeiten betrachtet, es wird also unterstellt, dass diese Verschlüsse über den gesamten Betrachtungszeitraum mindestens genau so dicht sind wie das ungestörte Kristallingestein selbst.

2.5.3 Datengrundlage

Da die Rechnungen generischen Charakter haben, müssen die zugrunde zu legenden Daten so zusammengestellt werden, dass sie zwar keine reale, aber eine denkbare, möglichst repräsentative Situation abbilden. Hierzu wird, soweit möglich und sinnvoll, auf die Datenbasis zurückgegriffen, die für die generische Kristallin-Studie SPA (Lührmann et al. 2000) verwendet wurde.

Einige der hier zugrunde gelegten Annahmen, z.B. der Grundwasserstrom im oberflächennahen Grundwasserleiter können an einem konkreten Standort erheblich abweichen und sind nicht als Prognosen für längere Zeiträume zu verstehen. Bezuglich der Abfallzusammensetzung und der Anzahl der Behälter wurde auf Daten aus dem Vorhaben ISIBEL-II (Buhmann et al. 2016) zurückgegriffen. Hierbei handelt es sich nur um das Inventar aus den Brennelementen aus den deutschen SWR/DWR/WWER.

2.5.3.1 Abfalldaten

Es werden ausschließlich abgebrannte Brennelemente berücksichtigt, die in zylindrischen Bohrlöchern eingelagert sind. Die relevanten Abfalldaten sind in Tab. 2.2a zusammengestellt. Für den Fall M wird die Gesamtmenge des Abfalls in drei gleiche Teile aufgeteilt. Obwohl entsprechend der Ersatzkonstellation nach Abb. 2.9 tatsächlich nur zwei Nahbereichsteile betrachtet wurden, wurde aus den oben dargestellten Gründen für jeden davon ein Drittel des Gesamtinventars angenommen.

Tab. 2.2a: Abfalldaten

Art	Daten
Abfalltyp	Abgebrannte Brennelemente
Zusammensetzung	Brennelement-Mix gemäß Tab. 2.2b
Einlagerung	zylindrische Bohrlöcher
Anzahl der Behälter	2077
Behälterlänge	4,7 m
Behälterstandzeit	1.000 a (einheitlich)
Wassergefülltes Porenvolumen je Behälter	3,6 m ³
Zwischenlagerzeit	0
Mobilisierungsraten	
- Metallteile	10 ⁻³ /a
- Gasraum	1/a
- Matrix	10 ⁻⁶ /a
Nuklidspezifische Inventaranteile in den Teilbereichen	gemäß Lührmann et al. (2000)

Tab. 2.2b: Radionuklidinventare je Behälter

Nuklid	DWR-/SWR-/WWER-Brennelemente [Bq pro Behälter]	Nuklid	DWR-/SWR-/WWER-Brennelemente [Bq pro Behälter]
Be-10	$6,89 \cdot 10^{07}$	Th-230	$1,65 \cdot 10^{08}$
C-14	$1,86 \cdot 10^{11}$	Th-232	$1,07 \cdot 10^{05}$
Cl-36	$5,34 \cdot 10^{09}$	Pa-231	$1,45 \cdot 10^{07}$
Ca-41	$2,96 \cdot 10^{08}$	U-232	$1,09 \cdot 10^{10}$
Ni-59	$1,04 \cdot 10^{12}$	U-233	$5,53 \cdot 10^{08}$
Ni-63	$1,01 \cdot 10^{14}$	U-234	$4,19 \cdot 10^{11}$
Se-79	$1,38 \cdot 10^{10}$	U-235	$2,60 \cdot 10^{09}$
Rb-87	$6,23 \cdot 10^{06}$	U-236	$6,46 \cdot 10^{10}$
Sr-90	$5,39 \cdot 10^{15}$	U-238	$5,95 \cdot 10^{10}$
Zr-93	$5,67 \cdot 10^{11}$	Np-237	$1,33 \cdot 10^{11}$
Nb-94	$1,66 \cdot 10^{12}$	Pu-238	$1,29 \cdot 10^{15}$
Mo-93	$2,30 \cdot 10^{10}$	Pu-239	$9,65 \cdot 10^{13}$
Tc-99	$4,23 \cdot 10^{12}$	Pu-240	$2,13 \cdot 10^{14}$
Pd-107	$4,33 \cdot 10^{10}$	Pu-242	$1,29 \cdot 10^{12}$
Ag-108m	$1,96 \cdot 10^{10}$	Pu-244	$1,49 \cdot 10^{08}$
Sn-126	$1,81 \cdot 10^{11}$	Am-241	$1,90 \cdot 10^{15}$
I-129	$8,99 \cdot 10^{09}$	Am-242m	$6,28 \cdot 10^{12}$
Cs-135	$1,48 \cdot 10^{11}$	Am-243	$1,68 \cdot 10^{13}$
Cs-137	$9,04 \cdot 10^{15}$	Cm-245	$7,26 \cdot 10^{11}$
Sm-147	$1,43 \cdot 10^{06}$	Cm-246	$1,19 \cdot 10^{11}$
Sm-151	$7,49 \cdot 10^{13}$	Cm-247	$6,60 \cdot 10^{05}$
Ho-166m	$4,03 \cdot 10^{08}$	Cm-248	$1,70 \cdot 10^{06}$
Ra-226	$1,89 \cdot 10^{06}$	Ac-227	$1,13 \cdot 10^{07}$
Th-229	$2,91 \cdot 10^{06}$	Gesamt	$1,82 \cdot 10^{16}$

2.5.3.2 Nahbereichsdaten

In Tab. 2.3 sind die relevanten Nahbereichsdaten aufgelistet.

Tab. 2.3: Nahbereichsdaten

Art	Daten
Geometrie	radial
Bentonitbuffer je Behälter	
- Stärke	$33,5 \text{ cm}$
- Porosität	38%
- Diffusionskonstante	$5 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$
- elementspezifische Verteilungskoeffizienten (K_d -Werte)	gemäß Lührmann et al. (2000)
- elementspezifische Löslichkeiten	gemäß Lührmann et al. (2000)
Volumenstrom in der Auflockerungszone	$3,9 \text{ m}^3/\text{a}$
Zusätzliche Daten für Fall M	
kluftfreie Kristallingesteinsschicht	
- Stärke	1 m (Variante: $0,5 \text{ m}$)
- effektive Porosität	$0,5 \%$
- Diffusionskonstante	$3 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$

2.5.3.3 Fernfelddaten

Das Fernfeld wird ähnlich wie bei der Studie SPA (Lührmann et al. 2000) modelliert. Für die beiden zu untersuchenden Fälle werden unterschiedliche Annahmen zugrunde gelegt. Gemeinsam sind beiden Fällen die Daten zur Wirtsgesteinsmatrix und den darin vorhandenen

Klüften. Diese sind in Tab. 2.4 aufgelistet. Tab. 2.5 enthält die Daten zu den Transportwegen. Für den Fall M sind dabei die Daten entsprechend der Ersatzkonstellation nach Abb. 2.9 aufgeführt.

Tab. 2.4: Daten zum Wirtsgestein

Art	Daten
Dichte des Wirtsgesteins	2.600 kg/m ³
Eindringtiefe in die Matrix	2 cm
Porosität	0,005
Matrixdiffusion	10 ⁻³ m ² /a
Elementspezifische Verteilungskoeffizienten (K _d -Werte)	gemäß Baudoin et al. (2016)
Klufthäufigkeit	0,01 m/m ²
Kluftöffnungsweite	8·10 ⁻⁴ m
Kluftporosität	1
Sorption an der Kluftoberfläche	0

Tab. 2.5: Daten zum Transportweg durch das Wirtsgestein

Art	Daten
Fall Bb	
Länge des Transportwegs	2.000 m (Varianten: 200 m, 10.000 m, 100.000 m)
Querschnitt des Transportwegs	4·10 ⁶ m ²
Dispersionslänge	50 m (bei den Varianten 20 m, 150 m, 500 m)
Grundwasserstrom	140 m ³ /a
Fall M	
Länge des Transportwegs	1.200 m
Querschnitt des Transportwegs	4·10 ⁵ m ²
Grundwasserfluss ⁷	93,3 m ³ /a
Dispersionslänge	40 m
	Weg 1
	200 m
	4·10 ⁶ m ²
	46,7 m ³ /a
	20 m
	Weg 2

2.5.3.4 Biosphärendaten

An die Fernfeldrechnung wurde jeweils eine Biosphärenrechnung angeschlossen. Die dafür verwendeten Daten sind in Tab. 2.6 aufgeführt.

Tab. 2.6: Daten zur Biosphärenmodellierung

Art	Daten
<i>Sediment im Wasserreservoir</i>	
- Dichte	2.500 kg/m ³
- Porosität	0,2
- Verdünnung	8·10 ⁶ m ³ /a
- Elementspezifische Verteilungskoeffizienten (K _d -Werte)	gemäß Lührmann et al. (2000)
<i>Dosisberechnung</i>	
- Altersgruppe	> 17 a
- Gruppenstärke	10 Personen
- Dosiskonversionsfaktoren	nach Pröhl & Gering (2002)

⁷ Die Werte ergeben sich rein rechnerisch durch Aufteilung des SPA-Wertes von 140 m³/a. Für Weg 1 werden hier entsprechend der angenommenen Dreiteilung des ewG 2/3, für Weg 2 wird 1/3 des gesamten Grundwasserflusses veranschlagt.

2.5.4 Ergebnisse der Modellrechnungen

Im Folgenden werden die wesentlichen Ergebnisse der Modellrechnungen zusammenfassend dargestellt. Die Daten und Modellsätze wurden im Wesentlichen aus SPA entnommen. Für die detaillierte Beschreibung zum prinzipiellen Verhalten der dosisrelevanten Radionuklide wird auf die Beschreibungen in Lührmann et al. (2000) verwiesen.

2.5.4.1 Fall Bb

Der für den Basisfall Bb errechnete Zeitverlauf der jährlichen Dosis ist in Abb. 2.10 dargestellt. Zu frühen Zeiten dominiert das Radionuklid Cl-36, zu mittleren Zeiten I-129 und zu sehr späten Zeiten Cs-135. Der abrupte Rückgang von I-129 nach 1 Million Jahren ist darauf zurückzuführen, dass zu diesem Zeitpunkt die Radionuklide aus der Abfallmatrix vollständig mobilisiert sind und keine weitere Nachlieferung aus dem Abfall mehr erfolgt. Die späte Dominanz von Cs-135 ist durch die Transportverzögerung zu begründen, welche die starke Sorption von Cäsium bewirkt. Die maximale errechnete Dosisrate liegt im Bereich von wenigen $\mu\text{Sv/a}$.

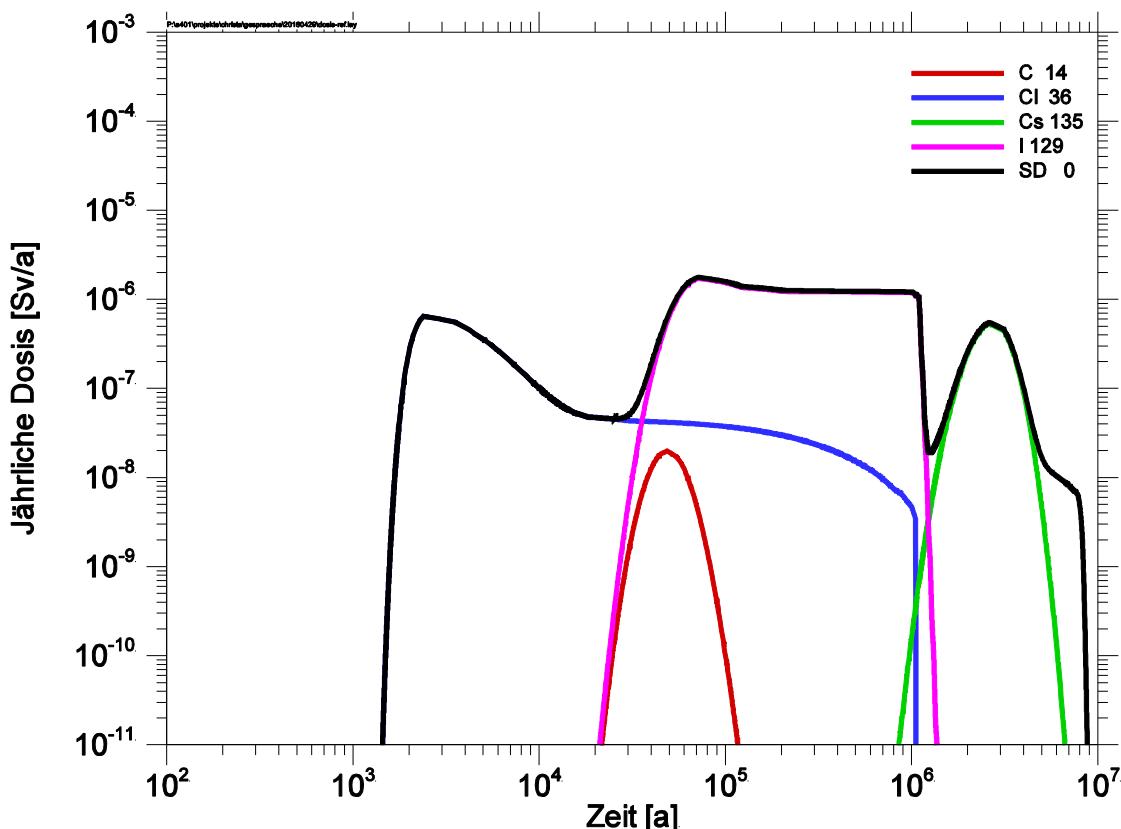


Abb. 2.10: Zeitverlauf der jährlichen Dosis im Basisfall Bb (2.000 m Transportpfad).

Die hier interessante Fragestellung für den Fall Bb liegt darin, wie sich die Länge des Transportpfades auf die Freisetzung von Radionukliden und die jährliche Dosis auswirkt. Dadurch kann abgeschätzt werden, welche räumliche Ausdehnung für die barrierewirksame Abdeckung erforderlich ist. Abb. 2.11 zeigt den Zeitverlauf der jährlichen Dosis für die Variante mit 10.000 m Transportpfadlänge. Der verlängerte Weg bewirkt eine Verzögerung der Freiset-

zung um einige hunderttausend Jahre, ohne jedoch den Maximalwert merklich zu beeinflussen.

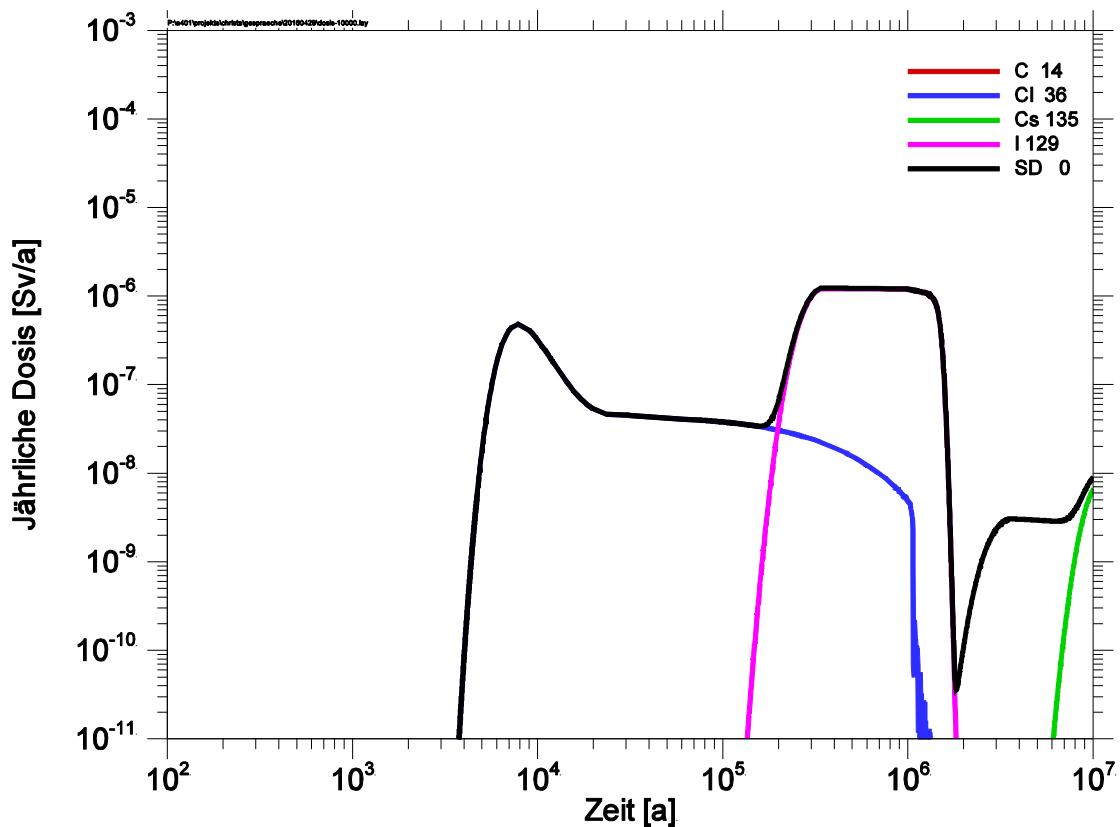


Abb. 2.11: Zeitverlauf der jährlichen Dosis im Fall Bb mit 10 000 m Transportpfadlänge.

Demgegenüber zeigt Abb. 2.12, dass eine Verkürzung des Transportpfades auf 200 m deutliche Auswirkungen hat. Das absolute Maximum fällt hier um eine Größenordnung höher aus als im Basisfall. Das ist in erster Linie auf den Einfluss des relativ kurzlebigen Radionuklids C-14 zurückzuführen, welches in diesem Fall aufgrund der verkürzten Transportzeit noch in dosisrelevanter Menge in die Biosphäre gelangt.

Aus den Ergebnissen lässt sich folgern, dass unter den hier angenommenen Bedingungen eine barrierefürksame Gesteinsabdeckung mit einer Ausdehnung von ca. 2.000 m in alle Richtungen (zusätzlich zur Ausdehnung der Einlagerungsbereiche) notwendig ist, um einem erweiterten ewG-Konzept gemäß Typ Bb gerecht zu werden. Eine flächenmäßig noch größere abdeckende Schicht bewirkt dabei keine grundlegende Verbesserung der Situation.

Rein akademisch stellt sich jedoch die Frage, ob durch eine extreme Ausdehnung der abdeckenden Schicht eine Reduktion des Maximalwertes zu erreichen wäre. Dafür wurde ein – geologisch unrealistischer – Fall mit 100 km Transportpfadlänge gerechnet (siehe Abb. 2.13). Auch in diesem Fall wird, verursacht durch I-129, noch ein Maximum von ca. 1 μ Sv/a erreicht, allerdings nach ca. 3 Millionen Jahren. Um eine merkliche Reduktion dieses Maximalwerts zu erreichen, müsste die Abdeckung noch weit größer sein.

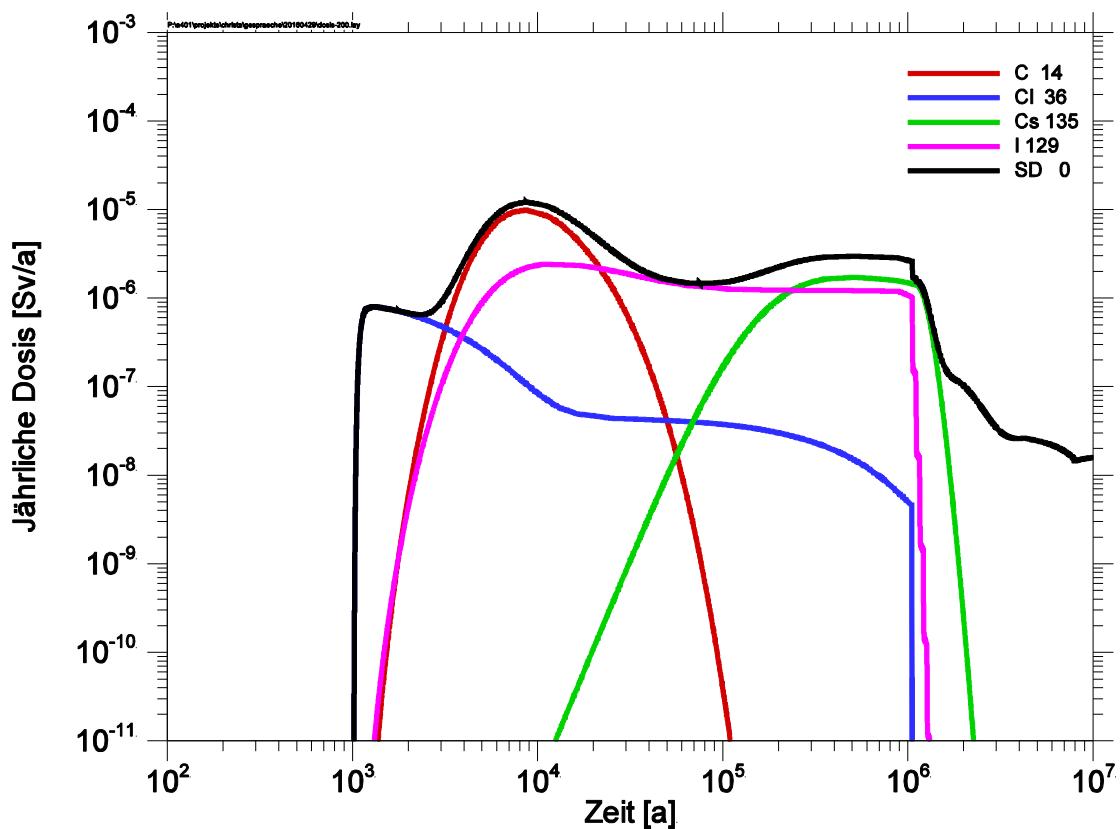


Abb. 2.12: Zeitverlauf der jährlichen Dosis im Fall Bb mit 200 m Transportpfadlänge.

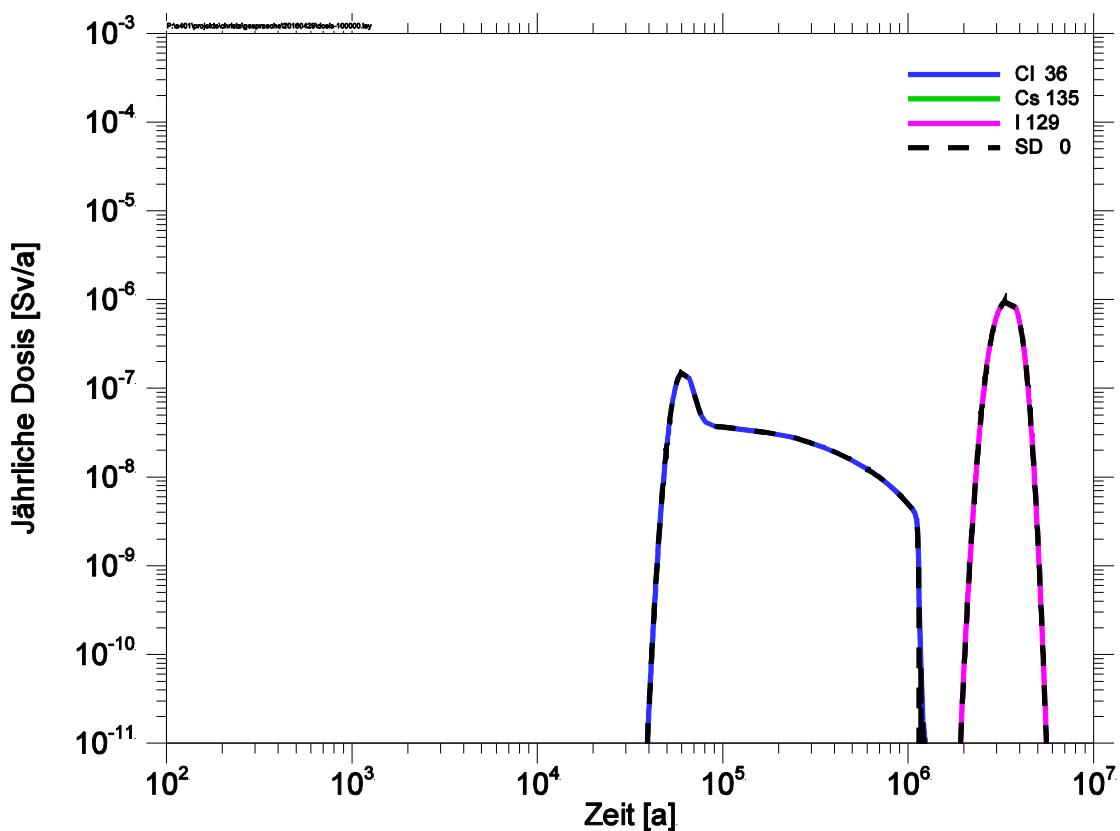


Abb. 2.13: Zeitverlauf der jährlichen Dosis im Fall Bb mit 100 km Transportpfadlänge.

2.5.4.2 Fall M

Für den Fall M werden zwei identische Nahbereichsteile mit jeweils eigenem Transportpfad separat gerechnet. Die Zeitverläufe der jährlichen Dosis sind für den Basisfall mit einer 1 m starken Schicht aus ungekluftetem Kristallingestein in Abb. 2.14 separat für die beiden betrachteten Transportwege dargestellt. Daran ist klar zu erkennen, dass der Transport durch das Deckgebirge bezüglich der jährlichen Dosis nur eine untergeordnete Rolle spielt. Obwohl die Ausbreitungspfade sehr unterschiedlich parametrisiert sind, unterscheiden sich die Zeitverläufe nur geringfügig und die erreichten Maximalwerte praktisch überhaupt nicht. Am deutlichsten fällt der Unterschied beim Radionuklid C-14 aus, da dessen Freisetzung aufgrund der Halbwertszeit empfindlich von der Transportzeit abhängt. Die errechnete maximale jährliche Dosis liegt scheinbar um eine halbe Größenordnung unter derjenigen des Falls Bb, dabei ist allerdings zu beachten, dass jede Kurve nur ein Drittel des Radionuklidinventars repräsentiert. Insgesamt ergibt sich demnach annähernd die gleiche maximale Dosis wie im Basisfall Bb.

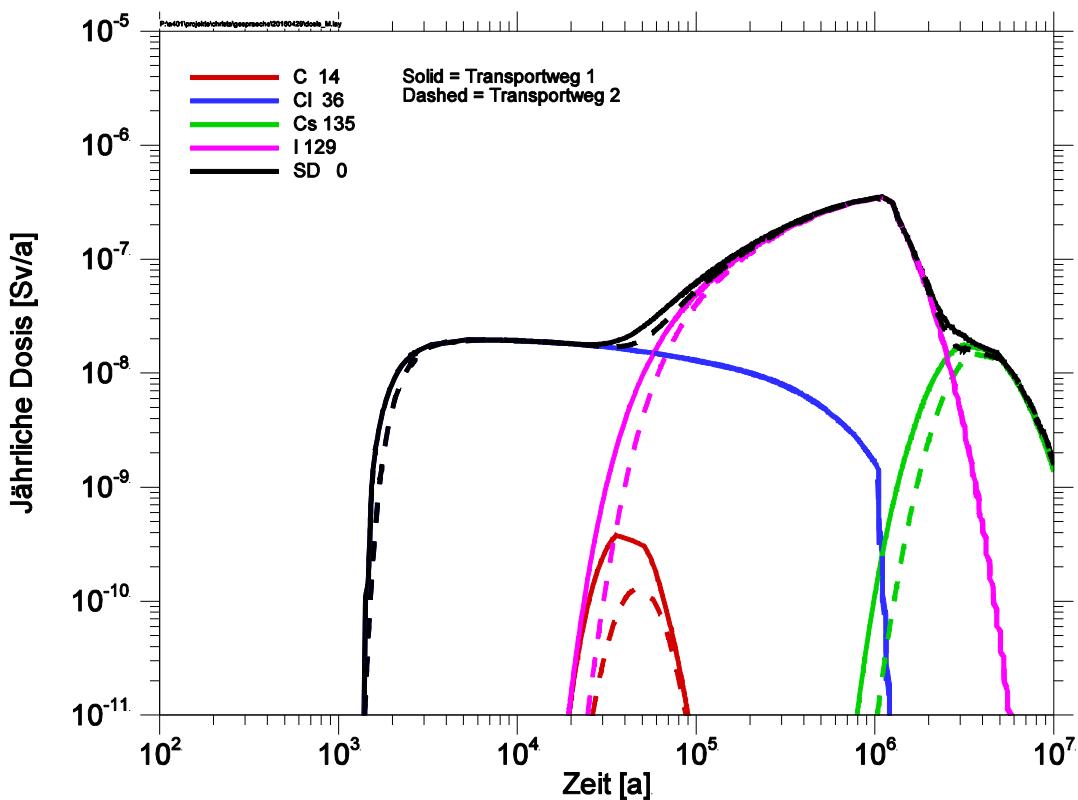


Abb. 2.14: Zeitverlauf der jährlichen Dosis im Basisfall M mit 1 m Kristallinschicht.

Der Einfluss der Mächtigkeit der ungeklufteten Kristallinschicht wird mittels einer Variante mit einer Schichtdicke von nur 0,5 m untersucht, siehe Abb. 2.15. Erwartungsgemäß ist die Barrierewirkung dieser Schicht geringer als im Basisfall, so dass es gegenüber diesem über einen weiten Zeitbereich zu einer erhöhten Freisetzung kommt, allerdings fällt die Erhöhung moderat aus. Das absolute Maximum steigt von 0,33 $\mu\text{Sv/a}$ auf 0,39 $\mu\text{Sv/a}$. Am deutlichsten ist auch hier der Einfluss auf die Freisetzung von C-14.

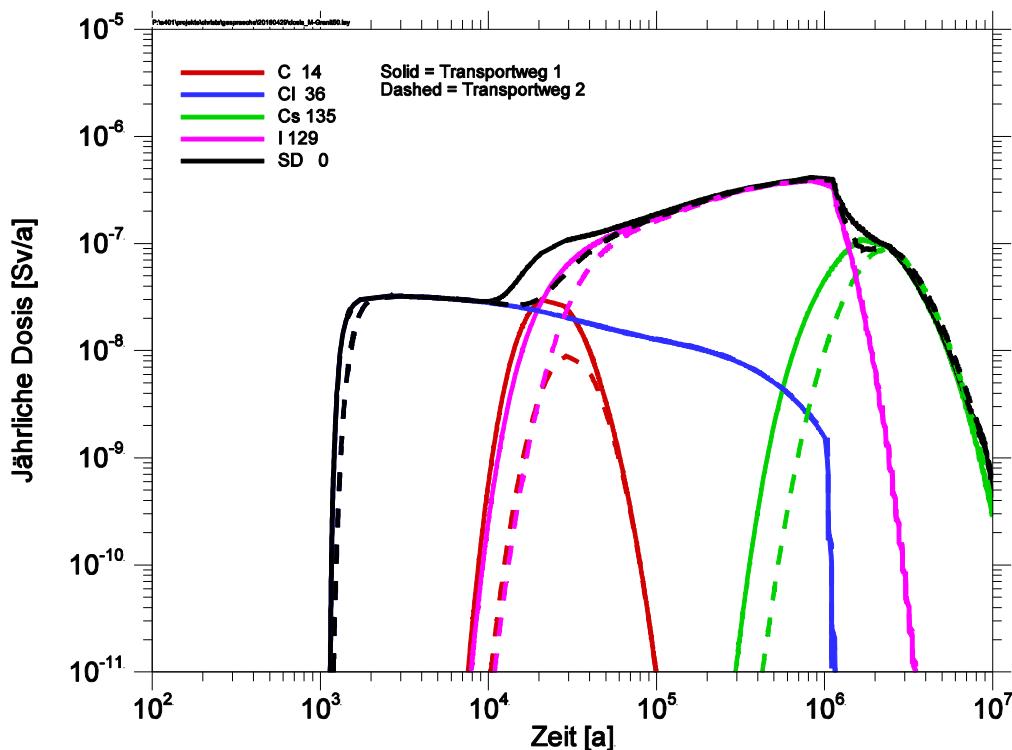


Abb. 2.15: Zeitverlauf der jährlichen Dosis im Basisfall M mit 0,5 m Kristallinschicht.

2.5.5 Schlussfolgerungen

Die vorgestellten Modellrechnungen geben sehr spezifische und teilweise willkürlich festgelegte Situationen wieder. Die zugrunde gelegten Annahmen, z.B. der Grundwasserstrom im oberflächennahen Grundwasserleiter (Verdünnung in Tab 2.6) können an einem konkreten Standort erheblich abweichen. Insofern können keine allgemeingültigen Aussagen daraus abgeleitet werden. Als vorläufiges Fazit ist jedoch festzustellen, dass die Konfigurationen vom Typ Bb und Typ M unter geeigneten Bedingungen funktionieren können.

Im Fall Bb wird die Isolation durch die abdeckende barrierefürksame Gesteinsschicht gewährleistet. Um diese Schicht zu umgehen, müssen die Radionuklide einen sehr langen Weg nehmen, der selbst bei eigentlich geringer Barrierefürksamkeit der wasserführenden Schichten eine so starke Reduktion der Freisetzung relevanter Radionuklide bewirkt, dass von Isolation oder Einschluss gesprochen werden kann. Auf sehr langlebige und geringsorbierende Radionuklide wie I-129 wirkt dies allerdings nur als sehr lange Verzögerung. Eine Ausdehnung der isolierenden Schicht, die so weit reicht, dass auch solche Radionuklide dauerhaft am Übertritt in die Biosphäre gehindert werden, ist nicht realistisch.

Im Fall M stellt das Kristallingestein selbst die barrierefürksame Schicht dar, indem sichergestellt wird, dass dieses jeweils in einem begrenzten Bereich um jede Gruppe von Abfallbehältern frei von hydraulisch wirksamen Klüften ist. Wenn solche barrierefürksamen Schichten existieren, ist die Isolationswirkung schon bei relativ geringen Mächtigkeiten effektiv.

Es ist jedoch festzuhalten, dass in der Realität immer ein Zugang zum Einlagerungsbereich vorhanden sein muss, die barrierewirksame Schicht also zwangsläufig eine Unterbrechung besitzt, die durch technische Maßnahmen zu verschließen ist. Eine potenzielle Wegsamkeit für Radionuklide über die Verschlüsse wurde hier nicht betrachtet, weil die Isolationswirkung der Formation an sich bewertet werden sollte. Da nicht anzunehmen ist, dass die hohe Isolationswirkung kluftfreien Kristallingesteins durch die Verschlussbauwerke erreicht wird, ist davon auszugehen, dass letztere die dominierende Rolle bei der Radionuklidfreisetzung spielen werden. Zu deren Bewertung sind besondere Modellrechnungen erforderlich, die hier nicht durchgeführt wurden.

3 Einlagerungs- und geotechnisches Barrierenkonzept

Im Zusammenhang mit dem oben beschriebenen ewG-Typ Bb wäre die Durchörterung der barrierefürwirksamen sedimentären Überdeckung zu betrachten (vgl. Abb. 2.4). Dieser Typ wird im Folgenden bei der Diskussion um das Einlagerungs- und Barrierenkonzept nicht weiter betrachtet. Zum einen handelt es sich nicht um kristallines Gestein und zum anderen liegen ohne nähere Standortdaten keine Informationen über diese Art der Überdeckung vor. Die Variabilität dieser sedimentären Überdeckung ist in Deutschland sehr groß, so dass die Entwicklung dazu passender Konzepte für ein Verschlussystem zum jetzigen Zeitpunkt nicht sinnvoll erscheint. Zudem wäre nur die vertikale Durchörterung zu betrachten, für die ein Schachtverschlusssystem entwickelt werden müsste. Beispiele für Schachtverschlusskonzepte in sedimentärer Umgebung wurden im Rahmen des FuE-Vorhabens ELSA Phase II bereits entwickelt (Herold et al. 2016). Auf diese Konzepte könnte als Planungsgrundlage zurückgegriffen werden. Wie diese Konzepte im Rahmen eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes zu behandeln sind, wurde im FuE Vorhaben ANSICHT erarbeitet (Jobmann et al. 2016a) und steht somit ebenfalls als Planungsgrundlage zur Verfügung. Hinsichtlich des geotechnischen Barrierenkonzeptes wird daher im Folgenden nur der ewG Typ „multipler ewG“ behandelt.

Im vorigen Kapitel wurde festgestellt, dass bereits mit einer geringmächtigen Schicht ungeklüfteten Kristallins eine hohe Isolationswirkung erreicht werden kann, was die Anwendung des multiplen ewG (bei einem entsprechend angepassten geotechnischen Barrierensystem) möglich erscheinen lässt. Im Folgenden werden grundsätzliche Möglichkeiten für ein Einlagerungs- und Barrierenkonzept diskutiert, die, basierend auf international existierenden Konzepten, und mit Blick auf die Nutzung des multiplen ewG, in Deutschland zur Anwendung kommen könnten. Da im Rahmen dieses Vorhabens geprüft werden sollte, ob das KBS-3 Konzept auf deutsche Verhältnisse übertragbar wäre, wird das KBS-3 Konzept als Basis für das Einlagerungs- und geotechnische Barrierenkonzept gewählt. Unter geotechnischen Barrieren werden nachfolgend die Bauwerke zum Verschluss der auffahrungsbedingten Wegsamkeiten verstanden.

3.1 Behälterkonzept

Als regulatorische Grundlage dienen die für Deutschland gültigen Sicherheitsanforderungen (BMU 2010). Nachstehend sind die Anforderungen aufgeführt, die über die in Schweden und Finnland zu Grunde gelegten Kriterien für das von ihnen entwickelte KBS-3-Konzept (SKB 2010d) hinausgehen:

- Der Nachweiszeitraum beträgt 1 Million Jahre, in Schweden und Finnland lediglich 100.000 Jahre
- Eine Bergung der Behälter muss über einen Zeitraum von 500 Jahren nach Verschluss des Endlagers möglich sein
- Während der Betriebszeit des Endlagers muss eine Rückholung möglich sein

Im Rahmen der Prüfung, ob das KBS-3-Konzept auf deutsche Verhältnisse übertragbar ist, wird zunächst das Behälterkonzept betrachtet. Das Behälterkonzept des schwe-

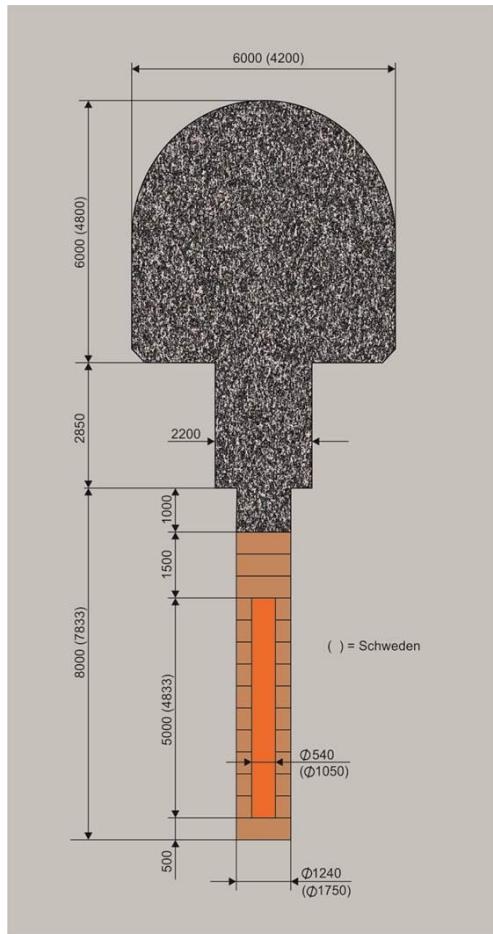
disch/finnischen KBS-3-Konzeptes beinhaltet einen zweischaligen Behälter, der aus einem inneren Stahlbehälter, der die mechanische Stabilität gewährleistet, und einem äußeren Kupferbehälter (Kupfermantel) besteht, der den Korrosionswiderstand sicherstellt (Raiko 2012). Dieser Behälter ist, wie in Abb. 3.1 veranschaulicht, in seiner Geometrie vergleichbar mit der deutschen Brennstabkokille BSK-3 (Filbert et al. 2010).



Das schwedisch/finnischen KBS-3-Konzept sieht darüber hinaus vor, dass der Behälter von einem Buffer, bestehend aus Bentonit, umgeben wird, der zumindest zum mechanischen Schutz des Behälters zur Dämpfung von Gebirgsbewegungen, z.B. bei Versatz entlang von Klüften in Folge von Erdbeben (Fälth et al. 2010), benötigt wird. Als weitere Funktionen minimiert der Bentonitbuffer ein Anströmen des Behälters und soll ein stabiles geochemisches Milieu gewährleisten.

Ein großer Unterschied zu den Konzepten in Finnland und Schweden besteht für Deutschland darin, dass auch MOX-Brennelemente bei der Einlagerung zu berücksichtigen sind, die eine sehr starke Wärmeentwicklung aufweisen. Unterstellt man analog zum schwedisch/finnischen Konzept eine Grenztemperatur von 100°C an der Behälteroberfläche, ist eine Einlagerung ganzer MOX-Brennelemente aufgrund ihrer hohen Wärmeleistung definitiv nicht möglich. Für eine Anwendung in Deutschland muss daher das schwedisch/finnische Behälterkonzept modifiziert werden. Wie eine solche Modifizierung aussehen könnte, ist in DBETEC (2016) beschrieben. Bei dem Behälter handelt es sich um eine kupferummantelte "BSK-3"-Kokille (BSK-Cu genannt), die alternativ mit CSD-B, CSD-C und CSD-V Kokillen beladen wird bzw. mit den gezogenen Brennstäben (WWER-BE und DWR-BE), wobei diese

Brennstäbe mit den MOX-Abfällen in so einem Verhältnis gemischt werden, dass zulässige Temperaturen nicht überschritten werden.



In diesem Konzept findet die Einlagerung in vertikalen Kurzbohrlöchern statt. In Abb. 3.2 ist ein solches beladenes Einlagerungsbohrloch zusammen mit dem Querschnitt einer Beschickungsstrecke angegeben. Die Abmessungen aus dem schwedisch/finnischen Konzept sind zum Vergleich in Klammern mit angegeben. Die Unterschiede in den Abmessungen resultieren sowohl aus den Abmessungen der BSK-Cu als auch aus Nutzung der in Deutschland erprobten und zulassungsfähigen Einlagerungstechnik für die BSK-3 (Filbert et al. 2010). Die Abmessungen des Buffers wurden identisch mit dem schwedisch/finnischen Konzept gewählt, da die Herstellung der Bentonitringe und ihr Einbau dort bereits erprobt wurden sowie Angaben zu Einbautoleranzen vorhanden sind. Der Ringspalt zwischen den Bentonitringen und dem umgebenden Kristallingestein, der u.a. zum Ausgleich der Einbautoleranzen dient, wird mit Bentonitpuder aufgefüllt.

Abb. 3.2:
Einlagerungsschema von Endlagergebinden in vertikalen Kurzbohrlöchern (DBETEC 2016).

Im Hinblick auf die Übertragbarkeit auf deutsche Verhältnisse wird unterstellt, dass sich analog zum schwedisch/finnischen Konzept die Oberflächendosisleistung $< 1 \text{ Gy/h}$ einhalten lässt, so dass die Aussagen bzgl. der Begrenzung der Radiolyse und der Beeinträchtigung des Buffers übernommen werden können. Weiterhin wird als Annahme unterstellt, dass nach einiger Zeit im Endlager ein reduzierendes chemisches Milieu vorherrscht, so dass im Hinblick auf die Korrosion nur der Unterschied des verlängerten Nachweiszeitraums zu berücksichtigen ist.

Geht man im Zusammenhang mit der Übertragbarkeit davon aus, dass der Nachweis der Behälterstandzeit nicht für 1 Million Jahre gelingt, werden für den noch fehlenden Zeitraum bis 1 Million Jahre eine oder mehrere weitere Barrieren benötigt. Dies kann prinzipiell auf mehrere Arten erreicht werden:

1. Einführung einer erhöhten Behälterstandzeit durch Behältermodifikation
2. Einführung eines ewB-Konzeptes unter Einbeziehung eines modifizierten Buffers
3. Einführung eines ewG-Konzeptes mit einem der beiden in diesem Bericht diskutierten ewG-Typen: (i) Typ Bb und (ii) multipler ewG

Eine Erhöhung der Behälterstandzeit kann durch eine entsprechende Auslegung der Behälter, speziell der Kupferummantelung, erreicht werden. In diesem Zusammenhang ist zu bemerken, dass aufgrund von Korrosionsuntersuchungen von den finnischen Kollegen abgeschätzt wurde, dass die Behälterstandzeit des KBS-3-Konzeptes ggf. auch 1 Million Jahre abdecken würde (Reiko 2012: S. 107), so dass die Abmessungen des Kupfermantels auch für 1 Million Jahre prinzipiell als ausreichend angenommen werden könnten.

Analog zu den Aussagen in Kapitel 3.2.2 gilt aber auch hier, dass nicht auszuschließen ist, dass bei der großen Anzahl der in Deutschland einzulagernden Behälter (ca. 15.000, DBE-TEC (2016)) eine geringe Anzahl der Behälter während des Nachweiszeitraumes aufgrund von Fertigungsdefiziten frühzeitig ausfällt und damit seine Funktion nicht mehr wahrnehmen kann. Entsprechend dem aktuellen Stand der Technik (Ebert & Müller-Hoeppe 2009, SKB 2003, 2006) wird angenommen, dass maximal 0,1 % der Behälter (ca. 15) von Beginn an unerkannte maßgebliche Fertigungsfehler aufweisen, die zu einem vorzeitigen Versagen führen könnten. Für einen Nachweis wären also entweder zusätzliche Barrieren notwendig oder eine Veränderung des Behälters beispielsweise durch Einführung einer zweiten Kupferhülle. Das gleichzeitige Versagen beider Hüllen ist als „weniger wahrscheinlich“ einzustufen.

Tab. 3.1 gibt eine Zusammenstellung maßgeblicher Betrachtungsfälle unter Berücksichtigung der beiden unterschiedlichen Nachweiszeiträume in Skandinavien und Deutschland.

Tab. 3.1: Übersicht über maßgebliche Betrachtungsfälle bzgl. einer Freisetzung. Blau = nur Behälter ist Barriere, Orange = Behälter + Buffer sind Barrieren, Grün = Behälter + Buffer + ewG sind Barrieren.

Nr	Betrachtungsfall						Bemerkung/Konsequenz
	Behälter	Behälter-standzeit [a]	Fertig.-fehler [%]	Buffer [10 ⁶ a]	Fertig.-fehler [%]	ewG Typ M	Bewertung für den Rand des jeweiligen ewB bzw. ewG
1	BSK-Cu	100.000	0,1	wie KBS-3	mech. Schutz	nein	Freisetzung Grund: geringe Behälterstandzeit von 100.000 a
2	BSK-Cu	10 ⁶	0,1	wie KBS-3	mech. Schutz	nein	Freisetzung Grund: unerkannter Fertigungsfehler
3	BSK-Cu (Doppelte Cu-hülle)	10 ⁶	0,1	wie KBS-3	mech. Schutz	nein	Freisetzung weniger wahrscheinlich Grund: Durch die zweite Kupferhülle ist eine Freisetzung wenig wahrscheinlich, da dies das gleichzeitige Auftreten von maßgeblichen Fertigungsfehlern in beiden Hüllen unterstellen würde.
4	BSK-Cu	100.000	0,1	ja große Mächtigkeit	0,1	nein	Freisetzung Grund: geringe Behälterstandzeit von 100.000 a und unerkannte Fertigungsfehler beim Buffer, der eine große Mächtigkeit haben müsste.
5	BSK-Cu	10 ⁶	0,1	ja große Mächtigkeit	0,1	nein	Freisetzung weniger wahrscheinlich Grund: Eine Freisetzung würde das gleichzeitige Auftreten von maßgeblichen Fertigungsfehlern in beiden Barrieren im gleichen Bohrloch unterstellen.
6	BSK-Cu (Doppelte Cu-hülle)	10 ⁶	0,1	wie KBS-3	0,1	nein	Wie Fall 3 , da mechanische Schutzfunktion auch bei Fertigungsfehler gewährleistet ist.
7	BSK-Cu	100.000	0,1	ja	0,1	ja	Freisetzung weniger wahrscheinlich Grund: es wird erfolgreicher Integritätsnachweis des multiplen ewG unterstellt. (Beispielhaft gezeigt für Behälterstandzeit von nur 1.000 a)
8	BSK-Cu	10 ⁶	0,1	ja	0,1	ja	Freisetzung weniger wahrscheinlich Grund: es wird erfolgreicher Integritätsnachweis des multiplen ewG unterstellt (Beispielhaft gezeigt für Behälterstandzeit von nur 1.000 a)

Es werden prinzipiell drei Fallkategorien, farblich unterschiedlich hinterlegt, unterschieden, bei denen entweder nur der Behälter (blau), das System aus Behälter und Buffer (orange) oder das System aus Behälter, Buffer und ewG (grün) als Barrieren fungieren.

Aus der Betrachtung in Tab. 3.1 wird ersichtlich, dass, wenn man das **ewB**-Konzept gemäß dem Vorschlag der ESK zugrunde legen möchte, also keinerlei Kredit vom Gebirge nehmen möchte, eine Geringfügigkeit der Freisetzung nur dann nachweisbar erscheint, wenn man entweder den Behälter signifikant verändert, oder aber einen deutlich mächtigeren Buffer als im KBS-3-Konzept vorsieht. Beides ist mit noch nicht spezifiziertem Aufwand verbunden, sofern - bei vergleichbarer technischer Konzeption - bezgl. der Buffermächtigkeit überhaupt erreichbar.

Unter Einführung eines **ewG**-Konzeptes erscheint die Nachweisbarkeit der Geringfügigkeit der Freisetzung bei Zugrundelegung des schwedisch/finnischen KBs-3-Konzeptes erreichbar. Darüber hinaus könnte unter Umständen sogar auf die Kupferhülle am Behälter verzichtet werden. Die indikativen Berechnungen in Kapitel 2.5 zeigen, dass auch bei der dort angenommenen Behälterstandzeit von nur 1.000 Jahren (Daten aus der SPA-Studie) der multiple ewG mit einer jeweils nur geringen Mächtigkeit eine geeignete Barriere sein könnte. Behälterstandzeiten von ≤ 1.000 Jahren lassen sich ggf. auch ohne einen Kupfermantel erreichen. Dies bedingt in jedem Fall ein dazu passendes Verschlusssystem für die Zugänge zu den einzelnen ewG-Komponenten.

Aufgrund dieser Aussagen und den obigen Bemerkungen zum ewG-Typ Bb wird im Folgenden nur der ewG-Typ „multipler ewG“ weiter betrachtet.

3.2 Einlagerungs- und Verschlusskonzept im KBS-3-Konzept

Auffahrungen im finnischen ONKALO zeigen, dass es im dortigen Granit durchaus Bereiche gibt, die trocken sind. So weisen aufgefahrene Einlagerungsbohrlöcher keine wasserführenden Risse auf, so dass Bohrlöcher vollständig trocken bleiben. Der Ansatz eines multiplen ewG ließe sich demnach durch In-situ-Befunde stützen.

Bei der Planung des schwedisch/finnischen Verschlusskonzeptes und dem damit verknüpften Konzept für die geotechnischen Barrieren wurde allerdings davon ausgegangen, dass der Granit klüftig und wasserführend ist, so dass der Behälter mit dem ihn umgebenden Bentonitbuffer die einschlusswirksame Barriere darstellt. Alle anderen Versatz- und Verschlussmaßnahmen dienen dem Erhalt dieser Barriere, wobei die Funktionsfähigkeit der einzelnen Maßnahmen verschiedene Zeitphasen betrifft. So muss z.B. das Verschlussbauwerk der Beschickungsstrecken nur in der Betriebsphase seine Funktion erfüllen, der Verschluss der Rampe und der Schächte nahe der Tagesoberfläche das ungewollte menschliche Eindringen verhindern und somit in der Nachbetriebsphase wirksam sein.

Obwohl im Rahmen der hier durchgeführten Untersuchungen der Sachverhalt untersucht werden soll, ob ein geotechnisches Barrierensystem entwickelt werden kann, das einen potenziellen multiplen ewG vervollständigen würde, wird im Folgenden zuerst das schwedische

bzw. das finnische Verschlusskonzept beschrieben. Dabei werden die Funktionen einzelner Verschlusselemente dargestellt, so dass sie in Bezug auf ihre Eignung für einen (multiplen) ewG bewertet werden können bzw. herausgearbeitet werden kann, wie sie modifiziert werden müssen, um einen potenziellen (multiplen) ewG im Kristallingestein zu vervollständigen.

Eine Übersicht über das in Schweden geplante Grubengebäude und das Verfüll- und Verschlusskonzept gibt Abb. 3.3.

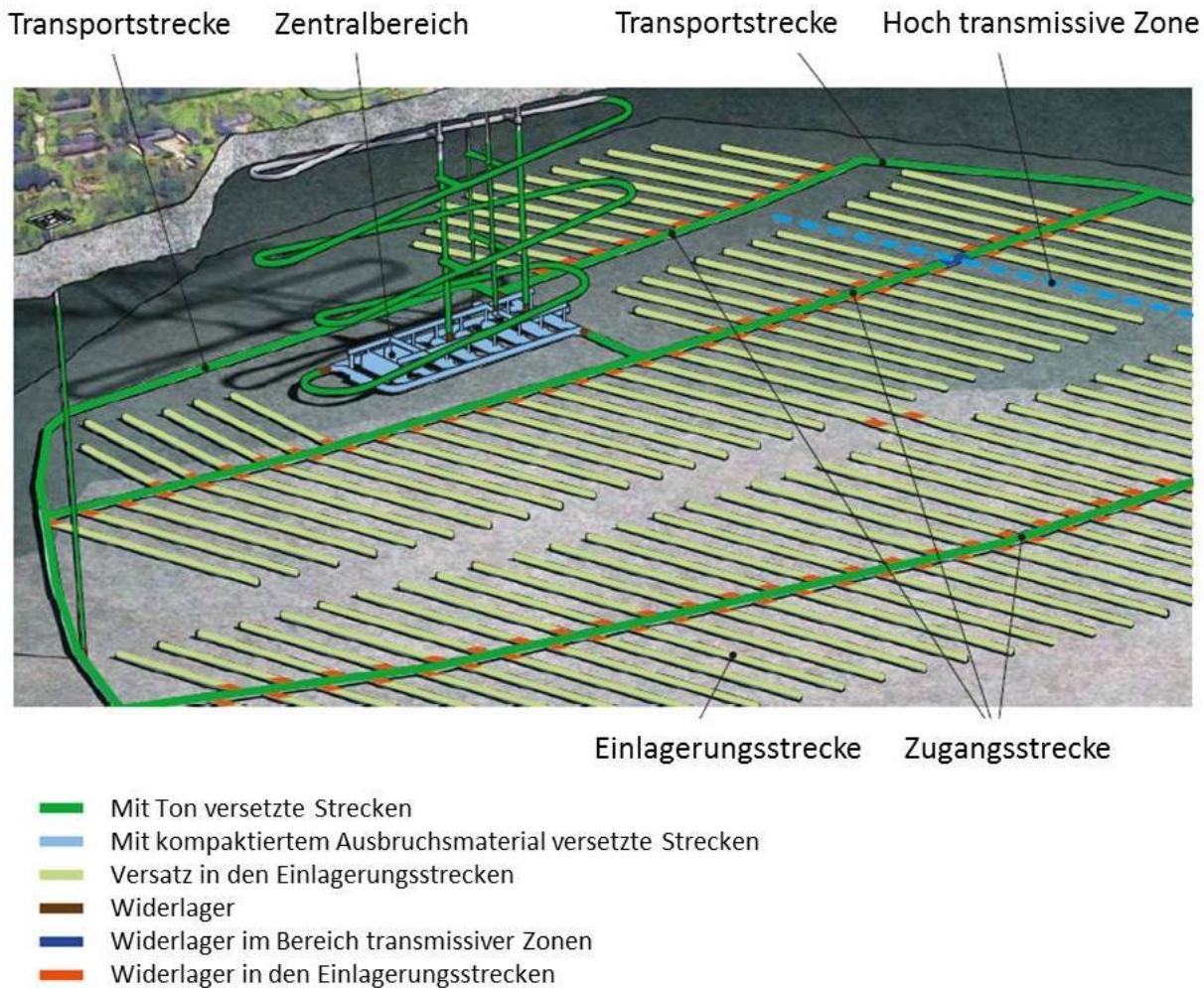


Abb. 3.3: Verfüll- und Verschlusskonzept für das geplante Endlager im Granit in Schweden, Grubengebäude (SKB 2010c).

Die Einlagerungsbohrlöcher und ihre Verfüllung sind in der großmaßstäblichen Abbildung nicht mit dargestellt, das prinzipielle Einlagerungsschema in den Einlagerungsbohrlöchern kann jedoch Abb. 3.2 entnommen werden. Eine detailliertere Darstellung der Verfüllung und des Verschlusses der Rampe und der Schächte findet sich in Abb. 3.4, der Verschluss der Erkundungsbohrungen in Abb. 3.5.

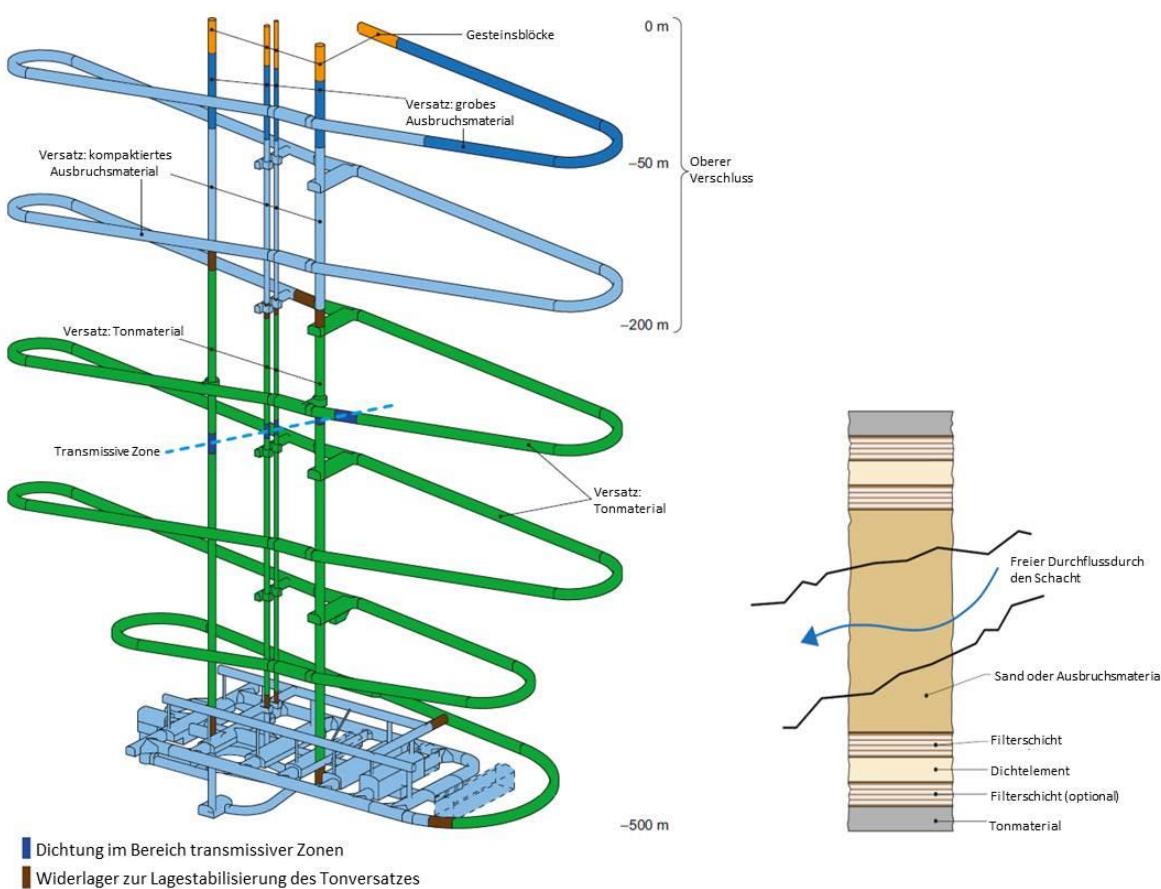


Abb. 3.4: Verfüll- und Verschlusskonzept der SKB für das geplante Endlager im Granit – Rampe und Schächte mit Detaildarstellung des Verschlusses einer hoch transmissiven Zone (SKB 2010c).

Mit Ausnahme des oberflächennahen Bereiches der Rampe und der Schächte, der gesondert betrachtet wird, werden im Grubengebäude folgende Verfüll- und Verschlussmaßnahmen unterschieden (vgl. Abb. 3.3):

- Versatz der Einlagerungsstrecken (Beschickungsstrecken) mit Bentonit (SKB 2010b)
- Versatz der Zugangs- und Transportstrecken mit einem Bentonitgemisch bzw. Ton
- Versatz von Grubenbauen mit kompaktiertem, zerkleinertem Ausbruchsmaterial
- Verschlussbauwerke (Ppropfen) zum Verschluss der Beschickungsstrecken
- Verschlussbauwerke (Ppropfen) zur Abgrenzung hoch transmissiver Zonen
- Verschlussbauwerke (Ppropfen) zum Abschluss von Bereichen der Zugangs- und Transportstrecken sowie der Rampe und der Schächte im oberflächenfernen Bereich

Wie Abb. 3.4 zu entnehmen ist, werden für verschiedene Abschnitte der Rampe und der Schächte ein oberflächenferner, unterer Abschnitt und ein oberflächennaher, oberer Abschnitt unterschieden. Während die Verfüllung im unteren Abschnitt der Verfüllung der Transport- und Zugangsstrecken entspricht, werden im oberen Abschnitt kompaktiertes, zerkleinertes Ausbruchsmaterial, grob zerkleinertes Ausbruchsmaterial und Felsblöcke verwendet (SKB 2010c).

Die Verfüllung der übertägigen Erkundungsbohrungen ist in Abb. 3.5 dargestellt. Sie besteht aus Ton, der in gelochten Kupferrohren eingebracht wird. Im Bereich hydraulisch hoch durchlässiger Zonen wird gemäß Planung eine Zementdichtung gesetzt.

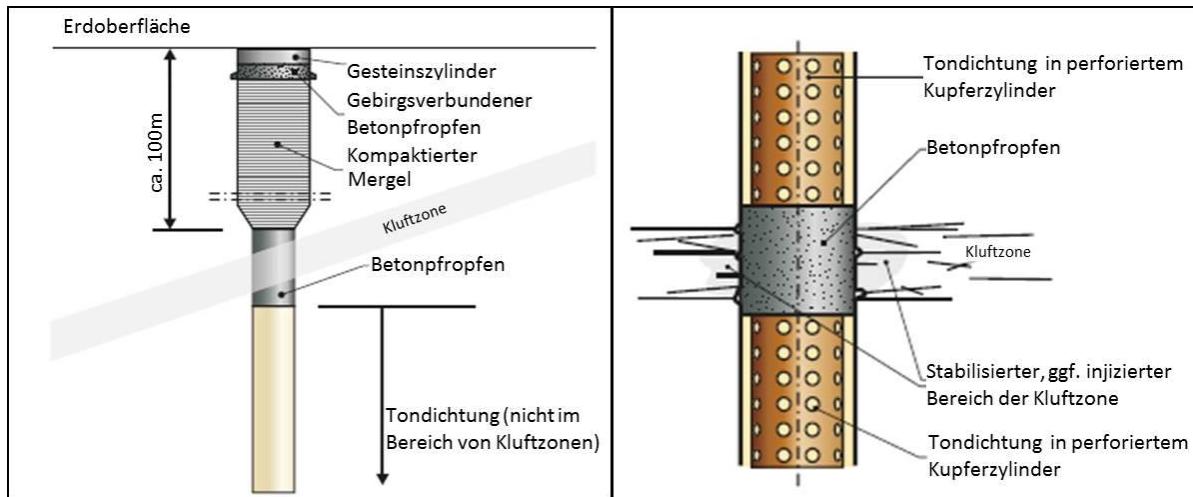


Abb. 3.5: Verfüllung von übertägigen Erkundungsbohrungen (SKB 2010a).

3.2.1 Versatz der Einlagerungsstrecken

Die Einlagerungsstrecken werden mit Bentonit verfüllt. Die Aufgaben des Bentonitversatzes in den Einlagerungsstrecken sind (SKB 2015):

- den advektiven Transport von Wasser im Streckensystem zu beschränken
- das Herausquellen aus dem Bohrloch und damit eine Auflockerung des Buffers zu verhindern
- andere Barrieren nicht zu beeinträchtigen

d.h. es werden folgende quantitative Anforderungen an den Bentonit gestellt (SKB 2015):

- hydraulische Leitfähigkeit: $k_f < 1 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$ bzw. Permeabilität: $k < 1 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$
- Quelldruck: $P_q > 0,1 \text{ MPa}$

Der zu erzielende Quelldruck und die damit verbundene Permeabilität nach Aufsättigung beruht auf einer Mindestdichte des Versatzes von 1.950 kg/m^3 , wobei Toleranzen infolge der Auffahrungsgeometrie, Bentonitverlust durch Erosion und weitere Ungewissheiten zu berücksichtigen sind.

3.2.2 Versatz der Zugangs- und Transportstrecken

Für die Verfüllung der Zugangs- und Transportstrecken sowie des unteren Abschnitts der Rampe und der Schächte sind verschiedene Bentonit- bzw. Tongemische möglich. Die Aufgabe der Tonverfüllung ist es die Kanalisierung von Wässern zu verhindern.

Bezüglich der integralen hydraulische Leitfähigkeit von Verfüllung und EDZ gilt (SKB 2010b), $k_f \leq 1 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$, was einer integralen Permeabilität von $k \leq 1 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$ entspricht. Hydraulisch hoch transmissive Zonen (vgl. Abb. 3.4) werden gesondert abgedichtet.

3.2.3 Verfüllung von Grubenbereichen ohne hydraulische Anforderungen

Bereiche im Grubengebäude sowie im Bereich der Rampe und Schächte, die mit kompaktiertem, zerkleinertem Ausbruchmaterial verfüllt werden, werden nur zur mechanischen Stabilisierung des Gebirges verfüllt. Dort bestehen keine hydraulischen Anforderungen. Die Verfüllung der Rampe und der Schächte, die mit grob zerkleinertem Ausbruchsmaterial sowie mit Felsblöcken verfüllt werden, werden einerseits zur mechanischen Stabilisierung verfüllt andererseits soll das menschliche Eindringen verhindert werden. Das Erstellen von Bohrungen in grob zerkleinertem Hartgestein ist sehr schwierig. Hydraulischen Anforderungen an die Verfüllung bestehen nicht.

3.2.4 Verfüllung der Erkundungsbohrungen

Die Verfüllung der Erkundungsbohrungen erfolgt mit Bentonit bzw. Ton. Bei Erfüllung der nachstehenden quantitativen Anforderungen ist die Funktionsfähigkeit der Bohrlochverfüllungen gegeben (SKB 2010b).

- hydraulische Leitfähigkeit: $k_f < 1 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$ bzw. Permeabilität: $k < 1 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$
- Quelldruck: $P_q > 0,1 \text{ MPa}$

3.2.5 Verschlussbauwerke und ihre Funktion

Die Funktion der Verschlussbauwerke ist allgemein wie folgt beschrieben (SKB 2010b). Die Verschlussbauwerke

- müssen den hydrostatischen Druck in der jeweiligen Teufe aufnehmen
- müssen den Zufluss jeweils solange begrenzen, bis der angrenzende Grubenbereich (Strecke, Rampe, Schächte) ebenfalls verfüllt ist
- dürfen die angrenzenden Barrieren Wirtsgestein und Verfüllung nicht maßgeblich beeinträchtigen. Dies wird u. a. durch die Verwendung von "low-ph-Zement" gewährleistet

Die Funktion der Verschlussbauwerke der Einlagerungsstrecken ist bereits detailliert in SKB (2010b) beschrieben. Zur Erläuterung ist beispielhaft das Verschlussbauwerk der Einlagerungsstrecken der SKB in Abb. 3-6 gegeben.

Die Verschlussbauwerke der Beschickungsstrecken sollen die Auflockerung und den Austrag (Erosion) der Bentonitverfüllung der Beschickungsstrecken in die Zugangsstrecken verhindern. Diese Funktion ist im Wesentlichen auf die Betriebsphase beschränkt, bis auch die Verfüllung der Zugangsstrecken erfolgt ist.

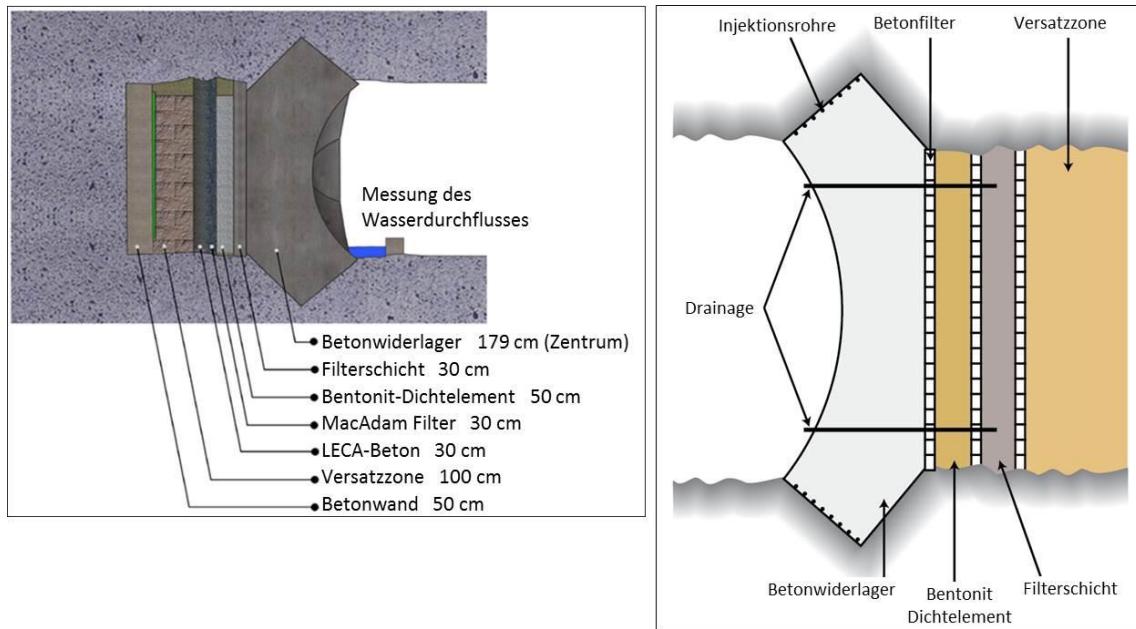


Abb. 3.6: Schematische Darstellung des schwedischen Verschlussbauwerkes DOMPLU (Dome Plug) für die Einlagerungsstrecken (SKB 2010b, Grahm et al. 2015).

Die Funktionsdauer dieser Verschlüsse ist auf 100 Jahre beschränkt. Die Anforderungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Entsprechend ihrer Funktion müssen die Verschlussbauwerke, speziell die Betonwiderlager, den hydrostatischen Druck in der Endlagerteufe und den Quelldruck des Bentonits der Beschickungsstrecken aufnehmen, bis die Zugangsstrecke verfüllt ist. Der hydrostatische Druck ist mit 5 MPa quantifiziert.
- Die Bauwerke müssen den Durchfluss von Wasser aus den Einlagerungsstrecken in die Zugangsstrecken begrenzen, bis die Zugangsstrecken verfüllt und die Verfüllung wassergesättigt ist.
- Die zulässigen Verschiebungen sind auf ein akzeptables Maß zu beschränken, so dass die Anforderungen an die Wasserdichtheit der Abdichtung (vgl. Abb. 3.6, Bentonitdichtelement) erhalten bleiben.
- Die wechselnden thermischen Beanspruchungen während der Betriebshase durch die Bewetterung und der Wärmeentwicklung der radioaktiven Abfälle müssen aufgenommen werden können, ohne dass es zu einer Funktionsbeeinträchtigung kommt.
- Die verwendeten Materialien müssen mit den hydrochemischen Verhältnissen des Grundwassers kompatibel sein, so dass keine hydrochemisch bedingte Funktionsbeeinträchtigung der Verschlussbauwerke entsteht.

Bei der bautechnischen Errichtung ist auf folgende Aspekte besonders zu achten:

- Für den Beton ist die Rissbildung zu beschränken. Die gilt für sämtliche Bauzustände, wobei insbesondere auf die Beschränkung der Zugspannungen zu achten ist.
- Während der Betonierphase (Bauzustände) ist das Wasser zu dränieren. Dazu sind die Filterschichten entsprechend zu konzipieren.

3.2.6 Betrachtung der aufgelockerten Konturzone

In-situ Versuche in den verschiedenen URL in Kanada, Japan, Schweden und der Schweiz lieferten Hinweise über die Stärke der Schädigung im Bereich der konturnahen Zone, über deren Tiefe und die Abhängigkeit von der Auffahrungsmethode. Es zeigte sich, dass die Auffahrungsmethode den größten Einfluss auf die Stärke der Schädigung und die damit verbundene Permeabilität hat. Verschiedene in-situ Methoden und Laborversuche in verschiedenen Skalen wurden durchgeführt, um die geschädigte Zone zu charakterisieren. Die Nutzung einer Tunnelbohrmaschine sowohl im URL Äspö als auch im URL Grimsel führte zu einer Schädigungstiefe von nur etwa 5 mm (Bäckblom 2008).

Die gemessene hydraulische Leitfähigkeit lag beispielsweise im URL Äspö bei $1 \cdot 10^{-9}$ m/s in einem Tiefenbereich von 1-2 mm von der Tunnelkontur, $2 \cdot 10^{-11}$ m/s in einem Tiefenbereich von 5 mm und $1 \cdot 10^{-13}$ m/s in größeren Tiefen. Die hydraulische Leitfähigkeit ungestörter Granite liegt bei $1 \cdot 10^{-13}$ m/s bis $1 \cdot 10^{-14}$ m/s.

Verwendet man Bohren und Sprengen als Auffahrungsmethode, führt dies zu einer weitaus größeren geschädigten Zone bis in Tiefen von einigen zehner Zentimetern, wobei die tatsächliche Tiefe stark davon abhängt, wie akkurat die Sprengbohrungen gesetzt werden, wieviel Sprengstoff vor allem in Konturnähe verwendet wird und wie die geologischen Bedingungen am jeweiligen Ort sind. Bei schonendem Sprengen wurde beispielsweise eine Tiefe der ALZ von 1-3 cm festgestellt (Autio 2005).

Als brauchbarer Referenzwert für erste Planungen und Berechnungen kann eine hydraulische Leitfähigkeit von $k_f = 1 \cdot 10^{-8}$ m/s verwendet werden (Bäckblom 2008). Hydraulische Leitfähigkeiten in dieser Größenordnung wurden in einer ganzen Reihe von Tests unter wassergesättigten Bedingungen in kristallinen Gesteinen beobachtet, die schonend aufgefahren wurden. Lokal wurden sowohl höhere als auch niedrigere Werte festgestellt, was zum einen an der natürlichen Variabilität der Gesteinseigenschaften liegt, zum anderen aber vor allem auffahrungsbedingte Ursachen hatte.

Für die Abmessungen eines Dichtelementes ist die Reichweite von Rissen in der aufgelockerten Konturzone von Bedeutung, um sicherzustellen, dass nicht einzelne Risse eine Umläufigkeit herbeiführen. So wurde in (Liedtke 1999) im Rahmen von Untersuchungen im Untertagelabor im Grimsel festgestellt, dass die ALZ-Trennflächen nicht durchgehend sind. Sie können gebogen oder abgesetzt sein, abknicken und sich in mehrere Parallelbrüche aufteilen. Ihre statistische Länge wird mit < 0,5 m angeben, wobei Sprengvortrieb zur Anwendung kam.

3.3 Konstruktive Lösungen von Verschlussbauwerken im Kristallingestein

Für das schwedisch/finnische Endlagerkonzept im Granit existieren unterschiedliche konstruktive Lösungen für die Verschlussbauwerke der Einlagerungsstrecken.

Der konstruktive Entwurf für das schwedische Konzept für den Verschluss der Einlagerungsstrecken ist in Abb. 3.7 dargestellt. Es wird derzeit im schwedischen Untertagelabor Äspö im Rahmen des In-situ-Versuchs DOMPLU (Dome Plug) erprobt.

Der konstruktive Entwurf für das finnische Konzept zum Verschluss der Einlagerungsstrecken ist in Abb. 3.8 dargestellt. Es wird im finnischen Untertagelabor ONKALO im Rahmen des In-situ-Versuches POPLU (Posiva Plug) erprobt.

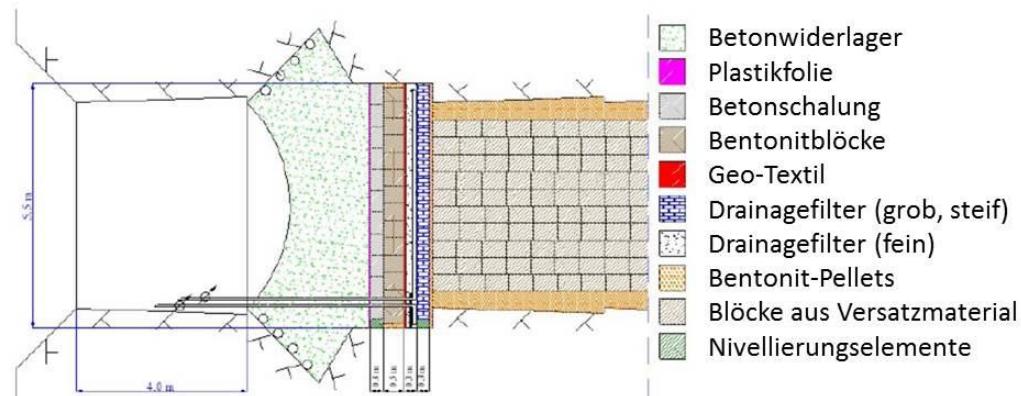


Abb. 3.7: Konstruktiver Entwurf des schwedischen Verschlussbauwerkes für die Einlagerungsstrecken (DOMPLU).

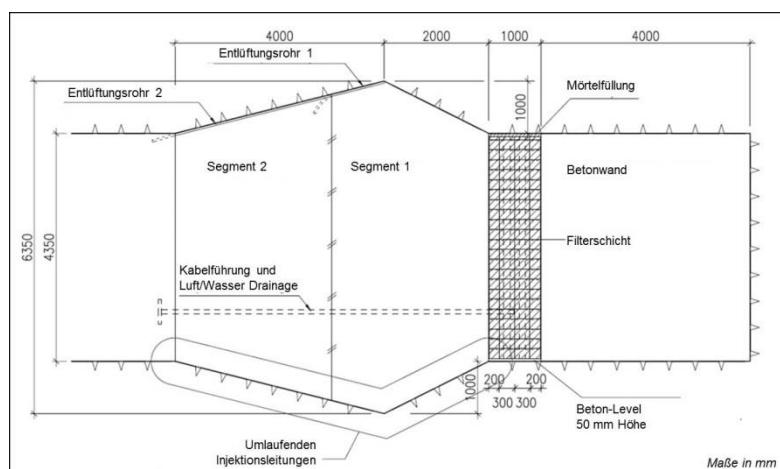


Abb. 3.8:
Konstruktiver Entwurf des finnischen
Verschlussbauwerks der
Einlagerungsstrecken (POPLU).

Anhand der angeordneten Drainageleitungen wird deutlich, dass beide Verschlussbauwerke für den Fall konzipiert sind, dass maßgebliche Zuflüsse schon während der Bauzeit erwartet werden und abgeleitet werden müssen (vgl. dazu auch Abb. 3.9). Unter einem künstlich aufgebrachten Wasserdruk kam es im Laufe der Versuche zu Durchtritten, im Falle des DOMPLU betrug er 4 MPa. Die Durchtritte ließen sich aber dadurch erklären, dass das Gebirge ringsherum bzw. die dort bestehenden Risse hydraulisch aktiviert wurden.

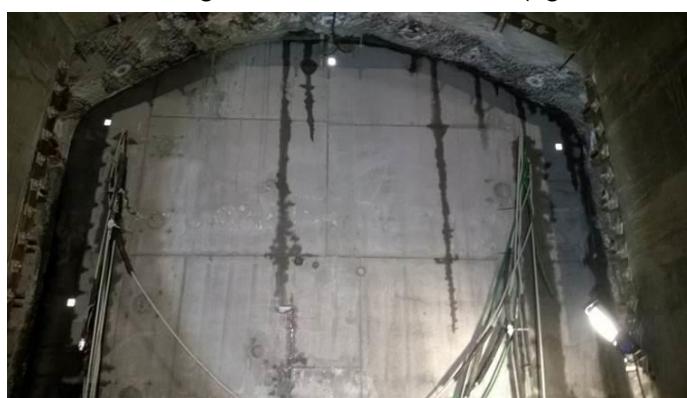
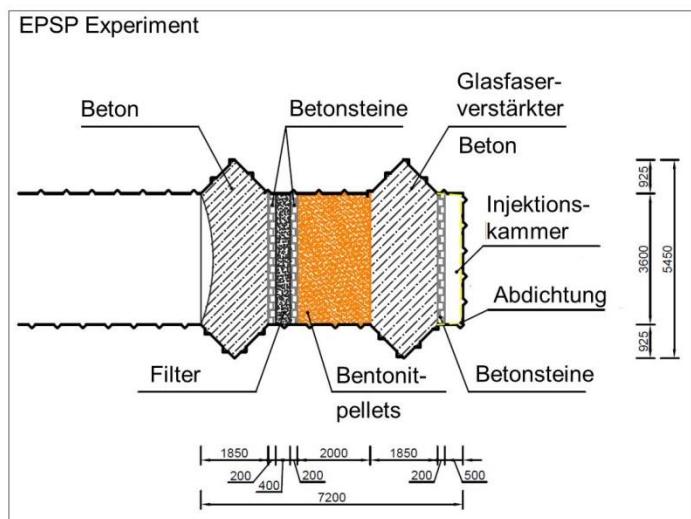


Abb. 3.9: Luftseitige Ansicht von POPLU.

Anders sieht es im tschechischen EPSP-Experiment aus, das in einer Nische der St. Josefs-Strecke errichtet worden ist. Das Konzept ist in Abb. 3.10 dargestellt. Es sind keine Drainageleitungen für die Bauzustände vorgesehen. Dazu ist festzustellen, dass der Versuchsstandort mittels Hochdruckinjektion von Polyurethanharzen über Bohrungen umfangreich vorvergütet wurde. Wasserabpressversuche (Lugeon-Tests) vor und nach



Vergütung zeigten eine Verringerung der Permeabilität um 1 bis 2 Größenordnungen, wobei als bester Wert eine Permeabilität von etwas größer als $1 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ erzielt wurde. Damit war während der Bauzeit die Baustelle trocken. Abschließende Ergebnisse zum EPSP-Experiment liegen noch nicht vor.

Abb. 3.10:
Schematischer, konstruktiver Entwurf des tschechischen EPSP Experimentes.

Ein weiteres In-situ-Experiment wurde von der AECL in Kanada durchgeführt. Es handelt sich um das TSX-Experiment (Tunnel Sealing Experiment), das im Untertagelabor der ACEL ausgeführt wurde. Es befindet sich im Kanadischen Schild im Lac-du-Bonnet Bartholith in der Nähe von Lac du Bonnet. Obwohl an der Konstruktion nicht erkennbar, handelt es sich um ein Konzept für wasserführenden Granit. Die Migration von Wasser in und aus dem Bauwerk wurde einige Jahre lang messtechnisch beobachtet (Chandler et al. 2002, Martino et al. 2008). Im Zuge des Versuchsablaufes wurde das Bauwerk mit einem hydraulischen Druck von 4,2 MPa belastet und das Wasser im Inneren wurde auf 85°C erhitzt. Sowohl der Beton- als auch der Bentonitpropfen verzögerten signifikant die Migration des Wassers und demonstrierten die bautechnische Machbarkeit und Effektivität von Streckenabdichtungen. Dieser Test bildete auch die Grundlage für die Verschlusskonzepte der POSIVA. Es ergaben sich integrale Permeabilitäten für den Betonpropfen von $1 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ und den Bentonitpropfen von $1 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$.

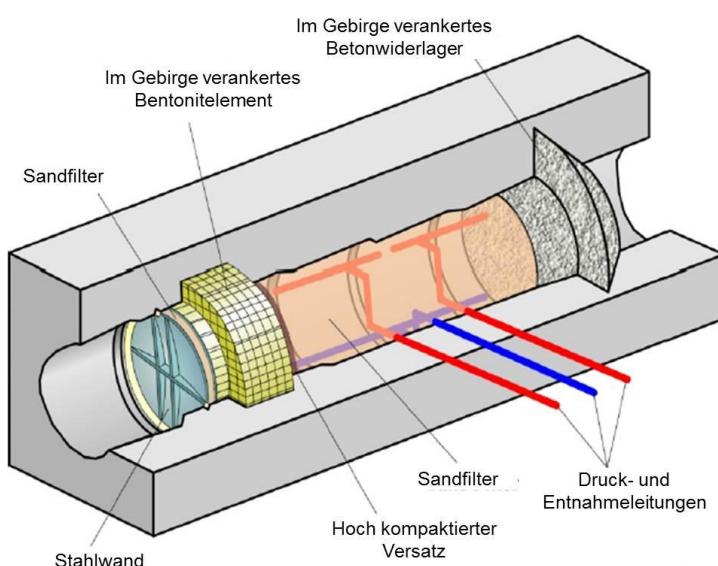


Abb. 3.11:
Schematischer Überblick über das TSX-Experiment der AECL in Kanada (Dixon et al. 2012).

Fazit

Allen getesteten Konstruktionen (DOMPLU, POPLU und TSX) war gemeinsam, dass durch die Konstruktion hohe hydraulische Drücke und hohe hydraulische Gradienten aufgenommen werden konnten. Festzustellen war allerdings, dass in allen Fällen das hydraulische Verhalten vom Kontaktbereich und von der auffahrungsbedingten Zone im Kristallin bestimmt wurde, wenn nicht sogar einzelne Klüfte maßgebend wurden, die keinen Bezug zum Verschlussbauwerk besaßen. Für das TSX-Experiment wurden integrale Permeabilitäten von $1 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ für den Betonpfropfen angegeben und $1 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ für den Bentonitpfropfen.

3.4 Umsetzung für einen multiplen ewG

Bei Umsetzung des multiplen ewG-Konzeptes ist die Anordnung der Beschickungsstrecken abhängig vom Gesteinskörper mit sicherheitsrelevanten Gesteinseigenschaften. Für hoch transmissive Zonen im Grubengebäude sollte das schwedisch/finnische Konzept mit dem hochporösen Material in der transmissiven Zone umgesetzt werden, um das hydraulische System und insbesondere die herrschenden Druckgradienten möglichst wenig zu verändern. Damit werden auch keine Kluftöffnungsprozesse in Folge hydraulischer Druckgradienten wirksam und trockene Bereiche bleiben erhalten. Dieses Konzept ist ohne weiteres auf deutsche Verhältnisse übertragbar.

Für die Abdichtung der Einlagerungsstrecken reichen die im vorigen Kapitel vorgestellten Konzepte für die Anwendung im Rahmen eines multiplen ewG nicht aus. Hier sollten zusätzliche Elemente eingesetzt werden, die eine instantane Abdichtung ermöglichen. Insofern wird im folgenden Kapitel ein Verschlussbauwerk, das mit dem Ziel einer instantanen Abdichtwirkung für das Salz konzipiert wurde, vorgestellt und anschließend bewertet, ob sich das Funktionsprinzip prinzipiell auf das Kristallin übertragen lässt.

3.4.1 Abdichtungskonzept mit Asphaltabdichtung

Im Rahmen früherer Planungen zu Endlagern im Salz wurde der Zutritt von Lösungen in der Betriebsphase nicht ausgeschlossen. Aus diesem Grund wurden auch Dammbauwerke geplant, die eine kurzzeitige Dichtfunktion aufweisen sollten, um zu verhindern, dass Lösungen in die Einlagerungsbereiche zutreten und möglicherweise kontaminierte Salzlösung aus den Einlagerungsbereichen in betrieblich genutzte Grubenräume austritt. Für diese horizontalen Dämme wurden in Bezug auf die Betriebsphase folgende Anforderungen und Randbedingungen definiert:

- Die Funktionsdauer soll mindestens 50 Jahre betragen.
- Eine Abdichtwirkung soll nur gegen Flüssigkeiten erreicht werden. Sie ist gegen Gasdruck nicht definiert.
- Der maximale Flüssigkeitsdruck, dem ein Verschlussbauwerk standhalten muss, ist identisch mit dem hydrostatischen Druck, den eine Lösungssäule bis zum Salzspiegel mit einer Wassersäule vom Salzspiegel bis über Tage ergibt.
- Teile der Geometrie aller zu planenden Verschlussbauwerke (Widerlagerlänge, Flankenwinkel) sollen gleich sein. Der Querschnitt der Verschlussbauwerke variiert in Abhängigkeit der Streckenquerschnitte an den jeweiligen Standorten.

- Vor Auffahrung der detaillierten Bauwerkskontur soll die Strecke allseitig nachgeschnitten werden. Die Tiefe des Nachschnitts muss vor Beginn der Ausführungsplanung durch standortbezogene Untersuchungen festgelegt werden.

Aspekte der Stilllegung bzw. Aspekte der Langzeitsicherheit sind – wie bereits erwähnt – bei diesem Planungskonzept nicht berücksichtigt.

Ein Beispiel für ein solches Dichtsystem findet sich in Abb. 3.12. Es ähnelt in seinem statischen Aufbau dem POPLU-Verschlussbauwerk, enthält allerdings abweichend vom POPLU analog zum DOMPLU ein gesondertes Dichtelement. Während das gesonderte Dichtelement des DOMPLU aus Bentonit besteht, wird das Dichtelement aus Asphalt hergestellt. Die in Abb. 3.12 dargestellte Aufsalzungskammer ist nur für untersättigte Zutrittslösung im Salz von Relevanz und kann im Kristallin entfallen. Bei Entfall der Aufsalzungskammer und der zugehörigen Stützmauer entsprechen die Abmessungen in etwa dem POPLU-Verschlussbauwerk. Der wesentliche Unterschied ist die in das Gebirge ausgestellte Stirndichtung aus Gussasphalt, die die Dichtfunktion übernimmt.

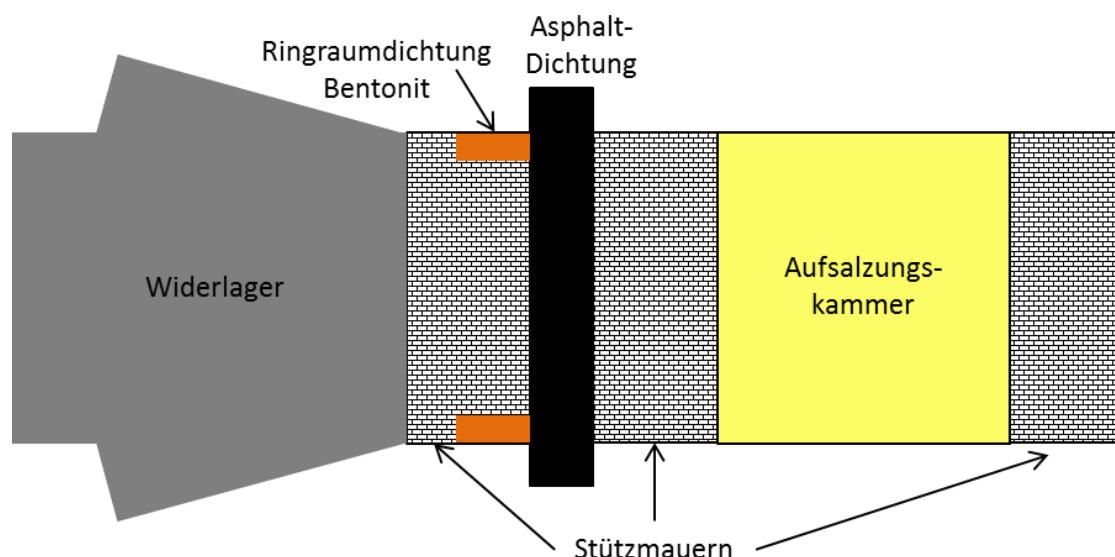


Abb. 3.12: Abdichtungsbauwerk im Steinsalz in der Betriebsphase.

Das Funktionsprinzip dieses Dichtelementes beruht auf der Dichtschichtung von Asphalt und Lösungen bzw. Wässern und Gasen. Aufgrund der höheren Dichte des Asphalt steigen Wässer bzw. Gase im Asphalt nach oben und werden in dem Hohlraum oberhalb der Asphalt-dichtung eingelagert, wenn dieser Hohlraum gegenüber dem Gebirge dicht ist. Aufgrund der höheren Dichte des Asphalt übt das Dichtelement gegenüber der anstehenden Wassersäule immer einen Überdruck aus. Somit ist die Anforderung der Dichtheit für die Funktion des Dichtelementes nur sehr lokal zu erfüllen, was auch im Kristallingestein möglich sein sollte. Weitere Vorgaben, die sich aus der Konzeption des Dichtsystems ergeben, das dem Widerlager vorgelagert ist, sind im Folgenden aufgeführt:

- Die Dichtung bzw. das Dichtungsmaterial muss sich an die durch die Gebirgs- und/oder Lösungsdruck verursachten Verschiebungen oder Verformungen am Wider-

lager anpassen können und den anstehenden Flüssigkeitsdruck an das Widerlager weiterleiten.

- Die Baukomponenten (Stützmauern) müssen die Ortsstabilität des Dichtungsmaterials gewährleisten, d.h. das Dichtungsmaterial über die Funktionsdauer am vorgesehenen Platz halten.
- Das für die Funktion der Dichtung erforderliche Volumen muss unter Berücksichtigung von Dichtmittelverlusten so bemessen sein, dass über die geforderte Funktionsdauer ausreichend Dichtmittel zur Verfügung steht.

Das Dichtungsmaterial hat dabei folgende, generelle Anforderungen zu erfüllen:

- Dichtheit und korrosionsstabiles Verhalten gegenüber den anstehenden Lösungen unter Berücksichtigung der vorherrschenden Spannungen
- geeignetes Materialverhalten zur Anpassung an Gestaltänderungen des Dichtungsraumes, zur Übertragung des Flüssigkeitsdruckes auf das Widerlager und zur Vermeidung zu hoher Dichtmittelverluste
- Beibehaltung der erforderlichen Materialeigenschaften während der geforderten Funktionsdauer der Dichtung.

Unter Berücksichtigung dieser Anforderungen erfolgte die Auswahl des Dichtungssystems in der in Abb. 3.12 dargestellten Form. Als Dichtungsmaterial wurde ein dem Problem angepasstes beschwertes Bitumen – sogenannter Gussasphalt – gewählt.

Neben der bereits genannten, lokalen Anforderung an die Dichtheit des Kristallingesteins ist weitere Voraussetzung für das Funktionieren der Dichtung, dass der Gussasphaltstand im Firstbereich der Dichtung ein vorher festzulegendes Niveau nicht unterschreitet, damit ein Eintritt von Lösungen in die Fuge zwischen Bauwerk und Gebirge an dieser Stelle vermieden wird. Im Firstbereich muss ein Reservevolumen vorgehalten werden. Zur Vermeidung der Durchströmung der Dichtung im Firstbereich oder der Zwischenschichtung von Lösungen bzw. Wässern im Gussasphalt muss über der Kontaktfuge zwischen Bauwerk und Gebirge im Firstbereich stets Gussasphalt mit einer Dichte anstehen, die größer als die Dichte der anstehenden Lösung ist. Gegen das Absinken dieses „wirksamen“ Gussasphaltspiegels unterhalb der erforderlichen Höhe (Firstlinie) ist ein ausreichendes Reservevolumen mit einer Dichte größer als die Dichte der Lösung vorzuhalten. Das Reservevolumen muss größer, mindestens aber gleich dem sogenannten Verlustvolumen sein. Das Verlustvolumen wird bestimmt aus der Volumenänderung der Asphaltkammer, in der sich der Gussasphalt befindet, und aus der Änderung des Asphaltvolumens selbst.

Um die Wahrscheinlichkeit eines Versagens der Dichtung durch Abströmen von Asphalt in der Fuge Bauwerk/Gebirge zu verringern, wurde als zusätzliche technische Maßnahme und als redundante Dichtung der Einbau einer Bentonitdichtung in ringspaltförmiger Ausführung vorgesehen (vgl. Abb. 3.12). Anmerkung: Eine Dichtheit der Stützmauer gegenüber den anstehenden Lösungen ist für die Funktion der Dichtung nicht erforderlich. Die generell erforderlichen Eigenschaften eines Gussasphalts, der für die Dichtung geeignet ist, lassen sich wie folgt beschreiben.

Der Gussasphalt ist aus Bitumen, Füller sowie Sand und Splitt zusammengesetzt und besitzt eine höhere Dichte als die anstehenden Lösungen. Dabei schwimmen die Mineralkörner (Splitt) im Asphaltmörtel (Gemisch aus Bitumen, Füller und Sand), d.h. der im Mineralstoff vorhandene Porenraum ist überfüllt. Dies hat zur Folge, dass der Gussasphalt sehr hohlraumarm (praktisch ohne Luft- bzw. Gasporen) hergestellt wird.

Bei Temperaturen von mehr als 20°C und Gebirgsbewegungen und Spannungsaufbauraten, die bei Eintritt des Belastungsfalls sehr langsam stattfinden, kann Gussasphalt als zähe newtonsche Flüssigkeit ohne Strukturviskosität angesehen werden. Diese Eigenschaften führen zu folgendem grundlegendem Verhalten:

- Volumenänderungen infolge der Änderung der mittleren Spannung sind wegen der im Gussasphalt fehlenden Gas- bzw. Luftporosität im Vergleich zu allen übrigen Verformungsgrößen vernachlässigbar klein.
- Elastische Verformungen treten hinter die viskosen Verformungen zurück und sind gegenüber diesen vernachlässigbar klein.
- Die Geschwindigkeit, mit der die Verformungen im Gussasphalt ablaufen, ist direkt proportional zu dem auf ihn einwirkenden Druckgradienten (Schergeschwindigkeitsgefälle) und der Viskosität des Gussasphalts.
- Alle Verformungen des Gussasphalts sind „volumenkonstantes Fließen“ – Volumenauflockerung (Dilatanz) tritt wegen des fehlenden Kornskeletts nicht auf.
- Wegen des fehlenden Luft- bzw. Gasporenraums ist Gussasphalt als undurchlässig anzusehen.
- Da bei Scherbeanspruchungen keine Dilatanz auftritt, bleibt Gussasphalt auch bei großen Verformungen undurchlässig.

Zur Stabilität des Gussasphalts und zur Beibehaltung der Materialeigenschaften lässt sich Folgendes aussagen:

- Die Mineralkörner sind im Gussasphalt erosionsstabil, d.h. ein Auspressen von Bitumen aus dem Mineralverband ist nicht möglich.
- Das Auspressen von Asphaltmörtel (Bitumen, Füller, Sand) aus dem Splitt („Lochplatteneffekt“) ist bei geringen Spaltweiten aufgrund des Stoppeffektes nur in sehr geringem Umfang möglich.
- Auch bei Auspressen von Asphaltmörtel verhält sich der Gussasphalt weiterhin wie eine newtonsche Flüssigkeit.
- Herstellungsbedingte, im Gussasphalt geringfügig vorhandene Dichteunterschiede haben keinen Einfluss auf die Funktion der Dichtung.

Die Eigenschaften des Dichtmaterials Gussasphalt ermöglichen es, die Wechselwirkung zwischen den durch die Lösung hervorgerufenen Druckspannungen und den Verformungseigenschaften des Gussasphaltes vorherzusagen. Hierzu wurden Belastungsfälle betrachtet für eine Dichtung ohne Lösungsdruck, für angreifenden Lösungsdruck im Streckenquerschnitt und für einen Lösungszutritt in den Resthohlräum im Firstbereich im Falle eines höher permeablen Streckensaums. In sämtlichen angenommenen Belastungsfällen wurde theoretisch die Funktionsfähigkeit der Dichtung nachgewiesen. Eine seitliche Umströmung der Dichtung in der Grenzfläche zwischen Gussasphalt und Gebirge kann

ebenfalls theoretisch ausgeschlossen werden. Zur Untermauerung des theoretisch erbrachten Nachweises der Dichtfunktion wurden experimentelle Untersuchungen einer Gussasphaltrzeptur durchgeführt, die die beschriebene Funktionsweise bestätigten (unveröffentlicht). Wie lange eine solche Konstruktion funktionsfähig ist, hängt unter anderem von den Bitumenverlusten ab, wobei auch mikrobielle Degradation zu berücksichtigen ist. Unter anaeroben Bedingungen wird mit sehr geringen Bitumenverlusten durch mikrobielle Degradation gerechnet. Eine Quantifizierung wäre allerdings noch vorzunehmen, wobei zur Untersetzung technische Analoga herangezogen werden können.

Wie bereits erwähnt, ist die Ausdehnung der aufgelockerten Zonen im Kristallin und die Reichweite von Rissen bei gebirgsschonendem Auffahren gering. Im FuE-Vorhaben ELSA-Phase-II konnte ein Eindringen von Bitumen in Risse mit Öffnungsweiten von wenigen zehner Mikrometer beobachtet werden (Jobmann 2016c). Im Hinblick auf eine Gussasphaltdichtung kann durch geeignete Anstriche auch die Adhäsion verbessert werden. Möglicherweise lässt sich die Vernetzung der in der aufgelockerten Zone vorhandenen Risse durch Tränken unterbrechen. Zur Tränkung sollte in Zukunft die Materialgruppe der Geopolymere in die Diskussion einbezogen werden. Für die Anwendung als Massenbaustoff liegen allerdings noch keine Praxisanwendungen vor, so dass derzeit keine Aussage möglich ist, ob z.B. ein Dichtelement aus langzeitstabilen anorganischen Geopolymeren den Gussasphalt bzw. das Bitumen ersetzen kann.

Konzeptvorschlag

Unter der Annahme, dass die Beschickungsstrecken wie im schwedisch/finnischen Konzept mit quellfähigen Bentonitversatz verfüllt werden, der eine langzeitliche Dichtwirkung ausübt, könnte der Aufbau eines Verschlussbauwerkes zu einer Einlagerungsstrecke ausgehend von der Einlagerungsseite im ersten konzeptionellen Ansatz wie folgt aussehen:

- Bentonitversatz
- kapillarbrechende Filterschicht (z.B. Ausbruchmaterial, gestufte Körnung zur Gewährleistung der Filterstabilität gegenüber Bentonitversatz)
- Widerlager (z.B. aus low-ph-Beton)
- Stützelement (z.B. aus low-ph-Beton)
- Asphaltabdichtung
- Stützelement (wasserdurchlässig, aber dicht gegenüber der Asphaltabdichtung), z.B. Sandsteinmauerwerk mit noch zu wählender Mörtelmischung)
- Versatz aus Bentonitgemisch oder Ton, ggf. bei Erfordernis auch Bentonitversatz

Die Ähnlichkeit des Entwurfes mit vorhandenen und getesteten Konzepten lässt die Schlussfolgerung zu, dass die Abmessungen bautechnisch umsetzbar sind. Hinsichtlich der Funktionsdauer des Verschlusses ist die Dauer der Funktionsfähigkeit der Asphaltabdichtung und das notwendige Reservevolumen entscheidend. Eine quantitative Auslegung erfolgt hier nicht.

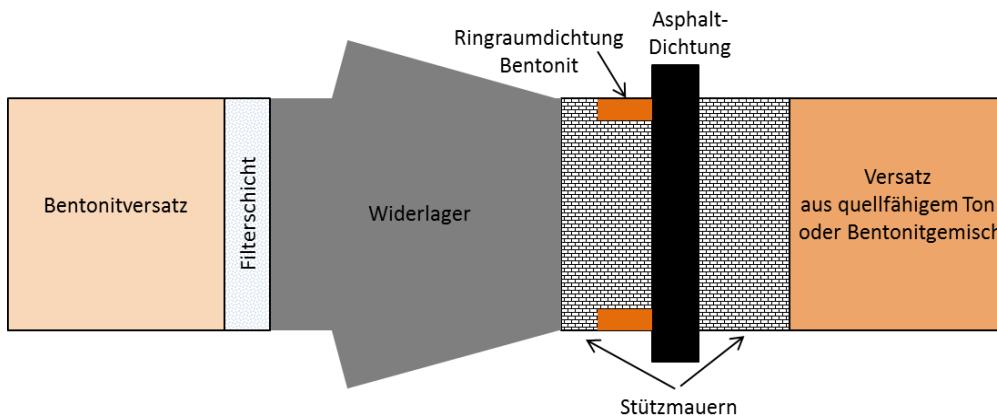


Abb. 3.13: Konzeptvorschlag für Abdichtbauwerk.

3.4.2 Kombinierte Verschlussmodule

Eine Alternative zu dem im vorigen Unterkapitel beschriebenen Ansatz wären Verschlussmodule, wie sie im ersten Entwurf für das in Russland geplante Endlager in Krasnojarsk, ebenfalls im Kristallin, entworfen wurden (Jobmann et al. 2016b). In diesen Entwürfen werden explizit Dichtelemente aus Bentonit und aus Asphalt miteinander kombiniert. Abb. 3.14 zeigt beispielhaft ein Modul für einen Verschluss der Einlagerungsstrecken des geplanten Endlagers in Krasnojarsk. Dieses Modul besteht neben den Widerlagern und Filterschichten im Wesentlichen aus zwei Dichtelementtypen, Bentonit und Asphalt/Bitumen. Während die beiden Bentonitelemente sich mit Wasser aufsättigen, entwickeln sie einen Quelldruck, der auf das in der Mitte liegende Asphalt/Bitumen-Element drückt. Dadurch drücken die Asphaltblöcke auf das eingeschlossene Bitumen, das seinerseits zu den Seiten und damit ein Stück weit in die Kontakt- bzw. Auflockerungszone gedrückt wird. Es soll damit erreicht werden, dass eventuell noch vorhandene Risse in der Auflockerungszone verschlossen werden.

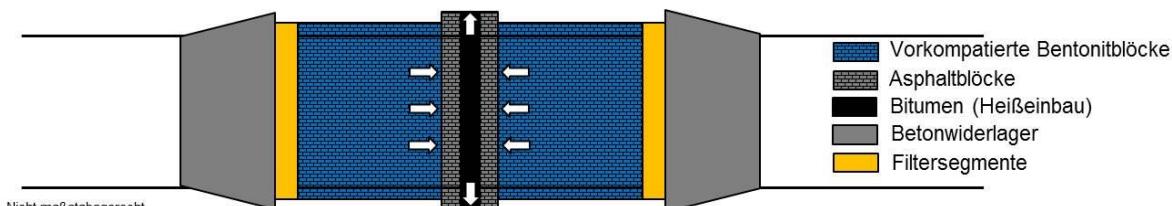


Abb. 3.14: Konzeptioneller Entwurf eines Abdichtmoduls für Einlagerungsstrecken (Jobmann et al. 2016b).

Die Kombination der zwei Materialelemente Bentonit und Asphalt/Bitumen hat den Vorteil, dass von der Langzeitstabilität des organischen Materials Asphalt/Bitumen (chemische und mikrobielle Degradation) nicht zwingend Kredit genommen werden muss. Die Langzeitdichtwirkung wird von den Bentonitelementen übernommen, deren Auslegung hinsichtlich des geplanten Quelldruckes bzw. der volumetrischen Ausdehnung das Zusammendrücken des Asphalt/Bitumens berücksichtigt. Dieses Modul kann ggf. auch mit nur einem Bentonitelement ausgeführt werden, wobei das Asphalt/Bitumen-Element dann an einem Widerlager anliegt. Vorzugsweise sollte das Asphalt/Bitumen-Element dann einlagerungsseitig angeordnet sein. Aufgrund seiner sofortigen Dichtwirkung ist auch im Falle einer frühzeitigen Radionuklidmobilisierung die Abdichtung gewährleistet. Die Funktionsdauer des Asphalt/Bitumen-Elementes kann dann auf die Zeit begrenzt werden, die das (oder die) Bentonitelement(e) zur Aufsättigung und damit zur Quelldruck- und Abdichtentwicklung benötigen.

4 Synthese bisheriger Untersuchungen im Kristallingestein

Im Folgenden wird eine Zusammenstellung bisheriger Untersuchungen und gesammelter Erfahrungen zu Kristallingesteinen als Wirtsgestein in Deutschland gegeben (Weitkamp 2016). Bezuglich der technischen Möglichkeiten für eine Standortuntersuchung im Kristallin wurden zudem Erkundungsmethoden und Ergebnisse zusammengestellt, die in anderen Ländern eingesetzt bzw. erzielt wurden, welche Kristallin als Wirtsgestein berücksichtigen bzw. berücksichtigt haben. Abgerundet wird das Bild durch eine Zusammenstellung von relevanten Gesteinsparametern kristalliner Gesteine, die als Grundlage genommen werden können, um erste technische Konzepte für ein Endlager in kristallinen Formationen zu planen.

4.1 Bisherige Untersuchungen in Deutschland

4.1.1 Voruntersuchungen zur Kristallinstudie

Anfang der 1980er Jahre begann die BGR im Auftrag des Bundesministeriums für Forschung und Technologie, eine Beschreibung der Kristallinvorkommen in Deutschland auf Basis von publizierter Literatur und Archivmaterial zu erstellen. Zwischenberichte dokumentieren den Fortgang der Arbeiten (Bräuer 1984b, Kosinowski & Banchet 1983b). Ziel war es, Alternativen zurendlagerung radioaktiver Abfälle in Salzgestein aufzuzeigen. Dazu wurde zunächst ein allgemeines Konzept mit Bewertungskriterien für die Zusammenstellung eines Kataloges zur Auswahl potenziell geeigneter Gesteinskörper erarbeitet. Folgende Bewertungskriterien wurden dazu verwendet:

- Geographie (Lage und Gesamtoberfläche)
- Wirtschaftliche Nutzung (Infrastruktur, Landnutzung [%], Natur- und Landschaftsschutzgebiete)
- Hydrologie (Gewässernetz, Vorfluter, Niederschlag, ggf. Quellen)
- Tektonik (Richtung Störungen und Klüfte, Lage bzgl. wichtiger tektonischer Elemente, seismische Aktivität)
- Regionale Kristallinkomplexe
- Morphologie (aufgeschlossene Fläche, Höhenlage)
- Geologie (strukturelle Ausbildung, Alter, ggf. Profilschnitte)
- Petrographie (Gesteinstyp, Struktur, Verwitterungsverhalten, angrenzende Gesteinstypen)

Die Voruntersuchungen beschränkten sich auf die an der Oberfläche anstehenden bzw. unter geringer Bedeckung auftretenden Kristallinkomplexe mit magmatischen und hochmetamorphen Gesteinen. Diese lassen sich in vier große, im Folgenden beschriebene, Bereiche aufgliedern.

4.1.1.1 Das Bayerische Kristallin am Westrand der Böhmischem Masse

Für die Einzelbeschreibungen der Kristallinvorkommen wurden Informationen zu den oben genannten Bewertungskriterien gesammelt und aufbereitet (Kosinowski & Banchet 1983a). Dabei zeigte sich, dass für den nördlichen Oberpfälzer Wald und z.T. auch für andere Granitvorkommen keine detaillierten geologischen Karten im Maßstab 1:25.000 zur Verfügung standen. Die Originaldaten stammten aus den Jahren 1927-1981 und waren insgesamt nicht

für eine Detailbewertung geeignet. Aus hydrogeologischen Bohrungen zur Wassergewinnung konnten Erkenntnisse zum 50-60 m mächtigen Verwitterungshorizont oberhalb des Festgestein gewonnen werden. Nur vereinzelt reichten Bohrungen auch bis ins anstehende Festgestein. Diese zeigten, dass die Zahl der Wasserwegsamkeiten zwar mit der Tiefe abnimmt, aber auch in Tiefen von 200 m unter Geländeoberkante noch hydraulisch leitfähige Klüfte und Störungszonen existieren, die eine erhöhte Permeabilität aufweisen können.

Alle untersuchten Granite entstanden aus im Permokarbon posttektonisch intrudierten Schmelzen, weshalb sich während der Abkühlungsphase relativ homogene und kaum geschieferete Gesteine entwickeln konnten. Nur für einige größere Störungszonen, wie den Nordwest-Südost streichenden Pfahl im Bayerischen Wald, an dem auch seismische Aktivität registriert werden konnte, wurden Schieferungen beschrieben, die vermutlich in Phasen mit tektonischer Aktivität in Mylonitzonen entstanden sind. Während für die Granitmassive Nordostbayerns in der Tiefe eine Verbindung angenommen wurde, konnten die Vorkommen im Bayerischen Wald als einzelne Plutone beschrieben werden. Es wurde festgestellt, dass für die Entstehung der Massive zumeist mehrere aufeinander folgende Intrusionsereignisse nötig waren, die sich häufig lithologisch voneinander unterscheiden. Die letzte Intrusionsphase war oft durch pegmatitische oder aplitische Ganggesteine gekennzeichnet, die in Schwächezonen des bereits erstarrten Granits und des Nebengesteins eindrangen. Zonen mit einer hohen Dichte solcher Ganggesteine zeichneten sich oft auch durch eine starke Klüftung aus.

4.1.1.2 Die Schwarzwälder Granitmassive

Hier wurden ebenfalls die Einzelbeschreibungen entsprechend den festgelegten Bewertungskriterien erstellt, wobei gemäß der landschaftlich-geographischen Gliederung in Nord-, Mittel und Südschwarzwald auch bei den Granitvorkommen eine Dreiteilung vorgenommen wurde (Kleine Bornhorst et al. 1984). Auch hier lagen geologische Detailkarten im Maßstab 1:25.000 nicht flächendeckend vor, wobei die ältesten Kartenblätter aus dem 19. Jahrhundert stammen.

Das ermittelte Intrusionsalter der Granite schwankte zwischen Oberdevon bis Oberkarbon. Die beschriebenen, auch überregional auftretenden, tektonischen Richtungen wie z.B. herzynisches (NW/SE) oder erzgebirgisches (NE/SW) Streichen zeigten sich auch in der Anlage des Gewässernetzes. Als besonders markant wurde die Randstörung entlang der Schulter des Oberrheingrabens erkannt. Die Gneise, Granite und Granitporphyre des Grundgebirges haben ein ähnliches hydrogeologisches Verhalten, was sich in einer allgemein geringen Schüttung von aus dem Grundgebirge austretenden Quellen mit geringer Wasserhärte und hohen Gehalten an Sauerstoff und Kohlenstoffdioxid zeigt. Der Schwarzwald wurde in Abschnitten als deutlich erdbebengefährdet charakterisiert, wobei sich gegenüber dem Oberrheingraben größere Herdtiefen abzeichneten. Wie zu erwarten war, konnten die meisten stärkeren Erdbeben in Bruchzonen mit quartärer Tektonik lokalisiert werden.

4.1.1.3 Die Kristallinmassive des Odenwaldes, des Spessarts und des Westharzes

Als Grundlage für die Darstellung der Geologie der einzelnen Kristallingebiete dienten neben Übersichtskarten hauptsächlich geologische Karten im Maßstab von 1:25.000, die zwischen 1891 und 1981 publiziert wurden und mehrheitlich einer älteren Kartengeneration angehören (Bräuer 1984a). Im Odenwald wurden überwiegend granitische bis granodioritische Gesteine beschrieben, während der Spessart hauptsächlich durch Gneise geprägt ist. Als Rahmengesteine der einzelnen Massive treten vielfach Quarzite und Schiefer in Erscheinung, was insgesamt sowie auch innerhalb der einzelnen Komplexe ein relativ inhomogenes Erscheinungsbild erzeugt. Dies trifft auch auf den Westharz zu, wo neben Graniten und Gabbros auch kontaktmetamorph überprägte Einheiten um die Intrusionen zu beobachten sind. Auch innerhalb zusammenhängender Einheiten wie dem Brockenmassiv variiert die Ausprägung mitunter beträchtlich. Das Intrusionsalter der Granite wurde als variszisch angegeben, wobei die Granite des Westharzes etwas jünger zu sein schienen und tektonisch weniger beansprucht waren. Der lithologisch-petrographische Aufbau spiegelt sich auch im Verwitterungsverhalten der Gesteine wider. Gabbros und Gneise erwiesen sich gegenüber oft tiefgründig verwitterten Graniten insgesamt als resistenter.

Die Hauprichtungen des Gewässernetzes spiegeln vielfach auch die großräumigen Störungsmuster im tieferen Untergrund wider. Als wichtiges tektonisches Element im Bereich des Westharzes wurde die Harznordrandstörung identifiziert, an der aber weder rezente Bewegungen noch tektonische Aktivität festgestellt werden konnten. Dies steht im Gegensatz zu aktiven Randstörungen mit rezenten Bewegungen und seismischer Aktivität, die im Bereich von Odenwald und Spessart zu beobachten waren. In diesem Zusammenhang wurde vor allem auf die Bedeutung der östlichen Schulter des Oberrheingrabens hingewiesen.

4.1.1.4 Nicht-salinare Formationen auf dem Gebiet der fünf neuen Bundesländer

Nachdem für das Gebiet der alten Bundesländer die Arbeiten am Katalog der Kristallinvorkommen im Jahr 1984 abgeschlossen worden waren, wurden die Arbeiten auf das Gebiet der neuen Bundesländer ausgeweitet, um einen möglichst einheitlichen Kenntnisstand für Gesamtdeutschland gewährleisten zu können (Bräuer et al. 1991). Dazu wurde in einer ersten Phase zunächst eine Übersicht zu Standortmöglichkeiten in Bereichen mit kristallinen Gesteinen erstellt, an denen detaillierte Untersuchungen sinnvoll wären. Dazu wurde zusätzlich auch der internationale Kenntnisstand bei der Endlagerung in kristallinen Formationen berücksichtigt. Aus Projekten in der Schweiz und Schweden wurden wichtige Randbedingungen für die Endlagerung im Kristallin abgeleitet, deren Bedeutung auch für deutsche Vorhaben erkannt wurde. Dazu zählten u.a. eine maximal zulässige natürliche Felstemperatur von ca. 55-60°C in der Teufe eines Endlagers und die daraus resultierende maximale Einlagerungstiefe von 1200 m sowie hydrodynamische, hydrogeologische und tektonische Faktoren.

Für die alten Bundesländer wurde noch einmal auf die bereits in den Vorberichten beschriebenen variszischen Intrusionen hingewiesen, wobei zusätzlich auch die Möglichkeit erwogen wurde, dass sich weitere Komplexe in 500 bis 1.000 m Tiefe unter mesozoischer Bedeckung im Bereich der Vindelizischen oder der Spessart-Rhön-Schwelle befinden könnten. Jüngeren postorogenen Intrusionen wurden wegen ihrer geringeren Klüftigkeit Vorteile gegenüber älteren frühvariszischen Komplexen eingeräumt.

Für das Gebiet der ehemaligen DDR lagen keine speziellen Voruntersuchungen zu nichtsalinierten Wirtsgesteinen vor. Die geowissenschaftliche Forschung war dort vor allem auf die Rohstoffgewinnung und Ingenieurgeologie fokussiert, so dass zwar umfassendes geologisches Material über den Südteil der ehemaligen DDR vorlag, diese Daten aber noch aufwendig gesichtet und aufbereitet werden mussten. Die Suche wurde aufgrund der mächtigen meso- und känozoischen Bedeckung im Norden vor allem auf den Süden konzentriert, wo Gesteine des Präzechstein relativ oberflächennah angetroffen werden. Für die Kristallin-Bereiche der neuen Bundesländer wurde eine tabellarische Übersicht erstellt, die neben den wichtigsten Eigenschaften und Kenngrößen des jeweiligen Gesteinskomplexes bereits eine grobe Erstbewertung enthält. Zusätzlich wurde am Lausitzer Granodioritkomplex exemplarisch eine Detailbewertung vorgenommen.

Hinsichtlich der Fragestellung nach Bereichen mit Kristallin unter Überdeckung wurde mit Hilfe geophysikalischer Daten die vermutete Kristallinverbreitung in 2000 m Tiefe unter Geländeoberkante in einer Karte dargestellt und der dadurch zu erwartende Flächenzuwachs verdeutlicht (Bräuer et al. 1991: Anlage 6).

In einer zweiten Phase wurden zur besseren Übersichtlichkeit einige Vereinfachungen vorgenommen, so dass letztendlich 7 Einheiten bearbeitet wurden (Bräuer et al. 1993). Dazu wurde auch das für die alten Bundesländer entwickelte Bewertungsschema leicht modifiziert und inhaltlich nach den Themenkomplexen Geographie, regionale Geologie, Tektonik, Hydrogeologie, Wirtsgesteinseigenschaften, Seismizität und Bergbau gegliedert. Um eine Vorauswahl und eine Empfehlung für die Weiterbearbeitung in einem abschließenden Bericht treffen zu können, wurden aus den beschriebenen Standortkriterien geogene, ökologische und geotechnisch-ingenieurgeologische Faktoren bestimmt, die als Ausschlusskriterien herangezogen werden konnten.

Aus ökologischer Sicht wurden Gebiete wie großflächige Nationalparke, Naturparke und Biosphärenreservate sowie die Nähe zu industriellen Ballungszentren berücksichtigt. Geogene Faktoren waren seismisch aktive Zonen und Bereiche mit hoher Störungsdichte. Als geotechnisch-ingenieurgeologische Faktoren kamen vor allem die Flächengröße und Flächenform sowie die Tiefenlage des Wirtsgesteins zum Tragen. Die erforderliche Fläche für ein Endlagerbergwerk wurde mit 1-2 km² angenommen wobei eine durchschnittliche Breite des Kristallinvorkommens von 3 km nicht unterschritten werden sollte und die Anlage des Einlagerungsbereiches in einer Tiefenlage von etwa 500 m möglich sein sollte. Dies führte dazu, dass kristalline Einzelkomplexe mit unbekannter Tiefenlage des Kristallinvorkommens, die kleiner als 10 km² waren, nicht berücksichtigt wurden. Bei kleineren Vorkommen wirkten sich auch intensiver ober- und untertägiger Bergbau sowie stark varierende mechanische und physikalische Gesteinseigenschaften negativ aus.

Das Ergebnis wurde in abgewandelter Form auch für den Abschlussbericht (Bräuer et al. 1994) verwendet. Damit wurde dieser Ansatz insgesamt zur Grundlage für die Vorauswahl aus allen in den Voruntersuchungen betrachteten Kristallinvorkommen.

4.1.2 Kristallinstudie: Untersuchung und Bewertung von Regionen in nicht-salinaren Formationen

4.1.2.1 Vorauswahl

Für die Vorauswahl von Kristallinvorkommen aus den Voruntersuchungen wurden zunächst allgemeine Standortkriterien wie z.B. die geographischen, tektonischen und hydrogeologischen Voraussetzungen beschrieben (Bräuer et al. 1994). Diese allgemeinen Kriterien wurden in drei wesentliche Gruppen unterteilt. Als ausschließende Kriterien wurden solche angesehen, die als unvereinbar mit der Anlage eines Endlagerstandortes galten. Limitierende Kriterien hatten negative Auswirkungen und schränken dadurch die Eignung eines Kristallinkomplexes ein. Demgegenüber beschrieben positive Kriterien aus geowissenschaftlicher Sicht günstige Voraussetzungen für die Anlage eines Endlagerstandortes.

Aus allen in den Vorstudien beschriebenen Kristallinvorkommen wurden zunächst mit Hilfe der ausschließenden Kriterien ungeeignete Vorkommen identifiziert, während positive und limitierende Kriterien erst im nächsten Schritt, der Bewertung potentiell geeigneter Gesteinsvolumina, zur Anwendung kamen. Zu den ausschließenden Faktoren zählten zum einen ökologische Gesichtspunkte wie geschützte Naturareale, Ballungszentren, großflächige Stauhaltungen und ungünstige Grundwasserverhältnisse. Des Weiteren wurden geogen bedingte Faktoren wie tektonisch oder seismisch aktive Zonen, die Verwerfungsdichte, rezenter oder zukünftig zu erwartender Magmatismus und Krustenbewegungen herangezogen. Unter den geotechnisch-ingenieurgeologischen Faktoren als dritter Kategorie wurden z.B. Ausdehnung und Tiefenlage, die Beeinträchtigung durch Bergbau und variierende Gesteinseigenschaften innerhalb eines Komplexes zusammengefasst. Das Ergebnis der Vorauswahl wurde in tabellarischer Form, getrennt nach alten und neuen Bundesländern, aufgelistet. Stichpunktartig wurden dort die für die Entscheidung zur Weiterbearbeitung maßgeblichen Anhaltspunkte unter einer der drei oben genannten Faktorengruppen aufgelistet. Auf diese Weise wurden mittels allgemeiner Standortkriterien und Ausschlusskriterien 28 von 117 betrachteten Vorkommen selektiert.

4.1.2.2 Detailbetrachtung und Bewertung

Nur die 28 ausgewählten Kristallinregionen waren Gegenstand der weiteren Bearbeitung. Die Charakterisierung konzentrierte sich dabei, sofern keine Abhängigkeiten zu benachbarten Gebieten vorlagen, auf das jeweilige Einzelkristallin. Kartenübersichten ergänzen das Bild und wurden in Atlasform zusammengestellt. Die Darstellung erfolgte nach einem einheitlichen Schema, um eine bessere Vergleichbarkeit der maßgeblichen Faktoren zu erreichen. Dies geschah vor dem Hintergrund der Frage, ob günstige bzw. weniger günstige Voraussetzungen für die spätere Standortsuche gegeben waren. Die berücksichtigten Faktoren wurden für die geowissenschaftliche Bewertung der Kristallinvorkommen in fünf gewichteten Gruppen von Merkmalskategorien zusammengefasst, die sich an den folgenden allgemeinen Standortkriterien orientierten:

- I) Tektonik, Gesteinshomogenität, Hydrogeologie
- II) Bergbau
- III) Hydrographie
- IV) Seismizität
- V) Zusätzliche Angaben (Alter, effektive Flächengröße etc.)

Hervorgehoben wurde insbesondere die Bedeutung von *Gruppe I*, da z.B. geologisch relativ instabile Regionen die Eignung eines Vorkommens stark einschränken. Die Raumanordnung und Häufigkeit bedeutender Bruchstrukturen wurden ebenfalls als wichtige Eignungskriterien gesehen. Aufgrund der Komplexität ihrer geochemischen Eigenschaften wurden petrographisch inhomogene Kristallinkomplexe als schwerer zu beurteilen eingestuft. Darüber hinaus wurde Wert auf eine möglichst flächendeckende Verteilung der verfügbaren geowissenschaftlichen Informationen in der betrachteten Region gelegt. Allerdings lassen sich gesicherte quantitative Aussagen nur mit speziellen Standortuntersuchungen treffen, die aber für die Kristallinstudie nicht durchgeführt wurden und deshalb durch Interpretation der zur Verfügung stehenden Daten mit Hilfe von Expertenwissen ausgeglichen werden mussten.

Für die Bewertung in *Gruppe II* war sowohl der übertägige als auch prioritär der untertägige Bergbau zu berücksichtigen. Im Extremfall können vorhandene Bereiche mit Altbergbau große Areale eines Kristallinvorkommens für die zukünftige Nutzung als Wirtsgestein ausschließen. Durch die beim Auffahren von Bergwerken entstehenden Hohlräume und Auflockerungszonen im umgebenden Gebirge besteht die Gefahr, dass entstehende Wasserwegsamkeiten die Standorteigenschaften negativ beeinflussen.

In *Gruppe III* wurden neben der Anzahl und Fläche von Stauhaltungen die Dichte der Vorfluter und ihre Hauptentwässerungsrichtungen, die sich ggf. an bedeutenden Bruchstrukturen orientieren, betrachtet.

Die in *Gruppe IV* bewertete Seismizität kam, wenn überhaupt, nur in Teilbereichen der Kristallingebiete zum Tragen, da dieses Kriterium bereits anhand der Erdbebenzonen nach DIN 4149 für die Vorauswahl angewandt wurde.

Weitere aus geowissenschaftlicher Sicht als nachrangig eingestufte Faktoren wie die „effektive“ Flächengröße, das Vorflutergefälle sowie die Beschaffenheit des Deckgebirges und das Gesteinsalter wurden in der *Gruppe V* zusammengefasst. Das Vorflutergefälle kann im Hinblick auf Erosionsvorgänge für die Langzeitbetrachtung von Interesse sein. Der Einfluss des Deckgebirges wurde differenziert betrachtet, da es einerseits als ein zusätzlicher natürlicher Schutz fungieren, andererseits aber auch den Kenntnisstand über das liegende Kristallin negativ beeinflussen kann. Die Altersdatierung und Rekonstruktion der Platznahme der einzelnen Plutone innerhalb eines Komplexes konnte z.B. beim Lausitzer Granodioritkomplex mit Hilfe einer biostratigraphischen Datierung der Kontaktgesteine durchgeführt werden, die präzisere Daten als radiometrische Methoden lieferte. Die Hypothese, dass ein hohes Gesteinsalter automatisch mit verstärkter tektonischer Beanspruchung einhergeht, ließ sich nicht generell auf alle Fälle übertragen. Dies führte zu der Feststellung, dass eine zufriedenstellende Klärung nur in Verbindung mit detaillierten tektonischen und gefügeanalytischen Standortuntersuchungen erreicht werden kann. Als Faktor in Bewertungsgruppe V mit dem größten Einfluss auf die Standortwahl wurde die effektive Größe des jeweiligen Kristallins identifiziert. Unter effektiv wurde die Nettofläche verstanden, die nach Abzug aller konkurrierenden Nutzungen und Nutzungseinschränkungen verbleibt. Damit waren Nationalparke, Naturschutzgebiete, Siedlungsflächen, Untertage-Altbergbau und Talsperren gemeint. In diesem Zusammenhang kam neben der reinen Flächengröße zusätzlich auch die Geometrie

der Flächen zum Tragen, da z.B. schmale langgestreckte Flächen Nachteile gegenüber kompakteren Formen aufweisen.

Die in den fünf Merkmalsgruppen zusammengefassten Faktoren und Kriterien bildeten die Grundlage für die komplexe Bewertung der 28 Vorkommen nach qualitativen und quantitativen Gesichtspunkten. Zur Einordnung untereinander (Relativwertung) wurden drei- bzw. sechsstufige Wertungsgruppen für jeden der 15 Einzelfaktoren entworfen. Beispielhaft ergibt eine Einordnung des dreistufig bewerteten Deformationsgrades aus Gruppe I in Stufe 2 (mittel/2 Punkte) unter Berücksichtigung des zur Gewichtung innerhalb der Gruppe festgelegten Multiplikators 3 ein Ergebnis von sechs Punkten. Die fünf Produkte zu den Faktoren in Gruppe I wurden aufsummiert und anschließend in einer dreistufigen Wertungsgruppe zugeordnet. Für die Zusammenstellung über die Gruppen I-IV in einer sechsstufigen Wertungsgruppe wurde wiederum über einen Multiplikator gewichtet. Für die Gesamtbewertung wurde dann aus der kumulierten Wertung der Gruppen I-IV (1-6 Punkte) und der Wertung der Gruppe V (1-3 Punkte) die Summe gebildet und sechsstufig dargestellt. Hierbei ist zu beachten, dass sowohl durch die Wahl der Stufen innerhalb einer Wertungsgruppe als auch durch den Einsatz eines Multiplikators die Gewichtung modifiziert wurde und die Schwerpunkte deshalb in den Gruppen I und II lagen.

Abschließend wurden die für die Eignungseinschätzung in geowissenschaftlicher und ökologischer Hinsicht maßgeblichen Vor- und Nachteile der einzelnen Kristallinvorkommen kurz in tabellarischer Form zusammengetragen. Als wichtigstes Kriterium der Gruppe V wurde die sogenannte effektive Flächengröße des an der Oberfläche aufgeschlossenen Kristallins hervorgehoben, d.h. diejenige Fläche, mit der nach Abzug limitierender Nutzungspräferenzen noch tatsächlich zu rechnen ist. Das Verhältnis der Gesamtfläche der einzelnen Kristallinvorkommen zu ihrer effektiven Flächengröße wurde in Form eines Balkendiagramms dargestellt (Bräuer et al. 1994: Tab. 4, S. 133). Zu beachten ist hierbei, dass nicht alle entgegenstehenden Nutzungen wie untertägiger Bergbau und Wasserschutzgebiete vollständig berücksichtigt wurden bzw. werden konnten. Dies kann zur Folge haben, dass sich die zur Verfügung stehende Fläche in einigen Fällen weiter verringert.

Die Gesamteinschätzung zur Einzelbewertung und vergleichenden Gesamtbewertung nach geowissenschaftlichen und ökologischen Kriterien ergab, dass die großen Kristallinvorkommen im Allgemeinen die günstigsten Voraussetzungen aufweisen. Die zur weiteren Bearbeitung als besser geeignet erscheinenden Kristallinvorkommen wurden abschließend, wie folgt, aufgelistet:

Bayerisches Kristallin

- Teilbereich des Fichtelgebirges (Bayern/ca. 360 km²)
- Nördlicher Oberpfälzerwald (Bayern/ca. 385 km²)
- Saldenburg-Granit (Bayern/ca. 137 km²)

Erzgebirge/Vogtländisches Schiefergebirge

- Graugneiskomplex (Sachsen/ca. 1347 km²)

Granulitgebirge

- Granulitkomplex (Sachsen/ca. 530 km²)

Lausitzer Scholle

- Granodiorit von Radeberg-Löbau (Sachsen/ca. 1038 km²)

- Granodiorit von Pulsnitz (Sachsen/ca. 716 km²)
- Granodiorit von Zawidow (Sachsen/ca. 279 km²)

Halle-Wittenberger Scholle (verdecktes Vorkommen)

- Granodiorit von Pretzsch (Sachsen-Anhalt/ca. 164 km²)
- Granodiorit von Prettin (Sachsen-Anhalt, Brandenburg, Sachsen/ca. 221 km²)

4.1.3 Digitale Aufbereitung der Daten

Im Rahmen des Fachinformationssystems Geowissenschaften und Entsorgung von Abfällen (FIS GEA) (Maurer-Rurack et al. 2008) wurden zwar alle maßgeblichen Wirtsgesteine bearbeitet, aber nur für das Wirtsgestein Kristallin ein erster Ansatz für ein spezifisches Auswahl- und Bewertungsverfahren entwickelt. In der ersten Phase des Projektes FIS GEA (Balzer & Maurer 2003) wurden die Erkenntnisse aus der bereits vorliegenden Kristallinstudie verwendet. Anhand dieser Datengrundlage sollte die Methodik und Machbarkeit eines GIS-gestützten Auswahl- und Bewertungsverfahrens für die Ausweisung von alternativen Regionen und Gebieten aus den, nach der in Bräuer et al. (1994) dokumentierten Vorauswahl, verbliebenen 28 Vorkommen getestet werden. Dazu wurden bei den 28 selektierten Vorkommen inkl. ihrer Rahmengesteine Unterschiede in den Erkundungsdaten betrachtet und eine mathematisch gestützte vergleichende Bewertung angewendet, die ein detailliertes Ranking lieferte. Die Rahmengesteine um die eigentlichen Kristallinkerne wurden als sogenannte Kristallin-Regionen betrachtet, die als 11 eigenständige Untersuchungsgebiete bearbeitet wurden. Die Fläche dieser Regionen konnte dabei um ein Vielfaches größer als die der umschlossenen Kerne sein, wobei auch mehrere Kristallinkerne innerhalb einer Region vorkommen konnten.

Es wurde eine Vielzahl kristallinspezifischer Geofach- und Geobasisdaten entsprechend den Vorgaben zu Ausschluss- und Abwägungskriterien aus AkEnd (2002) und Bräuer et al. (1994) für das Fachinformationssystem berücksichtigt. Wegen fehlender flächenhafter Informationen wurde keine Auswertung hinsichtlich Tiefenlage und Mächtigkeit der untersuchten Gesteine durchgeführt. Für die Aufstellung der Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen konnten die Ausführungen des AkEnd nur z.T. mitberücksichtigt werden, da die Ergebnisse des AkEnd-Abschlussberichtes erst kurz vor Fertigstellung des FIS-GEA-Vorberichtes zur Phase-1 (Kristallin) (Balzer & Maurer 2003) vorlagen. Stattdessen wurden vornehmlich die international anerkannten Grundanforderungen an ein Standortgebiet für ein geologisches Tiefenlager nach NAGRA (2002) implementiert. Hierbei standen die geologische Langzeitstabilität, günstige Wirtsgesteinseigenschaften, die Ausdehnung des Wirtsgesteinskörpers, Störeinflüsse sowie die Explorierbarkeit und Prognostizierbarkeit im Vordergrund.

Im ersten Schritt des beim FIS GEA angewendeten Auswahl- und Bewertungsverfahrens wurden zunächst sechs Ausschlusskriterien angewendet, um die geeigneten Flächen innerhalb eines Untersuchungsgebietes herauszufiltern. Neben Gebieten mit erhöhter seismischer Aktivität fielen Zonen mit rezenten vertikalen Krustenbewegungen und durch Vulkanismus gefährdete Zonen heraus. Außerdem wurde ein Mindestabstand zur Staatsgrenze, Restrikti-

onsflächen wie Schutzgebiete und hydrographische Parameter wie Stauhaltung, Seen und Hauptvorfluter beachtet.

Im zweiten Schritt wurden zur vergleichenden Bewertung sieben Abwägungskriterien definiert und auf die aus Schritt 1 hervorgegangenen Flächen angewendet. Für jedes der sieben Kriterien wurden Abwägungswerte durch das Produkt einer Ranking-Punktzahl mit einem variabel einsetzbaren Wichtungsfaktor berechnet. Die Summe aller sieben gewichteten Abwägungswerte für ein Untersuchungsgebiet liefert den sogenannten Abwägungsindex. Die Spannweite der Abwägungsindizes wurde in drei Klassen mit Gebieten niedriger, mittlerer und hoher Eignung unterteilt und abschließend in einer Karte dargestellt. Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse wurden drei verschiedene Varianten mit betont planungswissenschaftlicher, betont geowissenschaftlicher oder gleicher Wichtung betrachtet.

4.2 Erwartete Erkenntniszuwächse

Da das Medium Internet zur Zeit der Erstellung der Kristallinstudie zwischen 1983 und 1994 im gegenwärtigen Umfang noch nicht zur Verfügung stand, ist zu erwarten, dass sich die Zugänglichkeit und Auffindbarkeit der stetig anwachsenden Menge geologischer Daten stark verbessert hat und auch weiterhin verbessern wird. Literaturdatenbanken im Internet mit umfangreichen Recherchefunktionen erleichtern das Auffinden und Zusammenführen von wissenschaftlichen Informationen. Zusätzlich stehen umfangreiche Fachinformationssysteme der Staatlichen Geologischen Dienste (SGD) Deutschlands zur Verfügung.

Erkenntniszuwächse werden vor allem in den folgenden Bereichen erwartet:

- Geologische Kartenwerke (z.B. Geologische Karte 1:25.000 bzw. 1:50.000)
- Bohrdaten (Informationen z.B. zur Stratigraphie und Petrologie)
- Datierungsverfahren
- Geophysik: Seismik, Geoelektrik, Gravimetrie etc.
- Profilschnitte, 3D-Modelle
- Geothermiedaten
- Geochemiedaten

Zur Datenlage wurde im Jahr 2014 das Übersichtspapier „Der tiefere geologische Untergrund von Deutschland - Kurzübersicht über Verteilung und Dichte geowissenschaftlicher Daten und Informationen“ (BGR 2014) erstellt. Die Ausarbeitung, enthält neben einer allgemeinen Betrachtung zu geowissenschaftlichen Daten über den tieferen Untergrund auch Hinweise zu regionalen und bundesweiten Informationsgrundlagen. Im Anhang befinden sich folgende Übersichtskarten, die Hinweise zur Datenlage liefern:

- Anhang A1: Geowissenschaftliche Karte der BRD (Geologie)
- Anhang A2: Schwerekarte der BRD (Bouguer-Anomalien)
- Anhang A3: Anomalien des erdmagnetischen Totalfelder der BRD
- Anhang A4: Vorkommen von Salzformationen in Deutschland
- Anhang A5: Wirtsgesteine für die Endlagerung radioaktiver Abfälle
- Anhang A6: Übersichtskarte mit tiefen Sedimentbecken in Deutschland
- Anhang A7: Übersichtskarte mit Tiefbohrungen in Deutschland
- Anhang A8: Übersichtskarte mit seismischen Untersuchungen in Deutschland

4.2.1 Datenbanken, Fach- und Geoinformationssysteme

Die SGD Deutschlands haben das gemeinsame Webportal InfoGEO entwickelt (SGD o.J.-b), das die Möglichkeit einer länderübergreifenden Recherche mit Suchfunktionen innerhalb der Veröffentlichungen der Dienste (Produktnachweise) und vorliegender Bohrungen (Bohrpunktachweise) bietet. Zusätzlich können über den Kartenserver bundesweit vorhandene Kartenwerke interaktiv dargestellt und genutzt werden. Für die weiterführende Recherche sind die Internetseiten der SGD verlinkt. Im Folgenden werden drei relevante Fachdatenbanken beispielhaft angesprochen.

4.2.1.1 Bohrdatenbanken

Ein länderübergreifendes Produkt, das über das InfoGEO-Portal erreicht werden kann, ist die „Bohrpunktakarte Deutschland“, die bei der BGR gehostet wird. Diese gemeinsame Internet-Anwendung ist als zentrales Portal vorgesehen, um länderübergreifend einen möglichst aktuellen Überblick über die vorliegenden Bohrdatenbestände zu vermitteln, indem Daten aus den einzelnen Landesportalen zusammengefasst präsentiert werden. Im gemeinsamen Portal noch nicht verfügbar sind nach aktuellem Stand (März 2016) die Bohrdaten der SGD von Mecklenburg-Vorpommern, Rheinland-Pfalz, Hessen, Bayern und des Saarlandes. Der Bearbeitungsstand in den Bundesländern weist noch große Diskrepanzen auf.

4.2.1.2 Kohlenwasserstoff-Fachinformationssystem (KW-FIS):

Das Kohlenwasserstoff-Fachinformationssystem (KW-FIS) wird vom Niedersächsischen Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) betreut. Es umfasst Daten der deutschen Erdöl- und Erdgasindustrie aus dem gesamten Bundesgebiet einschließlich der deutschen Bereiche der Nord- und Ostsee. Mit dieser großen räumlichen Ausdehnung und einer hohen Vollständigkeit ist das KW-FIS gerade in Bezug auf Tiefbohrungen, die auch für die Erkundung kristalliner Wirtsgesteine in Deutschland wichtig sind, eine relevante Informationsquelle.

4.2.1.3 Geothermie

Informationen zur erwarteten geothermischen Häufigkeit des Untergrundes sind auch bei der Eignungseinschätzung von Wirtsgesteinsformationen nützlich, da hier z.B. Daten zum geothermischen Gradienten, zur Hydrogeologie und Grundwasserbeschaffenheit eine entscheidende Rolle spielen. Das Geothermische Informationssystem GeotIS (LIAG 2006) zeigt die Potentiale und Standorte der tiefen Geothermie in Deutschland. Es setzt sich aus zwei ehemals eigenständigen Modulen zusammen und bezieht auch Daten aus dem FIS-Geophysik mit ein. Das Modul Geothermische Potentiale bietet eine Zusammenstellung von Daten und Informationen über tiefe Grundwasserleiter in Deutschland, die für eine geothermische Nutzung in Frage kommen. Für das Molassebecken in Süddeutschland, den östlichen Teil des Norddeutschen Beckens, Teile des westlichen Norddeutschen Beckens und Teile Hessens lassen sich Verbreitung, Tiefenlage und Temperatur von relevanten geologischen Formationen darstellen. Die Boden- und die Untergrundtemperatur ist – soweit es die Datenlage zulässt – für ganz Deutschland abrufbar. Das Geothermische Informationssystem ist in erster Linie ein Werkzeug zur Qualitätsverbesserung bei der Projektierung geothermischer Anlagen. Trotz des hohen Datenvolumens kann das Geothermische Informationssystem zwar keine lokale Machbarkeitsstudie ersetzen, enthält aber eine Reihe

geologischer und hydrogeologischer Daten, die Hinweise zur Beschaffenheit von Kristallinvorkommen und ggf. überlagernder Gesteinsformationen liefern können.

In diesem Zusammenhang ist ein Projekt zur Exploration von Festgestein mittels 3D-Seismik, das vom LIAG koordiniert wird, nennenswert, das sich mit der seismischen Erkundung kristalliner Gesteinskörper zum Zweck der geothermischen Nutzung befasst (Lüschen et al. 2015). Hier werden neue Verfahren zur bisher kaum angewendeten und wenig erforschten seismischen Exploration von Festgesteinen und insbesondere von internen Zerrüttungszonen entwickelt, die mittelfristig auch für die Erkundung von Endlagerstandorten im Kristallin zum Einsatz kommen könnten. Denn diese Zonen müssten im Gegensatz zur Geothermie, wo sie aufgrund ihrer erhöhten Permeabilität vorteilhaft sind, bei der Suche eines potenziellen Endlagerstandortes im Kristallin gemieden werden.

4.2.2 Weitere Forschungsprojekte mit Bezug zu Kristallingestein als Wirtsgestein in Deutschland

Im Folgenden wird auf eine Auswahl von Forschungsarbeiten verwiesen, die einen Bezug zu Kristallingestein als Wirtsgestein in Deutschland haben.

4.2.2.1 GEISHA-Studie

Eine Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten in Salz und Hartgestein erfolgte im Rahmen der GEISHA-Studie (Papp 1999). Die meisten für die Synthese zur Geologie der Kristallinvorkommen in Deutschland relevanten Informationen wurden in Kapitel 2.3 der GEISHA-Studie dokumentiert. Es wurde auch auf Informationen zurückgegriffen, die im Rahmen eines Vergleichs mit ausländischen Standortregionen zusammengetragen wurden (Bräuer 1994). Der durchgeföhrte internationale Vergleich zeigte, dass die hauptsächlich während der variszischen Orogenese entstandenen deutschen Kristallinvorkommen zwar in den meisten Fällen wesentlich jünger als die zum Baltischen und Kanadischen Schild zählenden sind, sich daraus aber keine geringere tektonische Beanspruchung ableiten lässt. Aufgrund eines unruhigeren geologischen Umfeldes mit stärkerer tektonischer Überprägung ist eher vom Gegenteil, also intensiverer Klüftung, auszugehen. Auch beim flächenmäßigen Größenvergleich zeigten sich deutliche Unterschiede, da deutsche Vorkommen i. d. R. wesentlich kleinräumiger ausgebildet sind. Die Petrographie der kanadischen Granite und damit verbundene weitere Gesteinseigenschaften weichen nur geringfügig von deutschen Vorkommen ab.

Zu beachten war allerdings, dass die geochemische Zusammensetzung der Tiefenwässer besonders in küstennahen Regionen oft nicht vergleichbar mit der von typischen deutschen Kristallinvorkommen ist, da in Meereshöhe auch schon in geringerer Tiefe höher mineralisierte Wässer zu erwarten sind. Hierzu wurde ein internationaler Vergleich der hydrochemischen Verhältnisse von Referenzgrundwässern in kristallinen Gesteinen durchgeführt und tabellarisch dokumentiert. Es zeigte sich, dass für die Abschätzung der Machbarkeit eines Endlagers für hochradioaktive Abfälle vor allem Süßwässer aus der Nordschweiz als Referenzgrundwässer für deutsche Kristallinvorkommen geeignet waren. Es wurde festgestellt, dass die Herausforderung bei der Erkundung kristalliner Gesteine vor allem darin besteht, ausreichend große Zonen mit geringer Klüftung und Durchlässigkeit auszuweisen. Dies macht ein entsprechend ausgerichtetes Erkundungsprogramm unabdingbar (vgl. Kap. 4.3).

Als Vorteile granitischer Gesteine wurden die hohe Standfestigkeit, geringe Löslichkeit und ein im Vergleich zu Salzgestein günstigerer Wärmeausdehnungskoeffizient gesehen. Der Wärmeausdehnungskoeffizient von kristallinen Gesteinen ist geringer als der von Salzgesteinen und wurde daher als günstiger in Bezug auf thermisch induzierte Spannungen eingeschätzt.

4.2.2.2 Tiefenlage der Kristallin-Oberfläche in Deutschland

Da die Bewertung von Kristallingesteinen vor allem auf die an der Oberfläche anstehenden bzw. unter geringer Bedeckung auftretenden Kristallinkomplexe mit magmatischen und hochmetamorphen Gesteinen konzentriert war, wurde mit der BGR-Studie „Tiefenlage der Kristallin-Oberfläche in Deutschland“ (Reinhold 2005) erstmals eine flächenhafte Darstellung der Tiefenlage einer geologischen Stockwerkoberfläche, die in Teilen gleich der „Kristallin-Oberfläche“ ist, vorgenommen.

Nachdem zunächst der Begriff Kristallin definiert wurde, erfolgte die Darstellung der Tiefenlage des Grundgebirges mit Hilfe der vorliegenden Informationen. In Norddeutschland, mit seinen hohen Mächtigkeiten von Sedimentgesteinen, lagen nur wenige Informationen über das Grundgebirge vor, weshalb hier die sogenannte Präperm-Oberfläche als eine stratigraphische Grenzfläche zur Darstellung herangezogen wurde. Wegen fehlender direkter Informationen z.B. durch Bohrungen dienten hier Potenzialfeldmessungen zur indirekten Ableitung der Tiefenlage des Grundgebirges.

Das Grundgebirge wurde in fünf regionalgeologische Zonen unterteilt, innerhalb derer Magmatite und z.B. durch Regionalmetamorphose entstandene Metamorphite als potentielle Wirtsgesteine angesprochen wurden. Die Bestimmung der Tiefenlage des Grundgebirges erfolgte vorwiegend anhand von Bohrungen unter Berücksichtigung von bedeutenden größeren Störungszonen und Strukturen. Es zeigte sich, dass die größten Areale unter einer Sedimentbedeckung von bis zu 1.000 m im Bereich des Moldanubikums und der Mitteldeutschen Kristallinzone lokalisiert sind. Eine zusammenfassende Darstellung zur, nach damaligem Kenntnisstand abgeleiteten, Tiefenlage des Grundgebirges in der Bundesrepublik Deutschland wurde in einer Übersichtskarte festgehalten (Abb. 4.1). Die farblich kodierte deutschlandweite Darstellung der Tiefenlage des anstehenden und überdeckten kristallinen und sedimentären Grundgebirges bzw. der Präpermoberfläche zeigt außerdem bedeutende Störungen, die Reichweite von Deformationsereignissen sowie tektonische bzw. regionalgeologische Einheiten. Anstehendes Grundgebirge befindet sich hauptsächlich im Bereich des Rheinischen und Thüringisch-Vogtländischen Schiefergebirges, des Harzes, Odenwaldes, Spessarts, Schwarzwaldes, Bayerischen Waldes, Erzgebirges und Lausitzer Berglandes. Beckenstrukturen mit Tieflagen, die im Bereich des Norddeutschen Beckens über 8 km unter dem Meeresspiegel erreichen können, befinden sich außerdem im Bereich der Saar-Nahe-Senke und des Alpenvorlandbeckens, der Subherzynen und der Thüringer Senke sowie im Oberrhein-Graben. Die Hauptstreichrichtungen der Störungen sind heryzisch, rheinisch und erzgebirgisch.

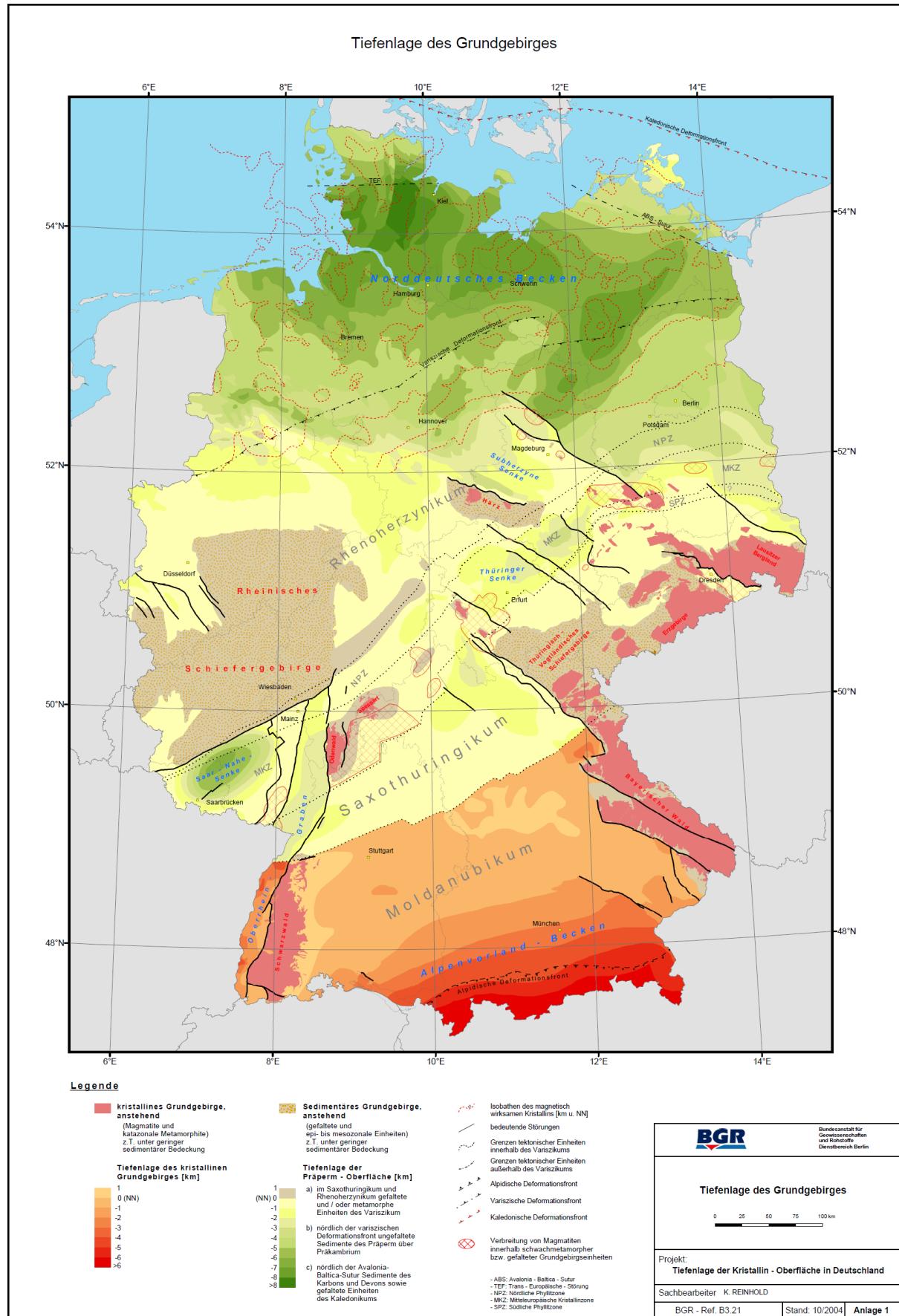


Abb. 4.1: Tiefenlage des Grundgebirges in der Bundesrepublik Deutschland (Reinhold 2005).

4.2.2.3 Nordsee und Norddeutsches Becken

Der Geotektonische Atlas von Nordwest-Deutschland und dem deutschen Nordsee-Sektor (Baldermann et al. 2001), der seit dem Jahr 2004 im Projekt „Geotektonischer Atlas Norddeutschland“ weiterentwickelt wird, bildet die Grundlage für den Großteil der Modellierungsansätze im Bereich des Norddeutschen Beckens. Zur Abschätzung der Potenziale des unterirdischen Speicher- und Wirtschaftsraumes im Norddeutschen Becken ist das seit 2014 laufende Kooperationsprojekt „Tieferer Untergrund Norddeutsches Becken“ (TUNB) angelegt. Darin soll über einen Zeitraum von ca. sechs Jahren ein 3D-Modell des Norddeutschen Beckens als fachliche Grundlage für die weitere Analyse und Bewertung verschiedener Nutzungsoptionen und möglicher Nutzungskonkurrenzen erarbeitet werden. Mittel- bis langfristig soll mit Hilfe der Erstellung eines deutschlandweiten geologischen 3D-Modells des tieferen Untergrundes die Informationsgrundlage vereinheitlicht und erweitert werden.

4.2.2.4 Hydrogeologie

Neben Arbeiten zur Hydrogeologie von kristallinen Gesteinen wie z.B. Stober (1995) und Stober & Bucher (2000) liefert vor allem das von 1987 bis 1995 realisierte Kontinentale Tiefbohrprogramm der Bundesrepublik Deutschland (KTB), auch in hydrogeologischer Hinsicht wichtige Resultate (z.B. KTB 1990a, 1990b, 1991 und 1995). Für den tieferen Untergrund Deutschlands wird z.Z. von der BGR ein Konzept für ein Fachinformationssystem zum Thema Formationswasser erstellt. In diesem sollen möglichst alle verfügbaren Daten zusammengeführt und soweit möglich der Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden. Dazu zählen u.a. auch Daten, die Aussagen zum, bei der Endlagersuche in kristallinen Formationen wichtigen, Grundwasseralter gestatten. Außerdem stehen für den Themenkomplex Grundwasser des Hydrogeologischen Atlas Deutschland (HAD) verschiedene thematische Karten zur Verdeutlichung der Grundwasserverhältnisse in Deutschland zur Verfügung, die dazu geeignet sind, die Betrachtungen der Kristallinstudie zu diesem Thema zu ergänzen.

Da die hydraulische Durchlässigkeit von Klüften eine hohe Relevanz für die geotechnische Nutzung des tiefen Untergrundes in Deutschland hat, wurde von der BGR das Projekt FracReact initiiert. Um Wechselwirkungen zwischen Kluft-Hydraulik und reaktivem Transport aufzuzeigen, wird die zeitliche Entwicklung und räumliche Verteilung solcher Lösungs- und Fällungsprozesse in Relation zur hydraulischen Strömungssituation derzeit erforscht.

4.2.2.5 Seismizität

Erdbebengefährdung ist bei einigen Kristallinstandorten ein zu berücksichtigendes Kriterium. Der Erdbebenkatalog für Deutschland und angrenzende Gebiete für den Zeitraum vom Jahr 800 bis 2008 wurde von Leydecker (2011) veröffentlicht. Um die systematische Zusammenstellung paläoseismischer Befunde und ihre Bewertung für Deutschland und angrenzende Gebiete weiterzuentwickeln, erarbeitet die RWTH Aachen im Auftrag und in Zusammenarbeit mit der BGR seit 2012 eine Grundlagenstudie zu dieser Thematik. Ein Produkt der Studie, die als Pilotstudie im Rahmen eines Programms der Internationalen Atomenergiebehörde IAEA angelegt wurde, ist eine Datenbank mit paläoseismischen Befunden (PalSeisDB), der laufend aktuelle Erkenntnisse wie z.B. die von Grützner (2016) zu holozänen Ereignissen in der Niederrheinischen Bucht hinzugefügt werden sollen.

In der Region Westböhmen/Vogtland arbeitet die BGR in einem Kooperationsvorhaben an Fragestellungen, die die räumliche und zeitliche Abbildung von Fluidaufstiegs wegen in der Erdkruste des dortigen Schwarmbebengebietes betreffen. Auch hier handelt es sich, aufgrund der Nähe des Untersuchungsgebietes zu untersuchungswürdigen Kristallinstandorten, um ein Vorhaben, das brauchbare Informationen liefern könnte.

4.3 Zusammenstellung der in Kristallingesteinen eingesetzten geologisch-geophysikalischen Standorterkundungsmethoden

Die Vorkommen der verschiedenen Wirtsgesteinstypen für die Endlagerung radioaktiver Abfälle sind durch Unterschiede im strukturgeologischen Bau, in der Genese der Gesteine sowie in den geologischen Rahmenbedingungen charakterisiert. Die Gesteine besitzen deshalb unterschiedliche physikalische Eigenschaften. Dies hat gesteinsspezifische Vorgaben bzw. Besonderheiten bei der (Auswahl und) Erkundung der Endlagerstandorte zur Folge. Die wirtsgesteinsabhängigen, auf einer Analyse der langzeitlichen Entwicklung des Multibarrirensystems basierenden Standortanforderungen haben unterschiedliche Erkundungsziele sowie verschiedenartige, bei der Standorterkundung einzusetzende geologisch-geophysikalische Untersuchungsverfahren zur Folge.

Speziell im Hinblick auf den in Kapitel 2.2.2 eingeführten „multiplen ewG“, der seitens der Autoren als aussichtsreiche Variante für den Sicherheitsnachweis angesehen wird, ist ein darauf ausgerichtetes Erkundungsprogramm unabdingbar, um entsprechende geometrische Konfigurationen zu identifizieren.

Nachfolgend wurden Informationen zu den in Endlagerprojekten in den Kristallingesteinen Finnlands, Schwedens, Russlands, Frankreichs und der Schweiz durchgeföhrten geologisch-geophysikalischen Standorterkundungsarbeiten zusammengestellt. An Beispielen werden einige der dabei erzielten Erkundungsergebnisse vorgestellt. Im Mittelpunkt dieser für die übertägigen und untertägigen Standorterkundungen getrennt vorgenommenen Darstellungen stehen Untersuchungen mit Bezug auf langzeitsicherheitsrelevante Informationen für den Standortauswahlprozess. Abschließend erfolgt am Beispiel der Untertagelabore (URL) in Schweden, Finnland und der Schweiz eine Zusammenstellung einiger bei der Standorterkundung bestimmter Parameter für kristalline Wirtsgesteine.

Die im Rahmen dieser Recherchearbeiten gesammelten Daten und Erkenntnisse bilden eine Grundlage für die Planung von Standortsuch- bzw. -erkundungsarbeiten für ein HAW-Endlager in kristallinen Wirtsgesteinen in Deutschland. Außerdem sind die im Bericht zusammengestellten Angaben zu einigen endlagerrelevanten Eigenschaften skandinavischer und schweizerischer kristalliner Gesteine wichtig für die Erarbeitung von deutschen Endlagerkonzepten und Sicherheits- und Nachweiskonzepten für kristalline Wirtsgesteine.

Die einzelnen Phasen des Standortauswahlverfahrens unterscheiden sich hinsichtlich der für den Selektionsprozess genutzten geowissenschaftlichen Informationen und Untersuchungsmethoden. Jede Phase des Auswahlverfahrens ist durch seinen Maßstab der Erkundungsarbeiten und durch bestimmte, vom Maßstab und von den Erkundungszielen abhängige Methoden der geologisch-geophysikalischen Untersuchungen charakterisiert. Die

Anforderungen an die einzusetzenden Untersuchungsmethoden, der Umfang, die Tiefe sowie die notwendige Qualität der Erkundungsarbeiten ergeben sich ausgehend von den Daten, die für den Langzeitsicherheitsnachweis, die Optimierung des Endlagerkonzeptes sowie die bau- und sicherheitstechnische Planung des Endlagers notwendig sind (Wallner et al. 2005).

4.3.1 Ziele und Methoden bei der Anwendung von Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen sowie bei der übertägigen Standorterkundung

4.3.1.1 Schritt 1 des Auswahlverfahrens – Anwendung geowissenschaftlicher Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen

Das Screening bzw. die im Wesentlichen auf bereits existierenden kleinmaßstäbigen bzw. großflächigen meist übertätig gewonnenen geologisch-geophysikalischen Erkundungsergebnissen basierende Ausweisung von Regionen, die nicht für dieendlagerung von hochradioaktiven, wärmegenerierenden Abfällen in Frage kommen, stützen sich meist auf noch sehr allgemeine geologische, planungswissenschaftliche und raumordnerische Informationen. Auf der Grundlage bereits existierender geologischer Karten im Maßstab 1:2.000.000 bis 1:200.000 und von Archivmaterialien werden Regionen bzw. geologisch-tektonische Blöcke ausgewählt, welche die Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen nicht erfüllen. In dieser Phase des Standortauswahlprozesses ist nur zur Gewährleistung einer besseren Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Regionen Deutschlands eine Nacherhebung geologischer Erkundungsdaten, wie z.B. zur Lagerungstiefe und Mächtigkeit der Wirtsgesteine zulässig.

Im Verlaufe der ersten Phase des Standortauswahlprozesses werden bereits vorliegende Informationen zu nachfolgend genannten Themenfeldern berücksichtigt

- Auswertungen der seismischen Aktivitäten in den Standortregionen durch gezielte Abfragen bei nationalen und internationalen Mess- bzw. Beobachtungsnetzen (z.B. Shebalin & Leydecker 1997)
- Zusammenstellung der verfügbaren Informationen zur geodynamischen Entwicklung der betrachteten Standortregionen, zu den regionalen Spannungsfeldern und zu Rohstoffvorkommen
- Auswertung von Fernerkundungsdaten zur Ausweisung von Lineamenten bzw. mächtigen Störungszonen (z.B. Kühn & Hörig 1995)
- Auswertung bereits vorhandener oder Neuerstellung topographischer, geographischer, geomorphologischer und geologischer Karten zur Abgrenzung von mächtigen Störungszonen sowie zum Nachweis lithologischer Grenzen und bereits bestehender Nutzungen (z.B. Tunnel, Schächte, Stollen, Tagebaue)
- GPS- bzw. Satelliten-gestützte Erfassung von Vertikal- und Horizontalverschiebungen einzelner geologischer Blöcke oder Einheiten zwecks Bewertung ihrer Hebungs- bzw. Absenkungstendenzen und ihrer räumlichen Lageänderungen (z.B. Morozov et al. 2007)
- Ergebnisse kleinmaßstäbiger aerogeophysikalischer oder an der Erdoberfläche durchgeföhrter geophysikalischer Messungen, z.B. im Maßstab 1:200.000, die eine Abgrenzung von Störungszonen (Abb. 4.2) sowie Aussagen zum geologischen Tie-

fenbau, zu den Deckgebirgsmächtigkeiten und zur Verteilung unterschiedlicher Gesteine, z.B. auf der Basis von Schwereanomalien ermöglichen

- Spezielle Auswertungen von Archivunterlagen, Bohrungsdaten bzw. Datenbanken zwecks Ermittlung von Informationen zur räumlichen Verbreitung, Zusammensetzung und zu den Eigenschaften der potenziellen Wirtsgesteine (z.B. Daten zu Petrographie, Mineralogie/Geochemie, zu hydraulischen und petrophysikalischen Eigenschaften der Gesteine)
- Ergebnisse geomorphologischer Analysen zur Rekonstruktion und Prognose der Erosionsgeschwindigkeiten sowie der langfristigen Hebungs- und Absenkungsprozesse (Bewertung der Gefahr des Freilegens des Endlagers)
- Analysen der auf aktualistischen Prinzipien beruhenden langfristigen klimatischen Entwicklung der zu vergleichenden Regionen (z.B. Gefahr von Vereisungen und eiszeitlichen Rinnenbildungen)

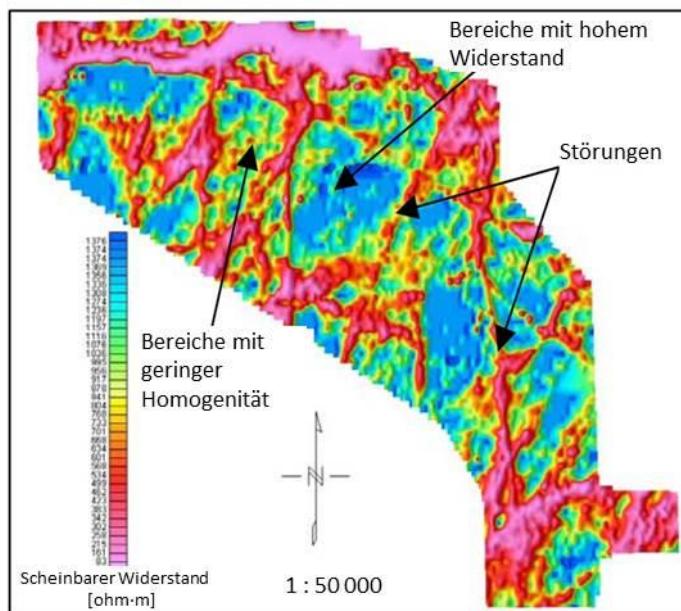


Abb. 4.2:
Nachweis von mächtigen Störungszonen (rot gefärbte Bereiche geringer elektrischer Widerstände) in einem französischen Granitmassiv mittels Hubschrauber-gestützter geoelektrischer Messungen (Andra 2005, übersetzt).

Aufgrund der Unterschiedlichkeit der Datenherkunft und der Datenqualität/-quantität ist es häufig notwendig, die bereits vorhandenen Datensätze hinsichtlich der zu klarenden Fragestellungen aufzuarbeiten, ggf. neu auszuwerten bzw. zu reprozessieren, zu homogenisieren und ggf. durch die Nacherhebung geologischer Erkundungsdaten zu ergänzen, um vergleichbare Informationen für die Anwendung von Mindestanforderungen und Ausschlusskriterien zur Identifizierung von nicht für die HAW-Endlagerung geeigneten Gesteinsformationen bzw. Regionen zu haben. Für die Beschaffung der in dieser Phase des Auswahlprozesses notwendigen Daten, z.B. zu den tektonischen und hydrogeologischen Bedingungen in den Regionen, werden sämtliche in Archiven, speziellen Datenbanken (z.B. Bohrungsdatenbanken der Geologischen Dienste oder in Datenbanken zusammengestellte Ergebnisse seismischer Profilmessungen), Publikationen, internen (nicht publizierten) Firmenberichten oder Web-Portalen vorhandenen Informationen gesichtet.

4.3.1.2 Übertägige Standorterkundung

Zur weiteren Reduzierung der im Ergebnis der Anwendung der Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen nicht ausgeschlossenen, untersuchungswürdigen Endlagerstandorte erfolgen übertägige geologisch-geophysikalische Erkundungsarbeiten. Sie dienen vor allem zur Ermittlung von standortbezogenen Basisdaten, auf deren Grundlage die Einhaltung der Standortanforderungen (insbesondere Ausdehnung, Lage, Mächtigkeit und Teufe des Wirtsgesteins) nachgewiesen werden kann.

Zu Beginn der übertägigen Standortauswahl erfolgt die Ausweisung potenziell geeigneter Standortregionen in kristallinen Wirtsgesteinen vor allem auf der Grundlage struktur- und hydrogeologischer Informationen, insbesondere zur Verteilung und zu den hydraulischen Eigenschaften von Störungszonen sowie zur Klüftigkeit der Gesteine. Diese Daten liegen in Deutschland im Ergebnis der Landeskartierung und regionalgeologischer Studien für viele Regionen bereits vor, müssen ggf. nur noch partiell ergänzt werden.

Die Lokalisierung mächtiger Störungszonen im kristallinen Basement erfolgt z.B. auf der Grundlage kleinmaßstäbiger geologisch-geophysikalischer Erkundungsarbeiten. Dazu zählen z.B. die Auswertung von Satelliten- und Luftbildaufnahmen im Maßstab 1:200.000 bis 1:100.000 (z.B. Landsat 1) oder die Durchführung von gravimetrischen und aeromagnetischen Messungen im Maßstab 1:200.000. Die Ausweisung neotektonisch aktiver Deformationszonen erfolgt meist mittels GPS- oder Satelliten-gestützter Messverfahren (siehe Morozov et al. 2007). In frühen Phasen der Standortsuche kamen in Finnland folgende Untersuchungsmethoden zum Einsatz (POSIVA 2005):

- Auswertungen von Luftbild- und Satellitenaufnahmen,
- Felduntersuchungen (strukturgeologische und lithologische Kartierungen),
- Interpretation von topographischen u.a. Karten zur Identifizierung von Störungszonen sowie
- aerogeophysikalische (geomagnetische und radiometrische) und an der Erdoberfläche durchgeführte Radar- und Seismik-Messungen.

Im weiteren Verlauf der übertägigen Standorterkundung erfolgt die Durchführung der geologisch-geophysikalischen Untersuchungen in einem größeren Maßstab (meist 1:50.000 oder 1:25.000) und auf räumlich eng begrenzten Gebieten. Die wesentlichen Methoden zur übertägigen Standorterkundung sind:

- Geologische und geomorphologische Oberflächenkartierung, ggf. nach Entfernung der Bodenschicht und unter Einbeziehung von Schürfen sowie flachen, bis ca. 10 m tiefen Bohrungen
- Präzisionsmessungen des Oberflächenreliefs (Abb. 4.3 und Abb. 4.4) und spezielle Auswertung von geologischen Kartenwerken zwecks Identifizierung von Störungszonen und lithologischen Grenzen
- Auswertung von Luftbildaufnahmen bzw. Fernerkundungsdaten zur Abgrenzung von mächtigen, möglicherweise neotektonisch aktiven Störungszonen (Abb. 4.5 und Abb. 4.6)

- aerogeophysikalische Messungen, z.B. zur Bestimmung der Lagerungsverhältnisse und der Mächtigkeit sedimentärer Deckgebirgsschichten oder zum Nachweis von mächtigen Störungszonen (Abb. 4.2)
- geodätische Präzisionsnivellelemente und/oder Satelliten- bzw. Flugzeug-gestützte Messungen (z.B. mittels GPS) zwecks Bestimmung der Hebungs- und Senkungsarten einzelner geologisch-tektonischer Blöcke (Abb. 4.7 und Abb. 4.8)
- von Übertage ausgeführte tiefreichende Erkundungsbohrungen und geophysikalische Untersuchungen an der Erdoberfläche und in den Bohrungen (Log-Messungen) zur Analyse des geologischen Baus des Fernfeldes und des Wirtsgesteins
- hydrogeologische Messungen in den Erkundungsbohrungen zwecks Analyse der Grundwasserströmungsverhältnisse und der hydraulischen Eigenschaften der Gesteine im Nah- und Fernfeld des geplanten Endlagers
- felsmechanische und thermophysikalische Untersuchungen an Bohrkernproben
- Bestimmungen der In-situ-Stressbedingungen, z.B. mittels Überbohrversuchen
- geochemische Untersuchungen der Gesteine des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches und des Deck- bzw. Nebengebirges
- geochemische Untersuchungen der Grundwässer, z.B. zur Bestimmung der Grundwasserdynamik und -verweilzeiten oder zum Nachweis von Mischprozessen

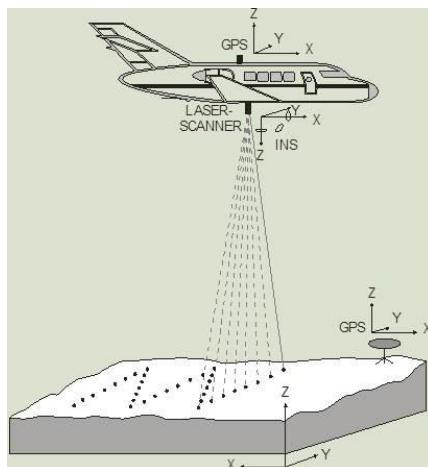


Abb. 4.3: Prinzipskizze zur Durchführung von Flugzeug-gestützten Laser-Scan-Befliegungen zwecks Erarbeitung eines hoch aufgelösten Oberflächenreliefs (z.B. zum Nachweis von mächtigen Störungszonen; Quelle: BGR).

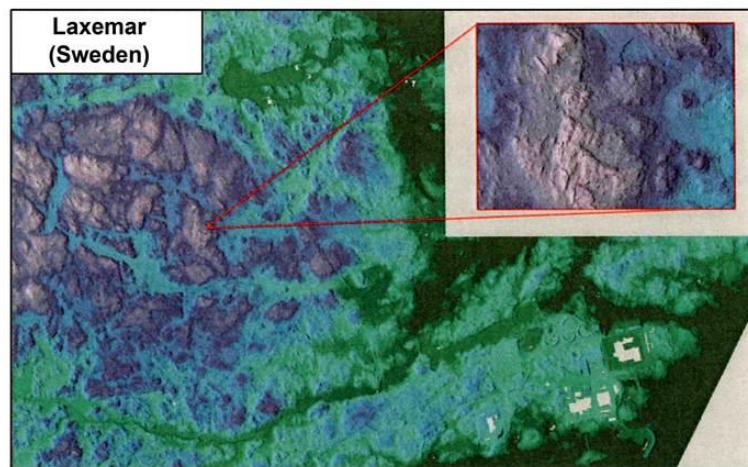


Abb. 4.4: Erfassung des Oberflächenreliefs am Untersuchungsstandort Oskarshamn (Laxemar, SKB 2005a) mittels Flugzeug-gestütztem Laser-Scanner. Das hoch aufgelöste Höhenmodell ermöglicht, ggf. unter Hinzunahme anderer, z.B. geophysikalischer Befunde, den Nachweis von Bruchstrukturen und, bei regelmäßiger Wiederholung, ein Monitoring von Blockbewegungen entlang von Störungszonen.

Hauptschwerpunkte der übertägigen geologischen Erkundungsarbeiten an potenziellen HAW-Endlagerstandorten in kristallinen Wirtsgesteinen sind die Lokalisierung von tektonischen Störungszonen oder Bereichen erhöhter Klüftigkeit sowie die Erfassung der räumlichen Ausdehnung von möglichst homogen zusammengesetzten Wirtsgesteinsblöcken.

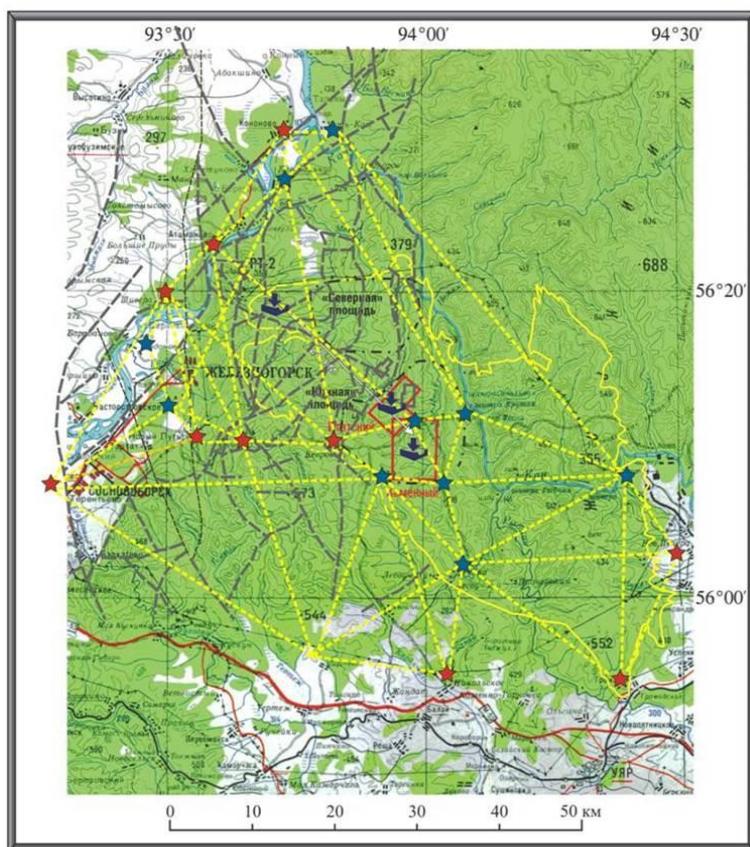


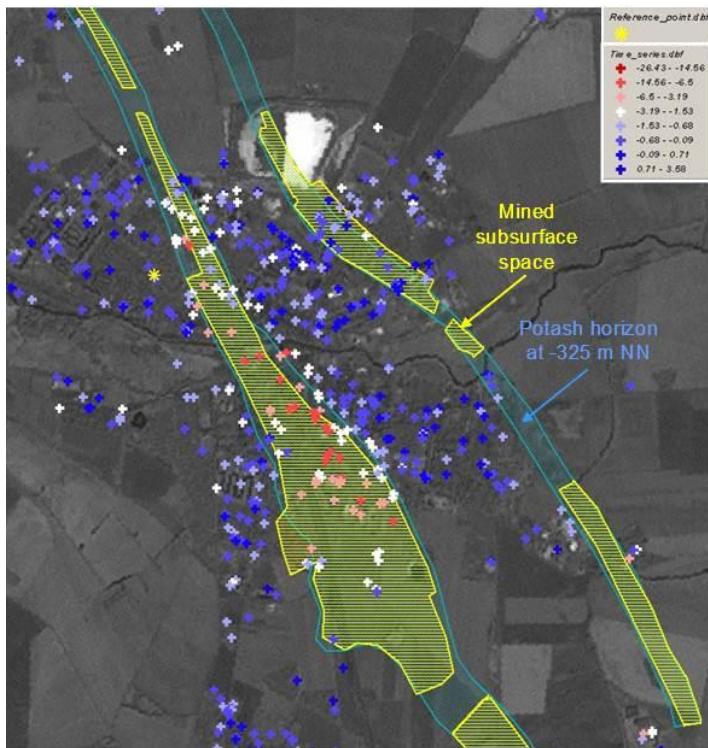
Abb. 4.5:
Lage der Messpunkte für GPS-
gestützte Bestimmungen von
Horizontal- und Vertikal-
verschiebungen einzelner geologisch-
tektonischer Blöcke im Umfeld des
potenziellen HAW-Endlagerstandortes
nahe Krasnojarsk, Russland (Hammer
2005).
★ GPS-Lokation der ersten Serie.
★ GPS-Lokation der zweiten Serie.

Die im Rahmen des finnischen Standortauswahlverfahrens durchgeföhrten übertägigen geologisch-geophysikalischen Erkundungsarbeiten dienten vor allem (Posiva 2005):

- zum Nachweis von Störungszonen und Inhomogenitäten sowie zur Bestimmung ihrer Eigenschaften,
- zur Untersuchung der hydrogeologischen Standortrandbedingungen,
- zur Bestimmung der lateralen und teufenmäßigen Verteilung sowie der Zusammensetzung der granitischen Wirtsgesteine sowie
- zur Analyse des Spannungsfeldes und der tektonischen Entwicklung der vorausgewählten Region.

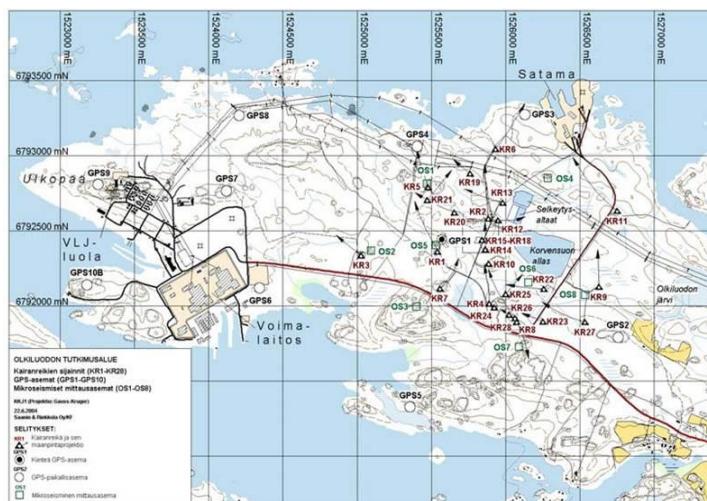
Erfassung von Blockbewegungen bzw. Horizontal-/Vertikalverschiebungen

Für die Erfassung seismischer Ereignisse bzw. neotektonisch aktiver Störungszonen sind präzise geodätische Messungen bzw. detaillierte seismologische und geomorphologische Beobachtungen erforderlich. Empfohlen wird die Errichtung eines mikroseismischen Messnetzes an der Erdoberfläche oder in Bohrungen. Zwecks Erfassung rezent ablaufender geotektonischer Bewegungen ist die Durchführung von Satelliten-gestützten Messungen, d.h. der Einsatz von GPS- oder PS-InSAR-gestützten Messungen von Horizontal- und Vertikalverschiebungen von Messpunkten auf unterschiedlichen Seiten von Störungszonen weit verbreitet (z.B. in Russland, Abb. 4.5 und Abb. 4.6).



Auch in Finnland und Schweden wurden zur Erfassung rezent ablau-fender Deformationsprozesse, d.h. zum Nachweis von Vertikal- und Horizontalbewegungen einzelner Gesteinsblöcke entlang von Stö-rungszonen, GPS-Monitoring-Systeme eingerichtet (Abb. 4.7 und Abb. 4.8).

Abb. 4.6:
Anwendung von PS-InSAR-Messungen zur Bestimmung von vertikalen Messpunktverschiebungen, in diesem Beispiel verursacht durch Nachsackprozesse oberhalb von einstürzenden Grubenräumen (Quelle: BGR).



Alle Messpunkte wurden zweimal pro Jahr vermessen, mit einer Genauigkeit von 1 mm (horizontal) bzw. 2-3 mm (vertikal; Posiva 2005).

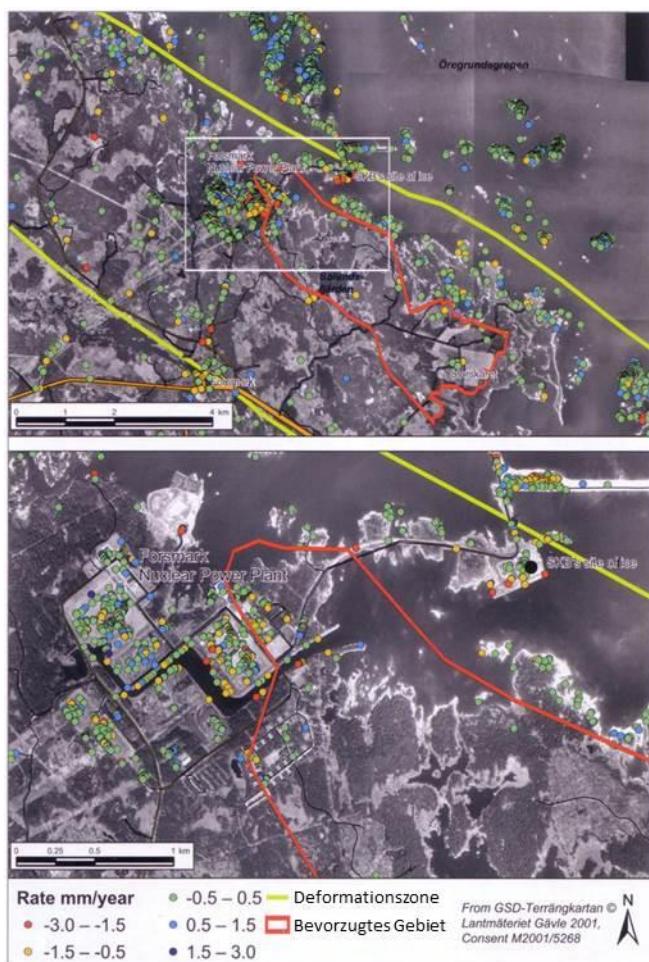
Abb. 4.7:
Lage der GPS-Messpunkte (Kreise) und der
mikroseismischen Messstationen (grüne
Vierecke) im Gebiet Olkiluoto, Finnland
(Posiva 2005).

In Schweden wird das GPS-System zur Erfassung der horizontalen Blockverschiebungen genutzt, ergänzt durch Differential interferometric SAR- (DinSAR-) Messungen der Vertikalsbewegungen (SKB 2005b: Abb. 4.8 und Abb. 4.9).

Anstelle einer allgemeinen Bewertung des seismischen Gefährdungsgrades wird ein Langzeitmonitoring der seismischen Aktivitäten in der Region sowie auf statistischer Grundlage (Erdbebenkatalog) und auf exakten geomechanischen Berechnungen basierende Ableitungen der Wahrscheinlichkeit von Kluftbildungen bzw. -veränderungen durch geodynamische Prozesse empfohlen (siehe z.B. Morozov et al. 2007, Belov et al. 2007).



Abb. 4.8:
Lage der Messpunkte für GPS-gestützte Bestimmungen von Blockverschiebungen am HAW-Endlagerstandort Forsmark, Schweden (SKB 2005b).



Ergänzt werden sollten diese Daten durch Aussagen zum Einfluss Erdbeben-induzierter Scherdeformationen auf im Untersuchungsgebiet existierende Störungszonen und Untertageanlagen. Derartige Berechnungen sind notwendig für die Optimierung der technischen und geotechnischen Barrieren mit dem Ziel einer besseren „Verdauung“ von Erdbeben-induzierten Scherdeformationen bei Überschreitung zulässiger plastischer Deformationen.

Abb. 4.9:
Ergebnisse der Satelliten-gestützten Messungen von deformationsbedingten Höhenverschiebungen am Standort Forsmark, Schweden (SKB 2005b).

Lokalisierung von Störungszonen

Für die Lokalisierung von Störungszonen werden bei Vorhandensein von i.d.R. mehr als 30 m mächtigen Sedimentschichten oberhalb des kristallinen Wirtsgesteins gezielt Erkundungsbohrungen niedergebracht sowie oberflächige und bohrlochgeophysikalische Messungen, inklusive crosshole-tomographische Untersuchungen eingesetzt.

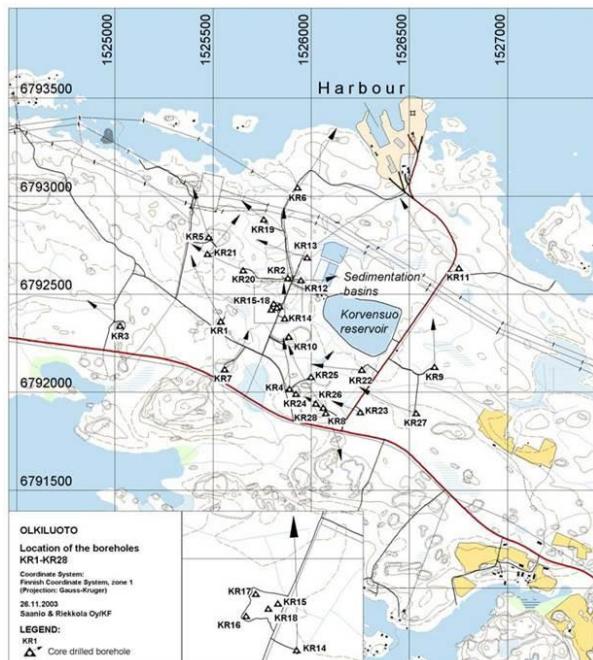


Abb. 4.10: Anwendung von überwiegend abgelenkten Erkundungsbohrungen zur Lokalisierung und Untersuchung von Störungszonen am finnischen Endlagerstandort Olkiluoto (Posiva 2005).

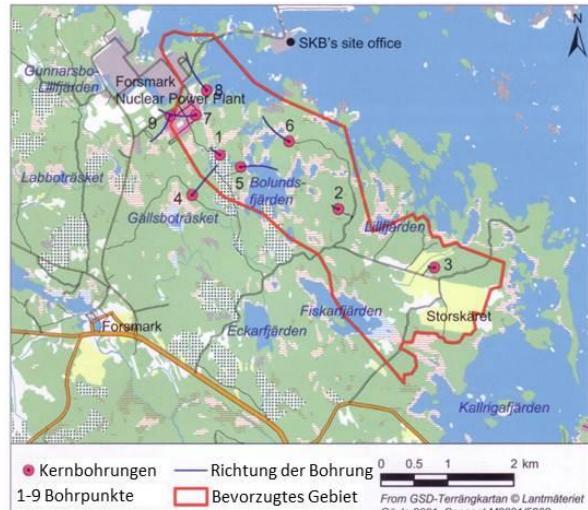


Abb. 4.11: Lage und Orientierung der am schwedischen HAW-Endlagerstandort Forsmark niedergebrachten tiefen, größtenteil abgelenkten Erkundungsbohrungen (SKB 2005b).

Zur Erfassung der räumlichen Lage und der Eigenschaften der Störungszonen sind häufig geneigte Bohrungen notwendig (Abb. 4.10 und Abb. 4.11). Die Anzahl der Bohrungen schwankt stark. An den untersuchten schwedischen Endlagerstandorten wurden 12 (Forsmark) bzw. 14 (Oskarshamn) zwischen 200 m und 1.000 m tiefe, meist gekernte Erkundungsbohrungen mit einem Bohrungsdurchmesser von 76 mm niedergebracht. Ergänzt wurden diese Arbeiten durch zahlreiche, häufig nicht gekernte flache (zwischen 30 und 120 m tiefe) und ultraflache (zwischen 2 und 18 m tiefe) Bohrungen (Rammbohrungen), z.B. am Standort Forsmark 40 bzw. 90 Bohrungen. Charakteristisch ist, dass um eine zentrale Tiefbohrung herum jeweils mehrere flachere Bohrungen angeordnet wurden (Abb. 4.12).

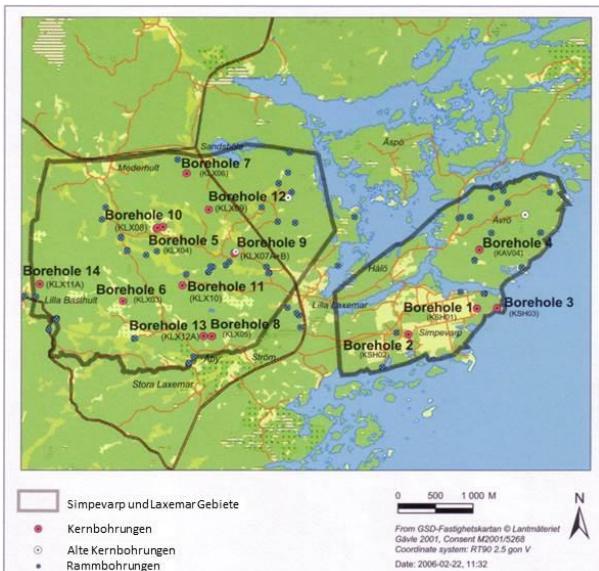


Abb. 4.102:
Lage der Erkundungsbohrungen im Umfeld des im Rahmen der schwedischen Standortauswahl untersuchten Standortes Oskarshamn auf den Halbinseln Laxemar und Simpevarp (SKB 2005a).

Die Kerne der Erkundungsbohrungen dienen zur petrographischen bzw. lithologischen Ansprache, zur Bewertung des Alterationsgrades sowie zur Analyse des Gefüges der Gesteine. An den aus den Kernen entnommenen Gesteinsproben erfolgen mikroskopische und röntgenographische Untersuchungen des Mineralbestandes, Analysen der geochemischen Zusammensetzung der Gesteine, Bestimmungen des Porenraumes bzw. der Porosität und der Permeabilität sowie Laboranalysen der geomechanischen Eigenschaften der Gesteine. Von besonderer Wichtigkeit sind Aussagen zu Mineralneubildungen in Störungszonen und Klüften.

Geophysikalische Bohrlochmessungen

In den meist mehrere hundert Meter tiefen Erkundungsbohrungen kommen in kristallinen Wirtsgesteinen i.d.R. folgende Bohrlochmessverfahren zur Anwendung:

- Widerstands-Messungen mit unterschiedlichen Elektrodenanordnungen (z.B. Wenner-Anordnung mit sehr engen Elektrodenabständen),
- Messungen des elektrischen Potenzials,
- Gamma-Gamma-Dichte-Messungen,
- Messungen der natürlichen Gamma-Aktivität,
- Messungen der magnetischen Suszeptibilität,
- Neutron-Neutron-Messungen zur Bestimmung der Porositäten,
- Kaliber-Log,
- Neigungs-Log sowie
- Temperatur-Log.

Die Identifizierung und Charakterisierung der Störungszonen in den Bohrungen bzw. in ihrem unmittelbaren Umfeld erfolgte vor allem durch Messungen der elektrischen Leitfähigkeit und der Temperatur sowie durch eine Kombination von akustischem Bohrlochfernsehen (Borehole Image Processing System, BIPS), Dipmetermessungen und optischem Televiwer (Detektierung von Bohrlochwandausbrüchen). Die Dipmeter-Logs dienen zur Bestimmung des Einfalles der in den Bohrungen angetroffenen Schichtgrenzen bzw. Kontakte sowie Störungszonen. Ergänzend durchgeführte VSP-Messungen mit einem 3-Komponenten-Geophon-System und Bohrloch-Radarmessungen ermöglichen eine bessere Auswertung von oberflächig durchgeführten seismischen Messungen und den Nachweis von Reflektoren bzw. Störungszonen im Bohrungsumfeld oder im Zwischenraum von Bohrungen.

Einsatz aerogeophysikalischer Messmethoden

Bei fehlender oder nur geringmächtiger Sedimentbedeckung der kristallinen Gesteine kann der Störungszonennachweis mittels Fernerkundung (z.B. Auswertung von Luftbild- bzw. Satellitenaufnahmen oder durch spezielle Laser-Scanner-Befliegungen, z.B. mittels LIDAR) sowie durch oberflächige geologische Kartierung oder „Trenching“, d.h. durch Freilegung von Störungen mittels Schürfen erfolgen. Häufig kommen zur Lösung dieser Aufgabenstellung aerogeophysikalische Untersuchungen unter Verwendung moderner Hubschrauber- oder Flugzeug-gestützter Messverfahren zum Einsatz (Abb. 4.13). Insbesondere elektromagnetische (Multi-Frequenz-EM, VLF), magnetische und radiometrische Messmethoden

ermöglichen die Abgrenzung von Störungszonen und Aussagen zur Homogenität der untersuchten Gesteinskomplexe (Abb. 4.14).

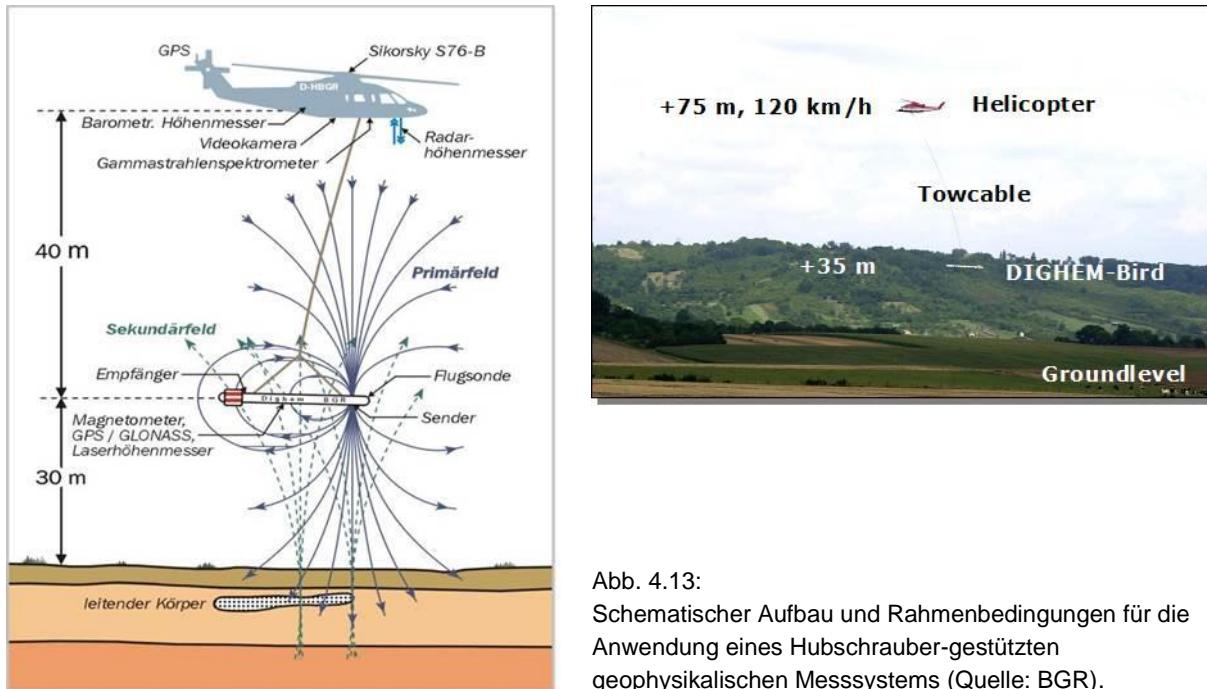
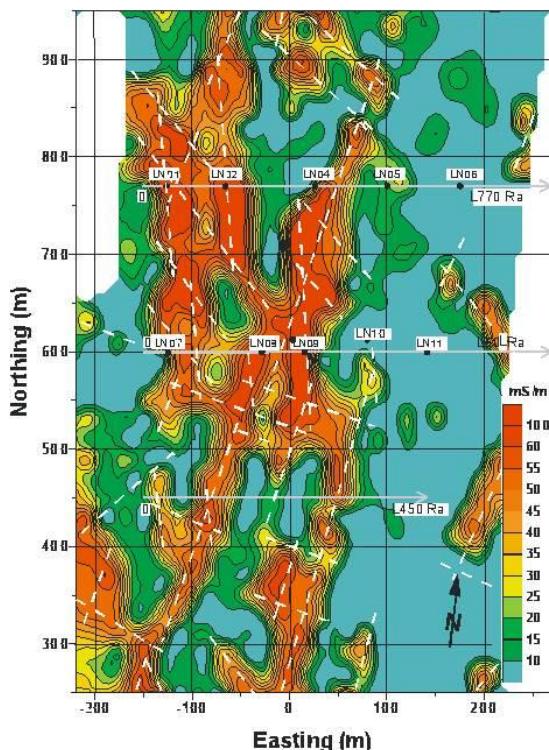


Abb. 4.13:
Schematischer Aufbau und Rahmenbedingungen für die Anwendung eines Hubschrauber-gestützten geophysikalischen Messsystems (Quelle: BGR).



Bei der Untersuchung des potenziellen finnischen HAW-Endlagerstandortes Olkiluoto mittels Hubschrauber-gestützter aerogeophysikalischer Verfahren wurden geomagnetische, elektromagnetische Dipol-, elektromagnetische VLF- sowie radiometrische bzw. gammaskopische Methoden eingesetzt (Abb. 4.14).

Abb. 4.14:
Abgrenzung von mächtigen Störungszonen auf dem kristallinen Territorium Namibias mittels Hubschrauber-gestützter elektromagnetischer Messungen (Quelle: BGR).

Geophysikalische Messungen an der Erdoberfläche

Ergänzt wurden diese Arbeiten durch umfangreiche magnetische, elektromagnetische, seismische, geoelektrische und GPR- (Ground Penetrating Radar zur Charakterisierung

oberflächennaher Strukturen) Messungen an der Erdoberfläche sowie magnetische, geoelektrische, Gamma-, Gamma-Gamma-Dichte- sowie seismische Messungen in den Erkundungsbohrungen (Posiva 2005). Die an der Erdoberfläche realisierten Ground Penetrating-Radarmessungen und elektromagnetische VLF-Messungen dienten zum Nachweis von Blockgrenzen und Störungszonen („fracture mapping“). Außerdem erfolgten Radarmessungen zur Bestimmung der Mächtigkeit des unkonsolidierten Deckgebirges und der Lage der Kristallinoberfläche sowie seismische Messungen zur Überprüfung der geophysikalischen Anomalien, die im Ergebnis der Hubschrauber- und Oberflächengeophysik identifiziert wurden (Abb. 4.15).



Abb. 4.15:
Einsatz aerogeophysikalischer Messungen bei der geologischen Erkundung des finnischen HAW-Endlagerstandortes Olkiluoto (Mc Ewen & Äikäs 2000).

Zusätzlich eingesetzte gravimetrische Untersuchungen gestatteten eine bessere Bestimmung der Kontakte zwischen den unterschiedlichen Lithotypen. Bei der Erkundung der beiden schwedischen Standortvarianten Forsmark und Oskarshamn wurden ebenfalls zahlreiche geophysikalische Methoden eingesetzt, um Daten zur Petrographie der Gesteine, zur Intensität von Verwitterungsprozessen, zum Vorkommen von Kluft- und Störungszonen sowie zu den hydrogeologischen Verhältnissen zu gewinnen (SKB 2008).

Die in kristallinen Gesteinen oberflächig eingesetzten geophysikalischen Untersuchungsmethoden umfassen neben seismischen Messungen auch geoelektrische sowie elektromagnetische und gravimetrische Methoden zum Nachweis von hydraulisch aktiven Störungszonen und zur Bestimmung der lithologischen Zusammensetzung der Wirtsgesteine und der Deck- bzw. Nebengebirgsschichten.

Die am schwedischen Endlagerstandort Forsmark durchgeföhrten seismischen Untersuchungen (1200 Schusspunkte auf insgesamt mehr als 20 km langen Seismikprofilen) dienten zur Bestimmung der Kristallinoberkante und zum Nachweis flach einfallender Störungen im Deckgebirge. Der Nachweis steil einfallender und tiefer liegender Störungszonen erfolgte mittels AMS (Anisotropic Magnetic Susceptibility), VES (Vertical Electric Sounding) und TEM (Transient Electromagnetic Sounding) (Abb. 4.16 und Abb. 4.17; SKB 2005a).

An vielen Standorten werden zur Bestimmung von Diskontinuitäten bzw. Inhomogenitäten in magmatischen Gesteinen vor allem geoelektrische, geomagnetische und gravimetrische Messungen eingesetzt. Im Regelfall wird mit einem Punktabstand von 500 m, seltener 250 m gearbeitet. Die Auswahl der konkreten Messverfahren ist von der Mächtigkeit und Leitfähigkeit des Deckgebirges und des Wirtsgesteins abhängig.

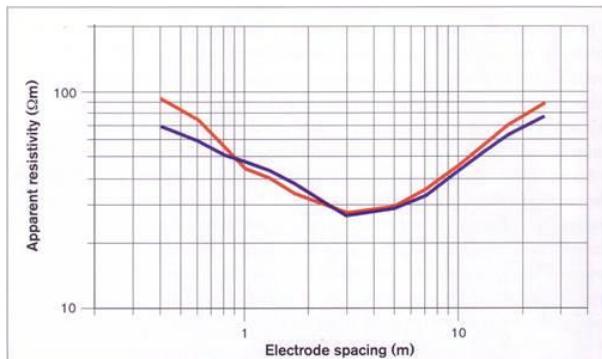


Abb. 4.16: Resultate geoelektrischer Messungen (VES-Methode) am Untersuchungsstandort Oskarshamn zur Ausweisung einer Störungszone (SKB)

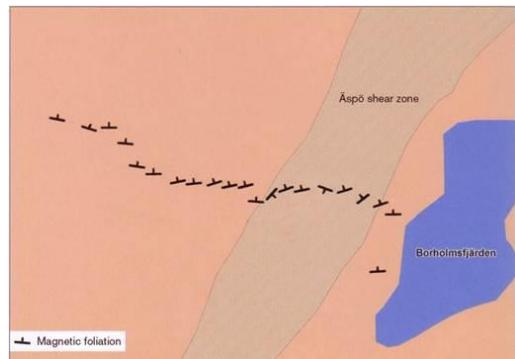


Abb. 4.17: Abgrenzung einer mächtigen Störungszone im kristallinen Wirtsgestein am schwedischen Untersuchungsstandort Oskarshamn auf der Grundlage geomagnetischer Untersuchungen (AMS-Methode, SKB 2005a).

Bei der übertägigen Erkundung (Maßstab 1:100.000 bis 1:25.000) des potenziellen HAW-Endlagerstandortes Jenisejskij im Exokontakt (archaisch-proterozoische Gneise) des Nischnekansker Granitoidkomplexes (nahe Schelesnogorsk, bei Krasnojarsk, zentrales Südsibirien, siehe Hammer 2005) kam eine Kombination aus geoelektrischen, geomagnetischen, gravimetrischen und seismischen Messungen zum Einsatz. Ergänzt wurden die Arbeiten zum Störungszonen nachweis durch Helium- und Radon-Messungen an der Erdoberfläche. Die Messungen erfolgten auf mehreren, sich annähernd senkrecht schneidenden

Profilen mit einer Gesamtlänge von ca. 70 km und einem Messpunktabstand von ca. 250 m (Abb. 4.18). Insbesondere die geoelektrischen („Methode der audiomagnetischen Sondierung – AMTS“ und „Vertikale elektrische Sondierung - VES“) und geomagnetischen Messungen ermöglichen wichtige Schlussfolgerungen zum Vorkommen von Störungszonen und gering geklüfteten Gesteinsbereichen mit sehr geringen Inhomogenitätskoeffizienten der geophysikalischen Felder (Abb. 4.19).

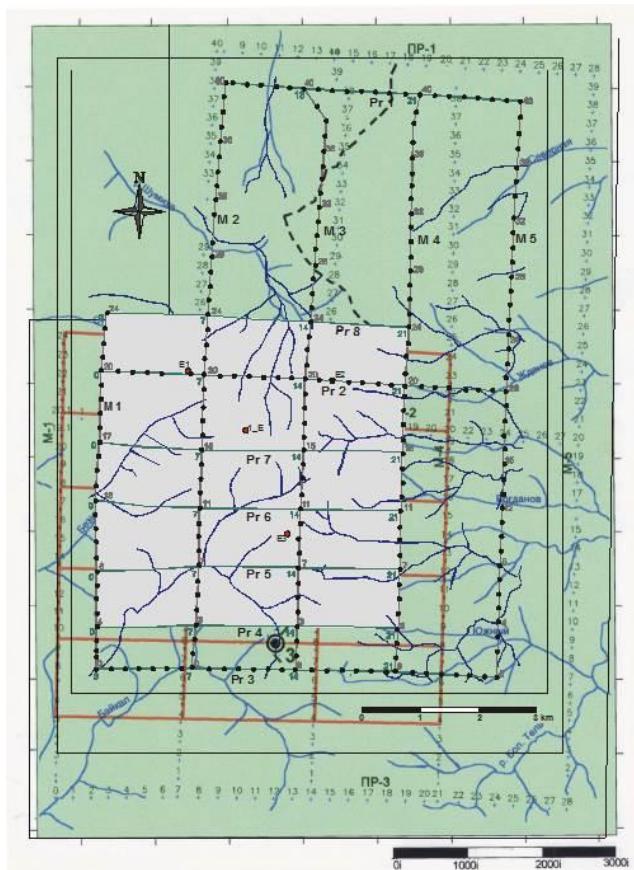


Abb. 4.18:
Lage der geophysikalischen Messprofile zur Erkundung des potenziellen russischen HAW-Endlagerstandortes in der Nähe von Schelesnogorsk (bei Krasnojarsk, südliches Zentralsibirien).

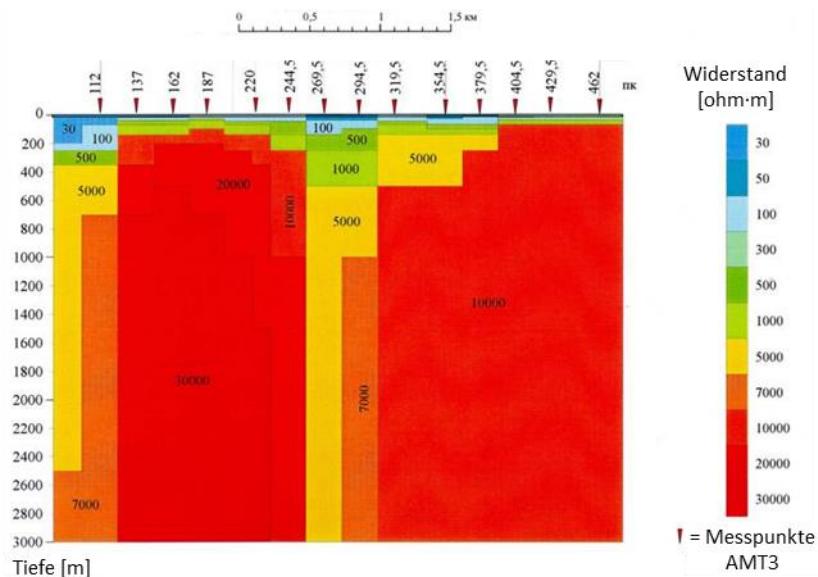


Abb. 4.19:
Mittels audiomagnetotellurischer Sondierung (AMTS) erzeugtes Vertikalprofil der Widerstandverteilung durch den potenziellen russischen HAW-Endlagerstandort nahe Schelesnogorsk (bei Krasnojarsk, südliches Zentralsibirien). Gut abzugrenzen sind die bläulich-grünlich-gelblich gehaltenen Bereiche geringer elektrischer Widerstände, die mächtigen Störungszonen entsprechen.

Im Rahmen ihrer Standortuntersuchungen in französischen granitischen Gesteinen setzte auch die ANDRA aero- und oberflächengeophysikalische Messverfahren ein (Andra 2005). Mittels Kombination von Hubschrauber-gestützten aeromagnetischen, elektromagnetischen, gammaspektroskopischen und vor allem VLF-EM-Messungen (very low frequency magnetic field) war es gelungen, lineare Zonen erhöhter Leitfähigkeit nachzuweisen. Die an der Erdoberfläche zusätzlich durchgeführten gravimetrischen Untersuchungen lieferten wichtige Informationen zur Mächtigkeit der Granitkörper und zum Vorkommen mächtiger Störungszonen, die durch die Ergebnisse geoelektrischer (bis in einige zehner Meter Tiefe reichend) und elektromagnetischer Messungen (bis in mehrere Hundert Meter Tiefe) ergänzt wurden (Andra 2005). Der Einsatz seismischer Untersuchungsverfahren erwies sich aufgrund zu geringer Kontraste als nicht zielführend. Außerdem können die meist vertikalen Störungszonen mittels oberflächig durchgeföhrter seismischer Verfahren nicht oder nur schlecht erfasst werden. Dazu sind tomographische seismische Messungen zwischen Bohrungen oder bergmännischen Auffahrungen erforderlich.

Untersuchungen zur Bestimmung der hydraulischen Gesteinsparameter

Einen wichtigen Stellenwert hat im Zuge der übertägigen Erkundungsarbeiten die hydrogeologische Charakterisierung des potenziellen Endlagerstandortes (siehe IAEA 1999). Im Mittelpunkt dieser Untersuchungen stehen die Charakterisierung der Grundwasserverhältnisse im Deck- und Nebengebirge, d.h. die Ausweisung bzw. Abgrenzung von Grundwasserleitern und Grundwassergeschiebeleitern, sowie die Analyse der Grundwasserbeschaffenheit (z.B. Eh-pH-Verhältnisse, Sauerstoffsättigung, chemische Zusammensetzung und Alter der Grundwässer).

Zur Bestimmung der hydrogeologischen Standortrandbedingungen werden im Deckgebirge bzw. an den Gesteinen des Fernfeldes u.a. folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Permeameterversuche (Lockergesteine),
- Einschwingversuch (Porengrundwasserleiter),
- Pumpversuche (Porengrundwasserleiter und Kluftwasserleiter),
- Bohrlochkranzversuche (Liedtke et al. 1994),

- Tracerests,
- Injektionstests (z.B. SKB 2007),
- Korngrößenanalysen,
- Laboruntersuchungen zur Durchlässigkeit und zu den Sorptions- bzw. Diffusionseigenschaften der Gesteine (z.B. Nagra 1999, 2004) sowie
- geophysikalische Bohrlochmessungen.

Im Ergebnis der übertägigen Standorterkundung müssen detaillierte Informationen zur Geometrie der Grundwasserfließsysteme, zu den hydraulischen Eigenschaften der hydrostratigraphischen Einheiten (Transmissivität, Permeabilität, Porosität) sowie zu den aktuell ablaufenden Grundwasserbewegungen (u.a. Pumpversuche und Tracerexperimente) vorliegen. Wichtig für die langzeitsicherheitliche Bewertung des Endlagerstandortes sind Prognosen zur Änderung der Grundwasserfließverhältnisse durch klimatische oder geodynamische Prozesse (z.B. Vereisungen, Überflutungen, tektonische Hebungen oder Absenkungen, Änderung der Spannungsverteilungen und Neubildung bzw. Reaktivierung von Störungszonen) sowie zum Einfluss der Einlagerung von Wärme entwickelnden Abfällen auf die Grundwasserfließverhältnisse.

Neben Untersuchungen in geologischen Erkundungsbohrungen werden hierfür häufig spezielle Bohrprogramme für hydrogeologische Bohrungen, Pegelbohrungen oder Brunnen sowie spezielle geophysikalische Methoden eingesetzt (siehe z.B. Schreiner & Kreysing 1998, Langguth & Voigt 2004). Der Einsatz der verschiedenen Methoden und der Umfang der Untersuchungen richten sich nach den regionalen geologischen Verhältnissen bzw. dem geologischen Aufbau des Deckgebirges und seinen Eigenschaften sowie nach der Größe des Untersuchungsgebietes. Die Endteufen der hydrogeologischen Bohrungen bleiben zum Schutz der geologischen Barriere i.d.R. deutlich über der Topfläche des Wirtsgesteins. Zur Beweissicherung und zum Monitoring der Grundwasserverhältnisse werden Dauermessstellen eingerichtet und regelmäßig gemessen.

Zwecks Analyse der hydraulischen Eigenschaften der Wirtsgesteine und des Deckgebirges (z.B. Bestimmungen der hydraulischen Durchlässigkeiten, Grundwasserfließgeschwindigkeiten und hydraulischen Gradienten) wurden zwischen 1997 und 2000 an den potenziellen finnischen Endlagerstandorten in Erkundungsbohrungen oder in speziell dafür niedergebrachten hydrogeologischen Bohrungen Pumpversuche oder PackerTests (z.B. Multiphase-PackerTest, Interferenztest) durchgeführt. Aufgrund der z.T. großen Tiefen der Erkundungsbohrungen (bis zu 1.000 m tief) und der geringen Bohrungsdurchmesser (meist 56 mm) mussten dafür spezielle technische Ausrüstungen entwickelt werden (Posiva 2005).

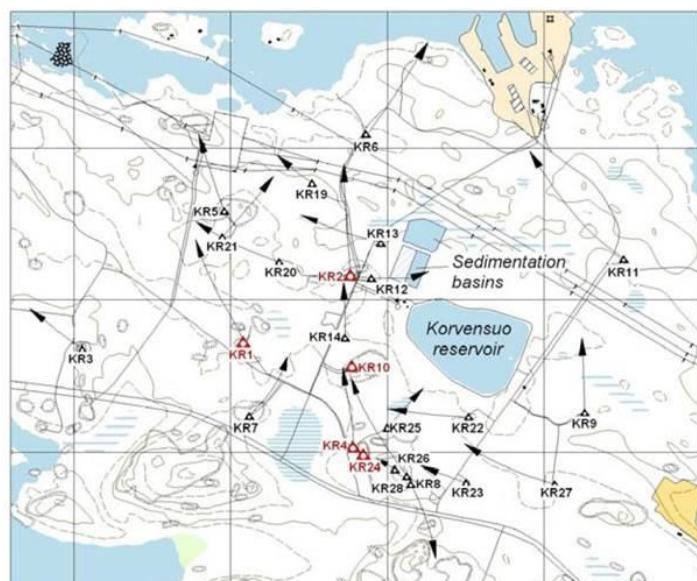
Sowohl in Finnland als auch in Schweden wurden zahlreiche Head-Injection-Tests durchgeführt. Am Standort Forsmark in Schweden erfolgten z.B. 90 derartige Tests, ergänzt durch Pumptests (flow logging) unter Einsatz von Packern und Drucksensoren mit Testintervallen zwischen 5 und 100 m. Im Verlaufe der Erkundung der potenziellen finnischen Endlagerstandorte wurden ab 100 m Tiefe in 31-m-Schritten Packerexperimente realisiert. In Zonen mit hohen Durchlässigkeiten erfolgten zusätzliche Messungen mit Packerintervallen von jeweils 7 m. An den schwedischen Standorten wurden ergänzend zahlreiche „transient tests in multi-level piezometers“ und Tracer-Tests zur Erkundung der hydrogeologischen Randbe-

dingungen eingesetzt. Die Tracer-Versuche wurden als „single well injection withdrawal tests“ oder als cross-hole-Tracer-Tests mit einer Injektionsbohrung und drei, im Abstand zwischen 100 m und 200 m davon platzierten Bohrungen durchgeführt. Diese Arbeiten wurden durch Bestimmungen der hydrochemischen Zusammensetzung der Grundwässer (unter Einchluss von redoxsensitiven Parametern, wie $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$, HS^-) zwecks Erfassung der Änderung der Grundwasserchemie mit der Tiefe sowie durch Altersbestimmungen der Grundwässer (Grundwasserverweilzeiten) ergänzt.

Bestimmung der thermischen Gesteinskennwerte und der Spannungsverteilungen

Die thermischen Eigenschaften der granitoiden Gesteine werden mittels Laboranalysen an den Kernen der geologischen Erkundungsbohrungen bestimmt. Am Standort Forsmark wurden ergänzend durch einen Heater-Versuch in einer Erkundungsbohrung, gekoppelt mit crosshole-Messungen, die für die Planung des Endlagers wichtigen thermischen Wirtschaftsgesteinsparameter bestimmt. Erforderlich sind auch Messungen des regionalen Temperaturfeldes und der Temperaturen im geplanten Endlagerniveau. Generell können Temperaturinformationen in Verbindung mit thermischen Gesteinsparametern auch Informationen über die regionalen Grundwasserströmungsverhältnisse liefern. Dies wird z.B. in einer Arbeit von Jobmann & Clauser (1994) gezeigt, in der das regionale Verhältnis des konduktiven zum advektiven Wärmetransport im Rahmen des Kontinentalen Tiefbohrprogramms (KTB) bestimmt wurde.

Eine häufig in Kristallingesteinen beobachtete anisotrope In-situ-Spannungsverteilung setzt im Vorfeld der Standortentscheidung und bei der Projektierung des Endlagerbergwerkes eine genaue Kenntnis der Größe und Orientierung der Spannungsvektoren sowie Informationen zur möglichen räumlich-zeitlichen Entwicklung der Spannungsfelder voraus (Abb. 4.20).



OLKILUOTO
Lokation der Messbohrungen
Finnisches Koordinatensystem
Zone 1

10.05.2004
(Saanio & Riekola Oy/HM)

Legende:
△ Spannungsmessungen
△ Kernbohrungen

Geotektonische Prozesse in benachbarten, mobilen geologischen Einheiten können dazu führen, dass sich die Spannungsverteilungen in den Gesteinen ändern, d.h. Klüfte, die zum Zeitpunkt der Standortauswahl geschlossen bzw. verheilt waren, können aufreißen oder neue Klüfte/Störungen können entstehen. Dies kann deutliche Auswirkungen auf die Fließverhältnisse im Grundwasser haben.

Abb. 4.20:
Lage der fünf Bohrungen am finnischen Standort Olkiluoto, in denen in einer Tiefe zwischen 300 und 800 m die In-situ-Stressbedingungen bestimmt wurden (Posiva 2005).

Demzufolge muss die Analyse der aktuellen struktur- und hydrogeologischen Standortrandbedingungen durch eine Prognose der seismischen und tektonischen Prozesse im Umfeld des Standortes ergänzt werden. Deshalb nehmen Untersuchungen der Orientierung der Gebirgsspannungen sowie Analysen der geomechanischen Eigenschaften der Gesteine und ihres In-situ-Deformationszustandes einen breiten Raum ein. Zwecks Bestimmung der In-situ-Stressbedingungen erfolgten am finnischen Standort Olkiluoto hydraulic-fracturing-Messungen („Hydrofrac-Versuche“) in kurzen Doppelpacker-Intervallen und Überbohrversuche (Posiva 2005: Abb. 4.20). Für die Messungen wurde die in Abb. 4.21 dargestellte Überbohrvorrichtung („Borre probe“ der Firma SwedPower) eingesetzt. Ähnliche Untersuchungen erfolgten auch an dem schwedischen Endlagerstandort Forsmark und dem Untersuchungsstandort Oskarshamn.



Abb. 4.21:
Gerät zur Durchführung von
Überbohrversuchen in tiefen Erkun-
dungsbohrungen zur Ermittlung der
Gebirgsspannungen am Standort
Olkiluoto, Finnland („Borre probe“,
SwedPower, Posiva 2005).

Auf der Grundlage der Erkundungsdaten erfolgt eine kriteriengestützte Bewertung der Standortalternativen sowie die Durchführung einer standortspezifischen Langzeitsicherheitsanalyse. Außerdem liefert die ürtägige geologische Erkundung einen Großteil der standortbezogenen Daten, die zur Entwicklung bzw. Optimierung des Endlagerkonzeptes, zur Planung der untertägigen Erkundungsarbeiten sowie für die Planung und Errichtung des Endlagerbergwerks notwendig sind, inklusive Klärung der bautechnischen Machbarkeit.

4.3.2 Ziele und Methoden bei der untertägigen Standorterkundung

Nachfolgend wurden Informationen und Daten zu den in verschiedenen URL in Kristallingesteinen und bei der untertägigen geologischen Erkundung des finnischen Endlagerstandortes Onkalo durchgeföhrten In-situ-Untersuchungen zusammengestellt und an Beispielen erläutert. Die Synthese der in den URL bzw. bei der untertägigen Standorterkundung sowie bei begleitenden Laborstudien realisierten Arbeiten wird durch eine Zusammenstellung einiger dabei bestimmter Wirtsgesteinsparameter ergänzt.

Die untertägige Standorterkundung hat das Ziel, alle Daten bereit zu stellen, die für die Durchführung der standortspezifischen Langzeitsicherheitsanalyse und für die Planung des Endlagerbergwerkes sowie für die Optimierung des Endlagerkonzeptes und die Planung der Verfüll- und Verschlussmaßnahmen erforderlich sind. Dazu werden die Gebirgs- und Gesteinseigenschaften des Wirtsgesteins, die Wirksamkeit der geotechnischen Barrieren, die Auswirkungen des Endlagerbaus auf das Isolationspotenzial der geologischen Barriere und die endlagerrelevanten Wechselwirkungsprozesse zwischen den Abfällen und dem MultibARRIERensystem des vorgesehenen Endlagers standortbezogen untersucht sowie vorhandene technische Konzepte zur Einlagerung im Maßstab 1:1 unter In-situ-Bedingungen getestet. Die Daten werden in Erkundungsbergwerken bzw. in standortbezogenen oder generischen URL's gewonnen.

Die In-situ-Untersuchungen werden durch Modellberechnungen zu möglichen Radionuklidfreisetzen und -migrationen im Falle von Störfällen im Endlagerbetrieb, Berechnungen der Wärme- und Strahlungseinwirkungen der radioaktiven Abfälle auf das Nebengestein sowie Prognosen zur langzeitlichen geologischen Entwicklung des zu bewertenden Standorts ergänzt (Chapman & McKinley 1987, Savage 1995). Zwecks Ausschaltung von Ungenauigkeiten in den Sicherheitsmodellierungen müssen die endlagerrelevanten Gesteinsparameter und die Einflussfaktoren auf die Langzeitsicherheit des Endlagers möglichst im geplanten Endlagerniveau am vorgesehenen Endlagerstandort oder in dessen unmittelbarer Nähe analysiert werden.

Die in den URL vorgenommenen Untersuchungen lassen sich in drei Gruppen mit den folgenden Schwerpunkten untergliedern:

Wirtsgesteinscharakterisierung

- Geologie, Mineralogie und Geochemie
- Hydrogeologie und Hydrochemie
- Felsmechanik
- thermische Eigenschaften

Interaktion Endlager ↔ Wirtsgestein

- Störungen/Beeinträchtigungen durch Ausbruch (EDZ)
- chemische Kompatibilität (Konstruktions-/Versiegelungsmaterial)
- mechanische/hydraulische Lasten
- thermische Effekte (durch Wärme entwickelnde Abfälle)

Entwicklung und Verifizierung von Endlagerkonzepten

- Entwicklung von Abfalleinlagerungskonzepten/-technologien
- Methoden zur Einbringung von Versatz- und Versiegelung
- Verfeinerung von Ausbruchsmethoden, Materialspezifikationen und Überwachungs-techniken

Schwerpunktmaßig werden bei der untertägigen Erkundung von HAW-Endlagerstandorten Untersuchungen zu folgenden Themenkomplexen, z.T. als Ergänzung zu den Ergebnissen übertägiger Erkundungsarbeiten, durchgeführt:

- Detaillierte Charakterisierung der endlagerrelevanten Gebirgs- und Gesteinsparameter des Endlagerwirtsgesteins im vorgesehenen Endlagerniveau; geochemisch-mineralogische, physikomechanische, wärmephysikalische, Filtrations-, Diffusions- und Sorptions- bzw. Retardationseigenschaften der Wirtsgesteine (inklusive Gehalte von Kolloiden und Komplexbildnern)
- Räumliche Abgrenzung der für die Abfalleinlagerung vorgesehenen, möglichst ungeklüfteten und homogenen Gebirgsbereiche
- Analyse des strukturgeologischen Baus der zur HAW-Einlagerung vorgesehenen Gesteinsbereiche (z.B. Vorkommen, räumliche Orientierung und Vernetzung von Klüften und Störungszonen, Inhomogenitäten)
- In-situ-Untersuchung der hydrogeologischen Standortbedingungen, wie z.B. Grundwasserführung und hydraulische Eigenschaften der Gesteine und der hydraulisch

aktiven, untereinander vernetzten Störungszonen bzw. Grundwasserfließwege im geplanten Einlagerungsbereich bzw. im Nahfeld des Endlagers; Kluftbeläge und -öffnungsweiten sowie hydraulische Gradienten und Grundwasserfließgeschwindigkeiten; Informationen zum Vorkommen von Grundwasserstauern oberhalb des Einlagerungsniveaus

- Geochemisch-isotopengeochemische Analyse der im Erkundungsbergwerk bzw. im Endlager festgestellten Wasserzuflüsse; Daten zur Herkunft und zum Alter der Grundwässer
- Bestimmung der In-situ-Spannungsverhältnisse (Größe und räumliche Orientierung der Spannungsvektoren, Variation der Spannungsfelder mit zunehmender Tiefe)
- Untersuchung endlagerrelevanter Prozesse, wie z.B. des Verhaltens des Wirtsgesteins bei der Einlagerung von Wärme entwickelnden hochradioaktiven Abfällen
- Analyse des Einflusses hydraulischer, geochemischer und physikalischer Parameter auf den Transport von Radionukliden
- Untersuchung der Prozesse im Nahfeldbereich (EDZ-Ausbildung und -eigenschaften, Wärmeabtransport, Spannungsauf- und -abbau, Druck- und Temperatur-abhängige Deformationen).
- Demonstrationsversuche zur Interaktion zwischen der geologischen und den (geo)technischen Barrieren (z.B. Gasmigration, Radionuklidretardation)
- Weiterentwicklung der technischen und geotechnischen Barrieren unter In-situ-Bedingungen
- Praktische Überprüfung des Endlagerkonzeptes und seiner bautechnischen Machbarkeit
- In-situ-Studien zur Optimierung des Designs des Endlagers und der Geometrie der Einlagerungsstrecken
- Untersuchungen zur Optimierung der Methoden der bergmännischen Auffahrungen sowie der Bohr- und Sprengverfahren
- Optimierung von Erkundungs- und Monitoringmethoden, die beim Endlagerbau bzw. -betrieb sowie ggf. in der Nachbetriebsphase zum Einsatz kommen
- Demonstration der Einlagerungstechnik bzw. Tests der Technik unter realen Bedingungen

In der Praxis geht man aufgrund der vielfältigen Überlagerungs- und Wechselwirkungseffekte der unter natürlichen Bedingungen in einem Endlager ablaufenden Prozesse mehr und mehr dazu über, in den URL oder Erkundungsbergwerken multidisziplinäre, integrale wissenschaftliche Versuche (sogenannte „Schlüsselexperimente“) durchzuführen. Im Verlaufe dieser komplexen, häufig sehr aufwändigen Untersuchungen wird der Einfluss verschiedener Parameter (wie z.B. Spannungsfeld, Feuchtigkeit bzw. Wassersättigung, Temperatur) und endlagerrelevanter THMC-Prozesse auf die langzeitliche mechanische und hydraulische Integrität der geologischen Barriere analysiert. Die Synthese der verschiedenen Untersuchungen ermöglicht unter Hinzunahme von Modellberechnungen ein besseres Prozessverständnis der komplexen Zusammenhänge im System Endlager/Wirtsgestein.

Beispiele für Schlußselexperimente sind Studien zu den Auswirkungen von Streckenauffahrungen auf das Gebirge, zu Änderungen der Festigkeitseigenschaften im Nahfeld von

Streckenauffahrungen bzw. Einlagerungsbohrungen sowie geophysikalische, felsmechanische, hydraulische und strukturgeologische Untersuchungen zur Charakterisierung der Auflockerungszone um untertägige Hohlräume (z.B. zur Orientierung und Ausdehnung der durch die Streckenauffahrung bzw. Spannungsumlagerung induzierten Trennflächen). Einen breiten Raum nehmen Analysen der Auswirkungen von Erhitzer-Experimenten auf die hydraulischen und geomechanischen Gesteinseigenschaften, aber auch konzeptbezogene Versuche, z.B. zur Wirksamkeit der geotechnischen Barrieren ein.

Die bei der untertägigen Standorterkundung eingesetzten Untersuchungsverfahren können untergliedert werden in:

- Geologisch-geophysikalische Standortuntersuchungen
- Hydrogeologisch-hydrochemische Untersuchungsverfahren
- Geomechanische und thermophysikalische Untersuchungsmethoden
- Untersuchungen endlagerrelevanter gekoppelter Prozesse (konzeptbezogene Studien).

4.3.2.1 Geologisch-geophysikalische Standortuntersuchungen

Im Rahmen der untertägigen geologischen Erkundung erfolgt mit dem Ziel der Beweissicherung eine lückenlose Dokumentation und detaillierte Beprobung der bei der Auffahrung des Erkundungs- bzw. Endlagerbergwerkes angetroffenen geologischen Standortgegebenheiten. Auf der Grundlage der Ergebnisse der geologischen Erkundungsarbeiten wird, unter Ausweisung von Sicherheitspfeilern zu Störungszonen oder zu Gesteinstypen bzw. -bereichen, die für die HAW-Einlagerung ungeeignet sind, die Abgrenzung der Wirtsgesteinsvolumina vorgenommen, in denen die Endlagerung der hochradioaktiven Abfälle möglich ist.

Die geologische Erkundung erfolgt unter Tage vor allem durch Schächte und Strecken, deren Stöße im Maßstab 1:100 bzw. 1:50 vollständig dokumentiert werden, sowie durch geologische Erkundungsbohrungen. Die Kartierung beinhaltet die Erfassung sämtlicher, im Maßstab darstellbarer tektonischer und Strukturelemente, wie z.B. Störungen und Klüfte. Zusätzlich erfolgt eine Fotodokumentation der Bohrkerne und relevanter Streckenbereiche. Bereits bei den Kartierarbeiten und im Ergebnis nachfolgender, z.B. mikroskopischer, röntgendiffraktometrischer oder geochemischer Laboruntersuchungen werden die in den Aufschlüssen angetroffenen Gesteine lithologisch, petrographisch und mineralogisch-geochemisch charakterisiert.

Schwerpunkt der untertägigen Kartierung ist die Aufnahme und Charakterisierung tektonischer Strukturen (Klüfte und Störungen) und petrographischer Gesteinsmerkmale. Darüber hinaus erfolgt eine felsmechanische Charakterisierung der Gesteine (RMR und Dokumentation der Stöße bezüglich Kluftabstände, -häufigkeit, Öffnungsweite, RQD-Index etc.) sowie eine hydrogeologische Kartierung (Stoßfeuchtigkeit, Tropfstellen, Wasser-führende Klüfte), die auch eine hydrochemische Probenahme beinhaltet. Neben dem geologischen Standortmodell wird aus diesen Daten auch ein Kluftmodell unter Berücksichtigung geostatistischer Methoden erstellt (Abb. 4.22).

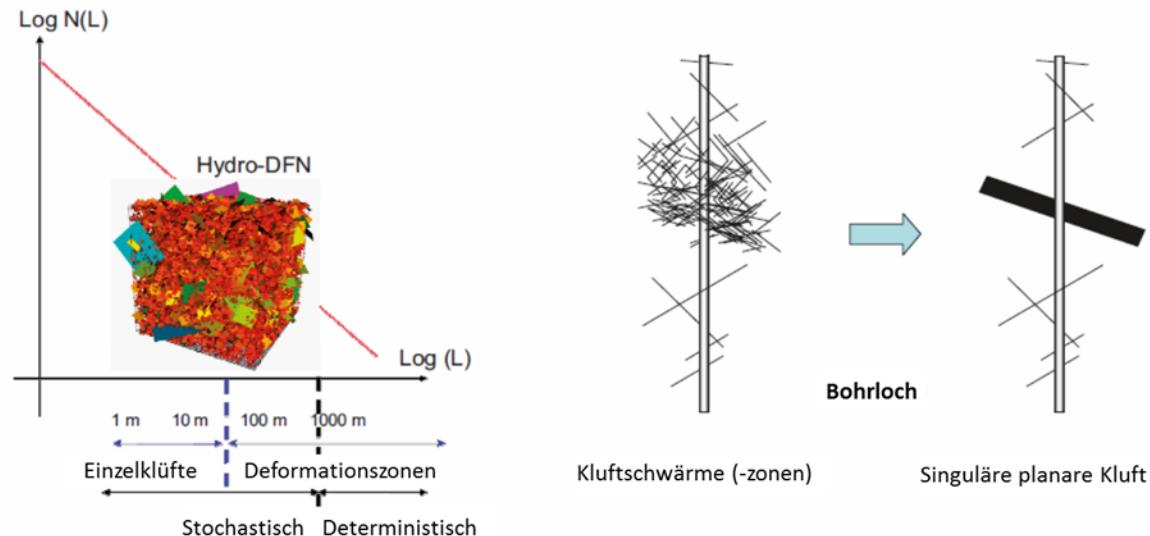


Abb. 4.22: Beispiel für ein Kluftmodell in kristallinen Gesteinen (DFN-Modell, SKB 2008).

Aufgrund des möglichen Einflusses von Alterationsprozessen auf die Barriereeigenschaften der Gesteine (z.B. auf Radionuklid-Rückhaltevermögen und Standfestigkeit) müssen umfangreiche petrographische und geochemisch-mineralogische Untersuchungen der Gesteine, vor allem im Umfeld von Störungszonen, durchgeführt werden. Häufig werden in den Klüften bzw. Störungszonen in unterschiedlichen Teufenniveaus verschiedenartige metasomatische Umwandlungsprodukte oder Kluftmineralisationen mit z.T. stark variierenden elastischen bzw. Festigkeitseigenschaften festgestellt (Abb. 4.23). Diese Standortbesonderheiten müssen im Endlagerkonzept berücksichtigt werden.

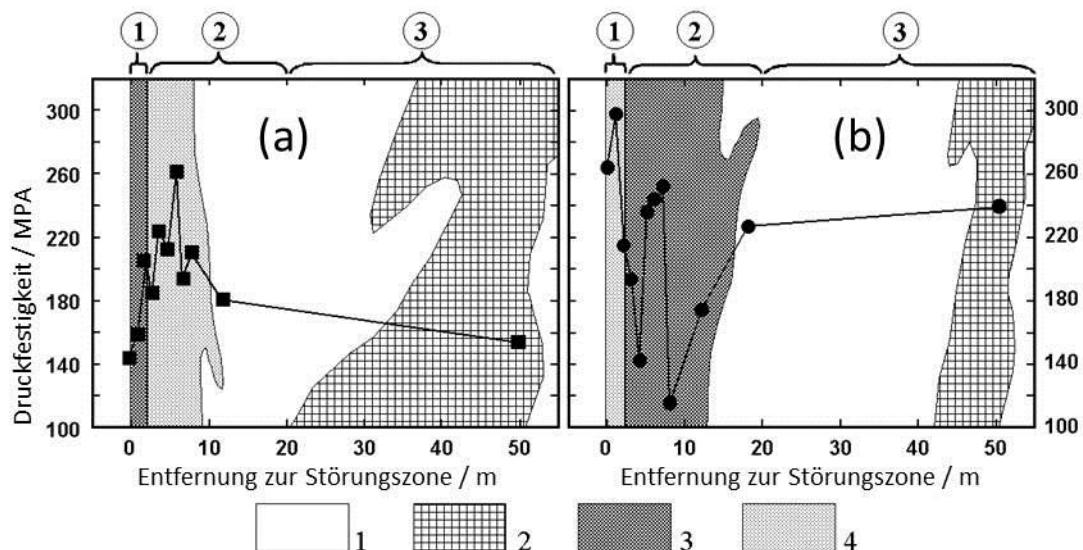


Abb. 4.23: Schematische Darstellung zum Vorkommen unterschiedlicher Metasomatoseprodukte im Umfeld von Störungszonen in verschiedenen Teufenniveaus (a – 9. Sohle, vorwiegend Verquarzung; 6 – 11. Sohle, Hydroglimmer-Argillit) und zu ihrem Einfluss auf die Festigkeitswerte (in MPa) granitoider Gesteine (analysiert für einen Bereich, der bis zu 50 m von dem Kern der Störung entfernt ist; Lagerstätte Antej, bei Krasnokamensk, Sibirien, Russland; Petrov et al. 2008).

Legende: 1 – gleichkörnige Granite, 2 – Kalifeldspatite und Albitite, 3 – Granite mit Hydroglimmern, 4 – verquarzte Granite; Architektur der Störungszone: 1 – Kernbereich der Störung, 2 – Zone des dynamischen Einflusses der Störung, 3 – Protolith (Wirtsgestein, unverändert).

Die Ergebnisse der im Rahmen zahlreicher Endlagerprojekte in kristallinen Gesteinen durchgeführten Modellierungen der Strömungs- und Transportprozesse zeigen zwar, dass es aus Gründen der Langzeitsicherheit des Endlagers nicht erforderlich ist, im Stadium der untertägigen Erkundung jede Kluft bzw. Störungszone nachzuweisen (siehe z.B. Wallner et al. 2005). Trotzdem ist es notwendig, hydraulisch aktive Zonen im Umfeld der geplanten Einlagerungsbereiche auszugliedern und ihre hydraulischen Eigenschaften zu bestimmen.

Die Erkundung des nahen und fernen Umfeldes des geplanten HAW-Endlagers erfolgt durch Bohrungen und geophysikalische Messungen. Die Bohrungen werden aus Strecken, speziellen Bohrorten oder Infrastrukturräumen gebohrt und haben Längen von bis zu mehreren hundert Metern. Zusätzlich zu den geologischen Erkundungsbohrungen werden bei der untertägigen Erkundung zahlreiche Bohrungen für wissenschaftliche Versuche, zur Installation von Messinstrumenten, zur Streckenplanung oder zur gezielten Beprobung der Wirtsgesteinsformation gestoßen. Durchmesser und Länge der Bohrungen werden den Versuchen oder der Versuchstechnik angepasst. Die Standarddurchmesser liegen zwischen 52 mm und 101 mm, Standardlängen zwischen 3 m und 30 m. Ein Teil der Bohrungen wird gekernt und/oder geophysikalisch vermessen.

Auf der Grundlage der Ergebnisse der geologischen Aufnahme der Erkundungsbohrungen und der Kartierung der Erkundungsstrecken werden geologische Übersichtskarten und geologische Schnitte angefertigt. Basierend auf einer komplexen und integralen Interpretation aller Erkundungsergebnisse wird ein geologisches 3D-Standortmodell erarbeitet. Dieses Modell wird bei Vorlage neuer Erkundungsdaten fortlaufend aktualisiert bzw. präzisiert. Es dient als Grundlage für die Bergwerksplanung und die Planung der Vorfelderkundung sowie für die Auswertung und Interpretation der geologisch-geophysikalischen und geotechnischen Erkundungsergebnisse. Außerdem bildet das geologische Lagerstättenmodell die Basis für erkundungsbegleitende (z.B. Abstandsfestlegung zu ungeeigneten Gesteinspartien) oder nachfolgende numerische Modellierungen.

Geophysikalische Untersuchungsverfahren werden bei der untertägigen Standorterkundung vor allem für Messungen zum Nachweis und zur Charakterisierung von Auflockerungs- bzw. Störungszonen und von Inhomogenitäten im Nah- und Fernfeld des geplanten Endlagers (Abb. 4.24) sowie zur In-situ-Bestimmung von Gesteinseigenschaften eingesetzt. Übersichten zu den einsetzbaren Untersuchungsverfahren sind u.a. in Fricke & Schön (1999), Knödel et al. (2005), Berckhemer (1990), Militzer et al. (1986) und Bender (1985) enthalten.

Zur Charakterisierung von auffahrungsnahen Störungs- und Kluftzonen werden in kristallinen Gesteinen häufig seismische Messungen in einer Bohrung oder als Tomographie zwischen Bohrungen durchgeführt. Der Abstand zwischen den Bohrungen variiert zwischen 1 m und mehreren 10er Metern. Außerdem erfahren mikroseismische Untersuchungsverfahren, häufig in Kombination mit geoelektrischen bzw. elektromagnetischen Messungen, eine intensive Nutzung bei der Charakterisierung der Auflockerungszone (EDZ) im Umfeld von bergmännischen Auffahrungen.

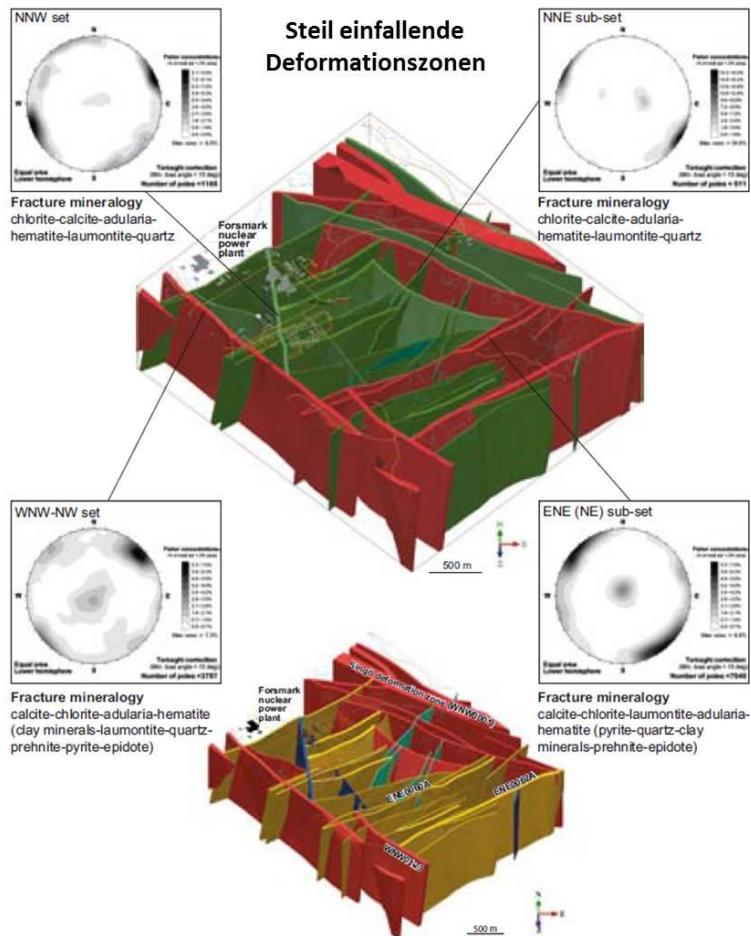


Abb. 4.24:
3D-Modell der mittels geophysikalischer Messungen am Standort Forsmark festgestellten Hauptdeformationszonen, unter Berücksichtigung der Trennflächenmineralogie (SKB 2008).

Zur Nahfelderkundung werden auch Ultraschallmessungen und geoelektrische Verfahren eingesetzt (Abb. 4.25). Geoelektrische Messungen kamen z.B. bei der Überwachung der Aufsättigung einer geotechnischen Tonbarriere im URL Äspö zum Einsatz. In einzelnen Experimenten werden bei Bedarf noch weitere geophysikalische Messmethoden eingesetzt. Information zur Lithologie liefern Gamma- (natural gamma-), Dichte- (gamma-gamma-) und susceptibility-Messungen. Zum Nachweis und zur Charakterisierung von Klüften und Störungszonen werden häufig Widerstandsmessungen und Sonic-Messungen eingesetzt. Weiterhin kommen Kaliber und Neutron- (porosity-) Logs zum Einsatz. Standard ist der Einsatz von Borehole-Imaging-Processing-Systemen (BIP, Abb. 4.26) und Bohrlochkameras.

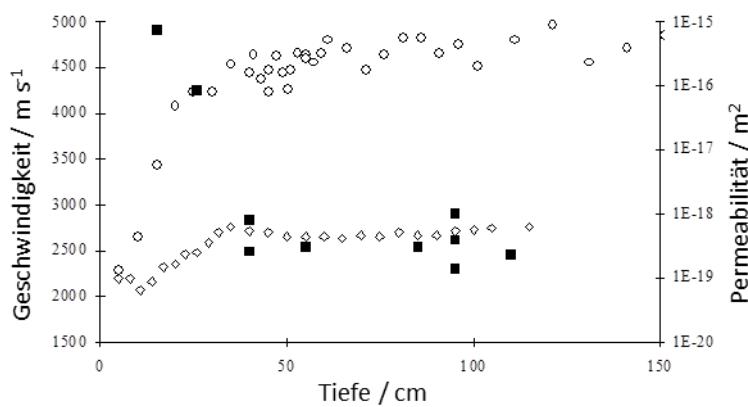
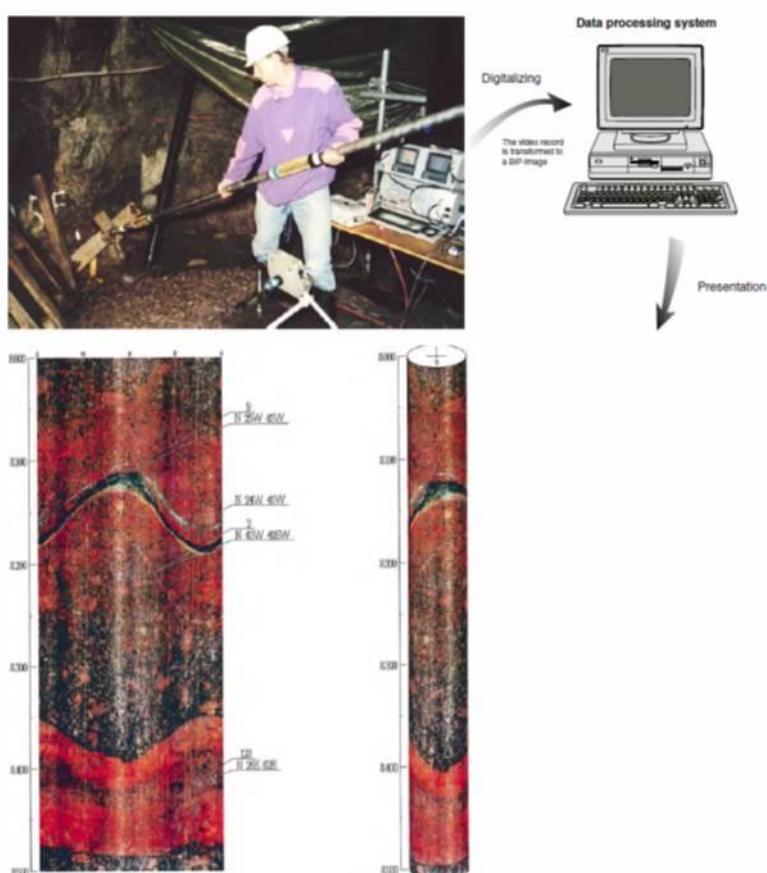


Abb. 4.25:
Korrelation zwischen der hydraulischen Durchlässigkeit (schwarze Rechtecke) und den seismischen Ausbreitungsgeschwindigkeiten (Kreise – Kompressionswellen, Rhomben – Scherwellen) im Bereich der EDZ im URL Äspö, Bohrung 94001; Quelle: BGR).

Zur Untersuchung der mechanischen Stabilität von untertägigen Hohlräumen werden häufig mikroakustische Messungen eingesetzt. Durch die Erfassung von hochfrequenter seismischer Energie kann Mikrorissbildung direkt nachgewiesen und räumlich geortet werden. Statistische Analysen von Mikroriss-Clustern erlauben eine Identifikation bzw. Lokalisierung von gebirgsmechanisch möglicherweise problematischen Rissbildungen. Dadurch können Auflockerungszonen bzw. Kluftbildungen im Umfeld von Abbauen und ggf. im Fernfeld nachgewiesen werden.



Weitere Anwendungsmöglichkeiten für mikroakustische Messungen sind Beobachtungen der Gebirgsbelastung während der Verfüllung von Hohlräumen, z.B. aufgrund der Erwärmung bei der Verfüllung mit Beton, sowie der Nachweis der Wirksamkeit von Verfüllmaßnahmen anhand der Reduzierung der Rissbildungen im Gebirge.

Abb. 4.26:
Prinzip und Ergebnisse von BIP-Messungen am Standort Forsmark, Schweden (SKB 2005b).

4.3.2.2 Hydrogeologisch-hydrochemische Untersuchungsverfahren

Trotz generell mit der Teufe abnehmender Durchlässigkeiten können in kristallinen Gesteinen in endlagerrelevanten Tiefenbereichen stark wasser durchlässige Störungszonen vorkommen, die ein eingeschränktes Isolationspotenzial der geologischen Barriere zur Folge haben können. Im Ergebnis der untertägigen Standorterkundungsarbeiten muss deshalb nachgewiesen werden, dass die Gesteine im geplanten Einlagerungsbereich nur einen geringen tektonischen Beanspruchungs- bzw. Gestörtheitsgrad aufweisen und Grundwassermigrationspfade weitgehend fehlen (siehe z.B. das Untersuchungsprogramm im URL Onkalo, Finnland; Vira 2008).

Weitere Anwendungsbeispiele für die untertägige hydrogeologische Erkundung von Standorten in kristallinen Gesteinen sind in Nagra (1999) und SKB (2007, 2008) dargestellt. Die

Methodik hydrogeologischer Messungen wird u.a. in Hölting & Coldewey (2005), Langguth & Voigt (2004) sowie Schreiner & Kreysing (1998) beschrieben.

Für die Beurteilung der hydraulischen Barrierefunktion des geologischen Nahfeldes eines Endlagers ist die exakte Lokalisierung und Charakterisierung möglicher Transportwege für Radionuklide sowie die Bestimmung der Transportmechanismen und -eigenschaften des Gebirges bzw. der Gesteine erforderlich.

Im Mittelpunkt der Erkundungsarbeiten stehen dabei:

- Untersuchungen zur lateralen und vertikalen Variabilität der hydraulischen Gebirgs- und Gesteinseigenschaften sowie zu hydraulischen Verbindungen zwischen unterschiedlichen Aquiferen
- Studien zum Nachweis hydraulisch aktiver Störungszonen
- Analysen der Transport- und Rückhaltemechanismen für Radionuklide in der Gesteinsmatrix und/oder in Kluftsystemen (Studien zu Advektion, Diffusion, Sorption, Retention etc.)
- Lokalisierung und detaillierte Charakterisierung möglicher Transportwege für Radionuklide (3D-Geometrie der Grundwasserleiter, Kluftnetzwerk, Einfluss des Endlagerbaus auf die Integrität des Gebirges)
- Untersuchung der Einflussfaktoren auf die hydrogeologischen Verhältnisse im unmittelbaren Umfeld des Endlagers (Einfluss der Gesteinsfazies, Heterogenität der hydrogeologischen Einheiten, Anisotropie der hydraulischen Eigenschaften, Kluft- und Störungssysteme, hydraulische Gradienten)

Bei der hydrogeologischen Charakterisierung der Wirtsgesteine kommen überwiegend die folgenden Untersuchungsmethoden bzw. Tests zum Einsatz:

- Pumpversuche zur Bestimmung der wasserleitenden und wasserspeichernden Eigenschaften eines Aquifers und zur hydrochemischen Probenahme
- Wasserdruckversuche (im standfesten Gebirge) zwecks Analyse der Wasseraufnahmefähigkeit und Durchflussrate ($2 \cdot 10^{-5}$ bis $2 \cdot 10^{-8}$ m/s)
- Fluid-Logging (Porengrundwasserleiter, Kluftwasserleiter) zur Bestimmung von Kluftwasserzutritten und der hydraulischen Durchlässigkeit
- Slug-Test (Bestimmung der Transmissivität eines Aquifers, wobei T zwischen 10^{-3} und 10^{-7} m²/s schwankt)
- Injektions- bzw. Pulse-Tests zur Bestimmung sehr niedriger Durchlässigkeitsbeiwerte
- Tracerversuche (z.B. Flüssigtracer: Salzwasser, diverse Standardtracer, radioaktive Tracer, Gase)
- Langzeitdiffusionsversuche

Die Auswahl der anzuwendenden Bohrlochtests richtet sich vor allem nach den hydraulischen Durchlässigkeiten der zu analysierenden Gesteinsformationen. Pumpversuche, Wasserdruck-Tests oder Slug-Tests, d.h. Auffüllversuche, sind vorwiegend für die Bestimmung mittlerer Gebirgsdurchlässigkeiten geeignet (bis minimal 10^{-9} m/s). Injektions- bzw.

Pulse-Tests und Entnahmetests mit konstanter Rate (Constant Rate Test) lassen die Bestimmung deutlich niedrigerer Durchlässigkeitsbeiwerte (bis minimal 10^{-11} m/s) zu. In den gering durchlässigen kristallinen Wirtsgesteinen kommen überwiegend Packertests in Bohrungen zur Anwendung, wobei verschiedene Messsysteme für unterschiedliche Fragestellungen und Bohrungsgrößen existieren. Der Einsatzbereich reicht von kurzen, nur wenige Meter langen Bohrungen bis zu Bohrungen, die mehrere hundert Meter lang sein können. Eingesetzt werden Einfachpacker zur Untersuchung größerer Bohrungsbereiche (Pumpversuche gegen die Bohrlochsohle) sowie Doppel- und Mehrfachpackersysteme zur Abgrenzung definierter Messbereiche (10 cm bis mehrere Meter, vor allem im Streckennahmbereich oder zur Abgrenzung von Kluftsystemen).

Zur Charakterisierung von Kluftsystemen werden die hydrogeologischen Tests häufig in Bohrlochfächern durchgeführt, die mehrere Kluftsysteme anschneiden und damit die Möglichkeit geben, die räumlichen Vernetzung der Klüfte zu untersuchen. Dies geschah beispielsweise im Rahmen des Bohrlochkranzversuches im URL Grimsel (Liedtke et al. 1994) und im TRUE-Experiment (SKB 2008). Bei den hydraulischen Messungen stehen ausgehend von den Erfahrungen der Untersuchungen im URL Grimsel (Nagra 2003) vor allem deutlich geschieferete, metamorph überprägte Gesteinsbereiche, intensiv geklüftete Wirtsgesteinspartien und Kontaktzonen von magmatischen Gängen oder Einschlüssen im Fokus. Außerdem werden zwecks Charakterisierung der hydraulischen und gesteinsphysikalischen Eigenschaften der Auflockerungszone im Umfeld von bergmännischen Auffahrungen (EDZ) umfangreiche hydrogeologische Untersuchungen mit Kurzintervall- und Oberflächenpackern durchgeführt (Abb. 4.27 bis Abb. 4.31).



Abb. 4.27: Kurzintervall-Packer zur Messung von Gesteinspermeabilitäten im Streckennahmbereich (Quelle: BGR).



Abb. 4.28: Vorbereitung eines hydraulischen Tests zur Bestimmung der hydraulischen Durchlässigkeit der Auflockerungszone mittels Oberflächenpacker im URL Äspö (Quelle: BGR).

Die untertägigen hydrogeologischen Erkundungsarbeiten werden i.d.R. durch ein umfangreiches Hydro-Monitoring-System in den von über- und untertage gebohrten Bohrungen ergänzt. Dabei werden z.B. der Wasserdruck, der Grundwasserstand oder die elektrische Leitfähigkeit der Grundwässer erfasst. Im URL Äspö und in seinem unmittelbaren Umfeld

befinden sich mehr als 140 Bohrungen (40 von der Oberfläche und ca. 100 vom Tunnel aus gebohrt), die regelmäßig vermessen werden.



Abb. 4.29: Schematische Darstellung zur Nutzung von Oberflächenpackern bei der Analyse der hydraulischen Durchlässigkeit von kristallinen Gesteinen im Umfeld von bergmännischen Auffahrungen.

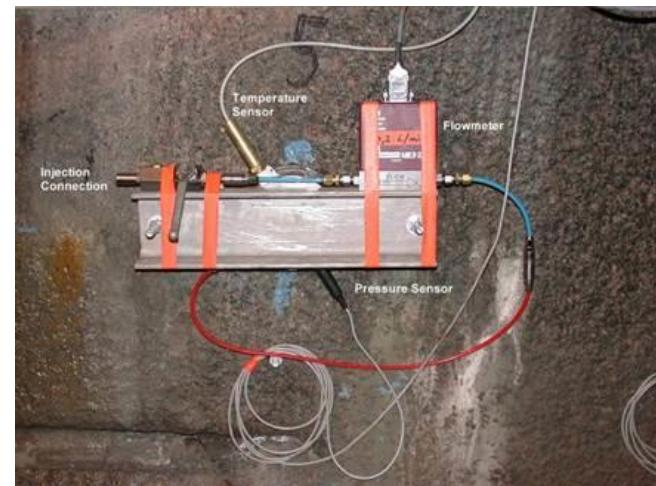


Abb. 4.30: Foto zum Einsatz eines Oberflächenpackers im URL Äspö (Quelle: BGR).

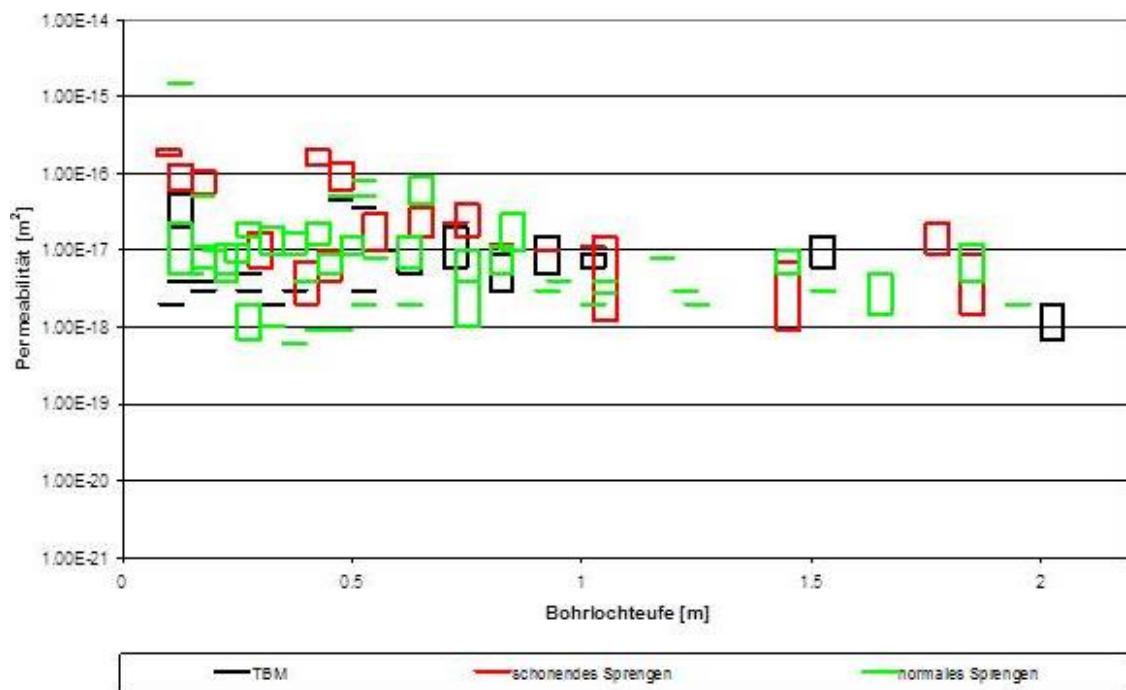


Abb. 4.31: Veränderung der hydraulischen Durchlässigkeit von kristallinen Gesteinen im Umfeld einer bergmännischen Auffahrung (URL Äspö; Quelle: BGR).

In den letzten Jahren gewinnen hydrochemische und isotopenhydrologische Untersuchungen zunehmend an Bedeutung, um die Kenntnisse zur Grundwassergenese zu verbessern sowie insbesondere die Transporteigenschaften der Gesteine und der Trennflächensysteme auch in Verbindung mit geotechnischen Barrieren und Verschlussmaßnahmen zu untersuchen. Außerdem kommen In-situ-Versuche zur Bestimmung der Filtrationseigenschaften und Migrationsgeschwindigkeiten der Radionuklide mittels hydraulischer Testverfahren und Tracer-Versuche zur Anwendung (Smith et al. 2001).

Neben den genannten Methoden werden in den URL's Diffusionstests und Untersuchungen zum Nachweis und zur Charakterisierung von Fließwegen, z.B. durch Injektion von Kunstharz (Visualisierung der Geometrie von Fließwegen in sehr kleinen Maßstäben, Analyse des Porenraumes und Lokalisierung von Mikrorissen) durchgeführt. Neben den In-situ-Untersuchungen werden im Labor hydrogeologisch relevante Gesteinseigenschaften bestimmt. Dazu zählen z.B. die effektive Porosität, der Wassergehalt, die Gesteinsdichte und der Durchlässigkeitsteilwert. Außerdem werden mittels spezieller Laborexperimente die Diffusions- und Sorptionseigenschaften der Wirtsgesteine und der Gesteine des Fernfeldes analysiert, unter Berücksichtigung eventuell ablaufender biogeochemischer Reaktionen und des radioaktiven Zerfalls. Zusätzlich erfolgen spezielle Untersuchungen zum Einfluss geochemischer Prozesse (z.B. Gasbildung durch Korrosion) auf das Grundwassermilieu und die Gesteine im Endlagerniveau.

Ergänzend zu den genannten hydrogeologischen Untersuchungen erfolgen Analysen der chemischen und isotopengeochemischen Zusammensetzung von Formationswässern, Kluftwässern bzw. Tiefenwässern sowie Bestimmungen der Temperatur, elektrischen Leitfähigkeit, des pH-Wertes und der Dichte der Lösungen. Die chemische Beschaffenheit und die Isotopenzusammensetzung der gelösten Komponenten eines Grundwassers sind abhängig von dessen Herkunft, von den Infiltrationsbedingungen, den Wechselwirkungen mit den durchflossenen Gesteinen und möglichen Mischungen mit anderen Grundwassertypen entlang des Fließweges. Ziel der z.T. bereits im Verlaufe der übertägigen Standorterkundung (Tiefbohrungen von Übertage) vorgenommenen hydrochemischen und isotopengeochemischen Charakterisierung der Grundwässer ist die Klärung ihrer Herkunft (inklusive Ausschluss bzw. Quantifizierung von Zuflüssen aus dem Deck- und Nebengebirge), die Bestimmung ihrer Verweilzeit im Untergrund und die Analyse ihrer geochemischen Besonderheiten. Dies erlaubt weitergehende Aussagen über eine mögliche hydraulische Kommunikation zwischen unterschiedlichen Aquiferen, die Eingliederung in die regionalen Grundwasserströmungsverhältnisse sowie die Bestimmung der zeitlichen und chemischen Randbedingungen für mögliche Stofftransporte in Wirts- und Nebengesteinen. Als Belege für fehlende Wegsamkeiten zwischen oberflächennahen Grundwasserleitern und einzulagerten Abfallgebinden dienen ein hohes Alter der im Einlagerungsniveau angetroffenen Grundwässer, der fehlende Nachweis von Tritium und ¹⁴C in diesen Grundwässern sowie hydrochemische Indikatoren für das Nichtvorhandensein einer solchen Verbindung.

4.3.2.3 Geomechanische und thermophysikalische Untersuchungsmethoden

Im Rahmen des untertägigen geomechanischen Untersuchungsprogramms werden folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Bestimmung felsmechanischer Kennwerte durch z.B. Verformungsmessungen (Konvergenz, Extensometer, Fissurometer, Inklinometer)
- Analyse der Festigkeitseigenschaften (Druck-, Zug- und Scherfestigkeit) der Gesteine
- Ermittlung des primären Gebirgsspannungszustandes und Erfassung von Spannungsänderungen durch Streckenauffahrungen
- Untersuchungen zum Einfluss geologischer u.a. Faktoren (Lithologie, Fazieswechsel, Heterogenitäten bzw. Anisotropien in der Zusammensetzung und in den Eigenschaften der Gesteine, Trennflächenorientierung und -häufigkeit, Temperatur) auf das Gebirgsverhalten
- numerische Berechnungen zur Prognose des Verformungsverhaltens und zur Spannungsumverteilung bei Einlagerung der Wärme produzierenden Abfälle
- Bewertungen der Standsicherheit der untertägigen Hohlräume
- Nachweis von durch den Endlagerbau und -betrieb verursachten Spannungsumlagerungen
- Untersuchungen des Einflusses des Endlagerbergwerkes auf die Barrieren (z.B. Deformationen, Spannungen, Ausmaß und Intensität der EDZ)

Auf der Grundlage dieser Daten erfolgt der erforderliche Nachweis der geomechanischen Integrität der geologischen Barriere.

Messungen des Gebirgsspannungszustandes beruhen auf Kurzzeitmessungen von Gebirgs- bzw. Bohrlochentlastungen nach der Überbohrmethode oder nach der Hydrofrac-Methode (Fecker & Reick 1996). Die Ermittlung der primären Gebirgsspannungen mittels Überbohrversuchen erfolgt häufig mit der BGR-Überbohrmethode oder mittels CSIRO-Sonde (Fecker & Reik 1996). Das Prinzip der Überbohrversuche ist in Abb. 4.32 dargestellt.

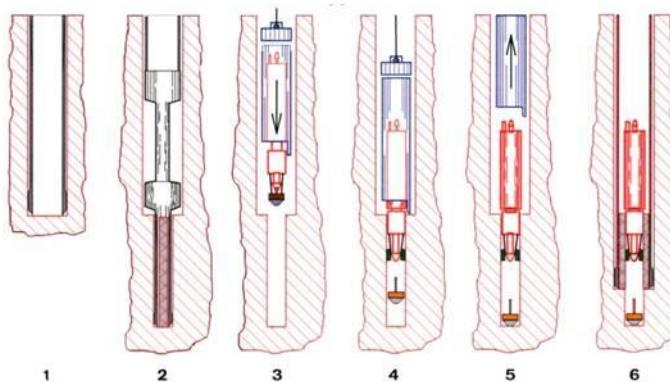


Abb. 4.32:
Schematische Darstellung zum Prinzip von
Gebirgsspannungsmessungen mittels
Überbohrmethode (SKB 2005a).

Die räumliche Lage der Hauptspannungsrichtung kann auch anhand der Richtung von Bohrlochrandausbrüchen bestimmt (Abb. 4.33) werden, wie dies im Rahmen des Mine-by-Experiments im URL Whiteshell im Granitmassiv Lac du Bonne, Kanada, erfolgte (Read et al. 1998). Die dortigen Untersuchungen dienten zur Feststellung des Einflusses schwieriger tektonischer Rahmenbedingungen ($s_1=60+3$ MPa, $s_2=45+4$ MPa, $s_3=11+2$ MPa) auf die Stabilität bergmännischer Auffahrungen, insbesondere von vertikal verlaufenden Auffahrungen (mit einem Durchmesser von 3,5 m, siehe Foto in Abb. 4.33). Deutlich zu sehen ist die Ellipsenform, wobei die Deformationen bevorzugt in der Achse des minimalen Stresses an-

geordnet sind. Die In-situ-Messdaten werden durch die Ergebnisse der Messungen mikroakustischer Emissionen (es wurden ca. 9000 Ereignisse erfasst) bestätigt (rechte untere Abbildung). Alternativ kann die räumliche Lage aus der Deformation vertikaler Auffahrungen (z. B. Rolllöcher) abgeleitet werden (Read et al. 1998, Laverov et al. 2002).

Erfahrungen der Erkundung des potenziellen finnischen Endlagerstandortes Olkilluoto (Posiva 2005) und des URL Grimsel (Pahl & Heusermann 1991) belegen das häufige Vorkommen

von deutlichen geomechanischen Anisotropien in kristallinen Gesteinen, gepaart mit stark mit der Teufe oder der Nähe zu mächtigen Störungszonen variierenden Gebirgsspannungsbeträgen.

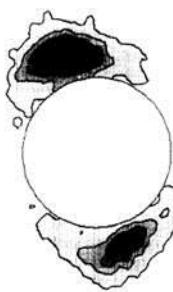
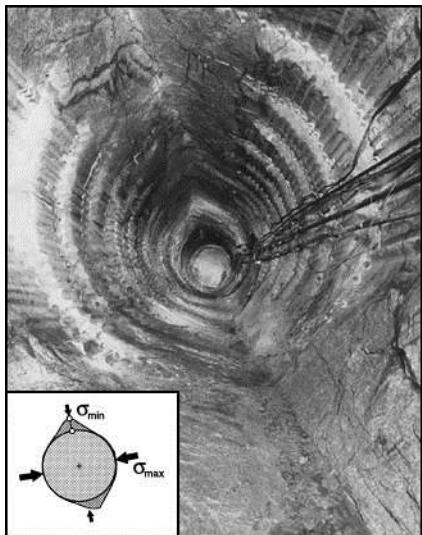


Abb. 4.33:
Schematische Darstellung der Internstruktur für das Mine-by-Experiment auf der 420 m-Sohle des URL Whiteshell im Granitmassiv Lac du Bonne, Kanada (nach Read et al. 1998).

Aus Umlagerungsprozessen im Gebirge, die durch die Auffahrung von Grubenräumen sowie durch den Betrieb des Erkundungs- bzw. Endlagerbergwerkes hervorgerufen werden, resultieren sowohl großräumige als auch lokal begrenzte Gebirgsdeformationen, die mit Verformungsmessungen erfasst werden. Deshalb erfolgen In-situ-Messungen des untertägigen Deformations- bzw. Ausbruchverhaltens der Gesteine mittels Konvergenz-, Extensometer-, Inklinometer- und Fissurometer-Messeinrichtungen.

Die dabei zum Einsatz kommenden Verfahren und Geräte unterscheiden sich prinzipiell nicht von den Arbeiten im Steinsalz oder Tongestein. Zur Erfassung und Lokalisierung von Spannungskonzentrationen und der daran gebundenen bruchhaften Ereignisse werden ähnlich wie in den anderen Wirtsgesteinstypen mikroakustische Messungen in speziell angeordneten Bohrungen durchgeführt.

Da die Temperaturen im geplanten Einlagerungsniveau wesentlichen Einfluss auf das Endlagerkonzept bzw. den Endlagerbau inklusive die Ausmaße des Endlagers haben, müssen sie im Vorfeld der endgültigen Standortentscheidung exakt untersucht werden. Die thermophysikalischen Gesteinsparameter, insbesondere die Wärmeleitfähigkeit des Wirtsgesteins, bestimmen entscheidend die Geschwindigkeit der Wärmeabfuhr in das Gebirge und damit die Höhe der Maximaltemperaturen in Behälternähe. Die thermische Leitfähigkeit kristalliner Gesteine kann in Abhängigkeit von ihrer Petrographie und von der Teufe sowie von der Gesteinsanisotropie bzw. von der Dichte und der Wärmeleitfähigkeit der verschiedenen Gesteinstypen richtungsabhängig beträchtlich schwanken (SKB 2008).

Im Ergebnis der untertägigen Standorterkundung müssen detaillierte Kenntnisse zur räumlichen Verteilung von Gesteinen mit unterschiedlichen thermophysikalischen Eigenschaften vorliegen. Dies stellt entsprechende Anforderungen an die Erkundung im Umfeld des geplanten Einlagerungsbereiches durch Erkundungsbohrungen bzw. mittels geophysikalischer Verfahren.

Die In-situ-Methoden werden durch Laborversuche zur Bestimmung der Material- und Festigkeitseigenschaften ergänzt. Die mechanischen und feldynamischen Gesteineigenschaften stellen wichtige Daten dar, die als Eingangsparameter Grundlage für die Erstellung und Validierung von geomechanischen Modellen sowie für numerische Berechnungen im Rahmen von Standsicherheitsbewertungen, Integritätsnachweisen und Langzeitsicherheitsanalysen sind. Hierzu zählen insbesondere die Spannungs-Deformations-Beziehungen sowie die Beschreibung der erwarteten Bruchmechanismen als Funktion des Spannungszustands. Die geomechanischen Untersuchungsmethoden werden in Price (2008), Prinz & Strauß (2006), Genske (2006) und Bender (1984) beschrieben.

4.3.2.4 Untersuchungen endlagerrelevanter gekoppelter Prozesse (konzeptbezogene Studien)

Beispiele für endlagerkonzeptionelle Untersuchungen (d.h. für Schlüsselexperimente) sind z.B. nachfolgend genannte interdisziplinäre Experimente:

- Untersuchung von Fließ- und Transportprozessen im ungestörten Gestein und entlang von tektonischen Trennflächen
- In-situ-Untersuchungen zur Sorption und Diffusion von Radionukliden am bzw. im Wirtsgestein (oder an bzw. in geotechnischen Barrieren)
- Untersuchung der Abhängigkeit zwischen hydraulischen Gesteinseigenschaften und der Geologie (Gesteinszusammensetzung, Fazies, Störungen und Klüfte etc.)
- Analyse der massstabsabhängigen Aspekte der hydraulischen Leitfähigkeit (Einfluss von Anisotropie und Heterogenität verschiedener Fazieseinheiten)
- Wirkung und Ausdehnung der Auflockerungszone um Endlagerstrecken; geophysikalische, felsmechanische, hydraulische und strukturgeologische Untersuchungen der Trennflächenorientierung und der Ausdehnung der durch die Streckenauffahrung bzw. Spannungsumlagerung induzierten Trennflächen bzw. Mikrorisse
- Auswirkungen von Erhitzer-Experimenten auf die hydraulischen und geomechanischen Gesteinseigenschaften und die geotechnischen Barrieren (z.B. Polster & Jobmann 2006)
- Auswirkungen von radioaktiver Strahlung auf das Wirtsgestein bzw. die geotechnischen Barrieren
- Untersuchungen zur Verformung von Containern und Hohlräumen durch Veränderung des äußeren Spannungsfeldes
- Versuche zur In-situ-Aufsättigung der Bentonit-Barriere
- In-situ-Versuche zur Korrosion der Container und zur Gasbildung bzw. -migration

Zusätzlich zu den In-situ-Untersuchungen zur Analyse der Einflussgrößen auf die endlager-relevanten Gesteinseigenschaften werden umfangreiche Studien zur Optimierung des Endlagerkonzeptes und zur Bewertung des Einflusses der Wärme produzierenden Abfälle und des Endlagerbaus auf die Barriereeigenschaften der Wirtsgesteine und technischen/geotechnischen Barrieren. So wurden z.B. im URL ONKALO folgende Arbeiten und Versuche durchgeführt (Vieno et al. 1992):

- Auslaugungsverhalten der Brennelemente unter In-situ-Bedingungen
- Korrosion der Kanister und Austritt von Wasserstoff durch den Bentonitbuffer
- Studium der Auflockerungszone hinsichtlich Ausmaß, Intensität der Deformation sowie Entstehung und Verheilung von Klüften
- Radionuklidlöslichkeit und -migration im Nahfeld-Milieu
- Bedeutung von Kolloidtransport und Matrixdiffusion für den Radionuklidtransport

Besonders umfangreiche Untersuchungen zur Bewertung der Rückhalteeigenschaften kristalliner Wirtsgesteine und zur Optimierung der Endlagerkonzepte in Magmatiten erfolgten in internationaler Kooperation im URL Äspö. Die wichtigsten Arbeiten zur Charakterisierung der natürlichen und geotechnischen Barrieren sind in SKB (2008b) aufgeführt.

4.3.3 Zusammenstellung grundlegender Parameter für kristalline Wirtsgesteine

Im Rahmen der Recherchen wurde damit begonnen, für die URL Grimsel, Äspö und Onkalo einige der während der untertägigen Erkundungsarbeiten bestimmten Wirtsgesteinsparameter tabellarisch zusammenzustellen. In Anbetracht der begrenzten zeitlichen Möglichkeiten handelt es sich nicht um eine systematische Erfassung aller aus den Erkundungsarbeiten resultierenden Gesteinskenngrößen. Es wird allerdings bereits deutlich, dass trotz fehlender Standorterkundungsarbeiten in den kristallinen Gesteinen Deutschlands durch die Nutzung ausländischer Untersuchungsergebnisse ausreichend Daten zu den endlagerrelevanten Eigenschaften kristalliner Gesteine für die Entwicklung von Endlagerkonzepten und die Erarbeitung deutscher Sicherheits- und Nachweiskonzepte zur Verfügung stehen.

Auf die Ableitung von Referenzwerten wurde an dieser Stelle verzichtet, da dafür ein plausibles geologisches Modell für einen potenziellen Standort benötigt wird, für dessen geologische Einheiten die Referenzwerte festgelegt werden können.

4.3.3.1 Grimsel

Wichtige felsmechanische und geophysikalische Kennwerte der Gesteine aus dem Felslabor Grimsel sind in Tab. 4.1 zusammengestellt. Die meisten Bestimmungen erfolgten an Bohrkernen im Labor. Da das Gestein im Gebirge unter einem höheren Spannungszustand steht, entsprechen diese Ergebnisse nicht den In-situ-Werten. Bei den angegebenen Kennwerten handelt es sich um die Parameter des im Kleinbereich intakten Gesteins. Die diesbezüglichen Gebirgseigenschaften werden zusätzlich von Klüftigkeit, Gesteinswechseln u.a. beeinflusst. Diese Faktoren wirken sich vor allem auch auf die Permeabilität aus.

Tab. 4.1: Gesteinsmechanische Parameter für vier Hauptgesteine des Felslabors Grimsel. Werte mit Standardabweichungen, in Klammern Werteanzahl, in eckigen Klammer Testparameter (aus: Keusen et al. 1989).

Parameter	Zentraler Aaregranit	Grimsel-Granodiorit	Aplit	Lamprophyr
Rohdichte [kg/m ³]	2660 ± 23,8 (105)	2706 ± 13,6 (58)	2599 ± 17,4 (25)	2909 ± 31,0 (19)
Porosität [Vol.-%]	0,4 – 1,0			
Einachsige Druckfestigkeit [MPa]	169,1 ± 37,1 (54)	116,9 ± 47,9 (28)	225,6 ± 45,4 (13)	127,0 ± 31,8 (9)
Young's Modulus (E ₅₀ -Modul) [GPa]	53,3 ± 11,0 (54)	47,3 ± 15,4 (28)	60,2 ± 8,9 (15)	42,4 ± 8,5 (9)
Poisson's Ratio [-]	0,37 ± 0,12 (54) 0,33 ± 0,03	0,33 ± 0,15 (28)	0,40 ± 0,12 (13)	0,33 ± 0,17 (9)
Zugfestigkeit (Spaltzugfestigkeit) [MPa]	9,06 ± 1,48 (42)	9,54 ± 2,17 (24)	9,27 ± 0,95 (9)	12,55 ± 3,59 (6)
Triaxiale Druckfestigkeit [MPa]	263 ± 29,9 (4) [5 MPa] 333 ± 20,6 (2) [10 MPa] 410 ± 63,8 (3) [20 MPa]	230 ± 70,7 (2) [5 MPa] 287 ± 24,7 (2) [10 MPa] 355 ± 28,3 (2) [20 MPa]	297 (1) [5 MPa] 395 (1) [10 MPa] 455 (1) [20 MPa]	240 (1) [5 MPa] 226±44 (3) [20 MPa]
Reibungswinkel [(*): auf Klüften]	33 (1) (*)	30 ± 2 (3) (*)	34 (*)	32,5 ± 3,5
Druckwellengeschwindigkeit am Handstück [m/s] (wg=wassergesättigt)	3111 ± 278 (105) 3100 – 3500 [trocken] 4650 – 4750 [wg]	3351 ± 388 (58)	2948 ± 428 (25)	2120 ± 480 (4)
Druckwellengeschwindigkeit im Gebirge [m/s]	5600 ± 100 5450 – 5500 5200	5600 ± 100 5250 ± 100	5400 – 5700 5500 – 6200	5700 – 6100 5200 – 6250
Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)] (tr = trocken, f = feucht)	2,58 ± 0,19 (20) [tr] 3,34 ± 0,35 (20) [f]	2,46 ± 0,19 (16) [tr] 3,22 ± 0,29 (16) [f]	3,31 ± 0,35 (2) [tr] 5,32 ± 0,49 (2) [f]	2,21 ± 0,45 (3) [tr] 2,71 ± 0,60 (3) [f]
Permeabilität [m/s]	5·10 ⁻¹⁷ [10 MPa] 3,5 – 45·10 ⁻¹² [5–15 MPa] 5·10 ⁻¹² [5–30 MPa]			

4.3.3.2 Äspö

Felsmechanische und thermische Kennwerte der Gesteine aus dem URL Äspö sind in Tab. 4.2 bis Tab. 4.4 zusammengestellt.

Tab. 4.2: E-Modul und Poissonzahl für vier Hauptgesteinstypen des URL Äspö, gewonnen aus von der Oberfläche bzw. aus Stollen entnommenen Bohrkernen (aus: Makurat et al. 2006).

Parameter	Greenstone			feinkörniger Granit			Äspö-Diorit			Småland-Granit		
	n	MW	Bereich	n	MW	Bereich	n	MW	Bereich	n	MW	Bereich
von der Oberfläche aus erbohrte Bohrkerne												
E-Modul [GPa]	4	53	32 – 74	4	65	59 – 70	4	60	54 – 65	4	62	62 – 63
Poissonzahl [-]	4	0,25	0,24 – 0,26	4	0,22	0,20 – 0,22	4	0,23	0,20 – 0,25	4	0,24	0,24
von aus Stollen erbohrten Bohrkernen												
E-Modul [GPa]	10	78	71 – 96	9	77	72 – 80	10	73	65 – 80	10	74	63 – 79
Poissonzahl [-]	10	0,24	0,18 – 0,31	9	0,23	0,21 – 0,25	10	0,24	0,22 – 0,29	10	0,23	0,20 – 0,26

Tab. 4.3: Thermische Parameter für vier Hauptgesteinstypen des URL Äspö (aus: Sundberg 2002).

Typ	Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)]		volumetrische Wärmekapazität [MJ/(m³·K)]		Dichte [kg/m³]
	gemessen	berechnet	gemessen	berechnet	berechnet
Äspö-Diorit	MW = 2,56 2,34 – 2,84 (5)	2,35	2,09	2,11	2745
alterierter Äspö-Diorit	MW = 3,11 n = 1	3,38	2,30	2,07	2725
Ävrö-Granit	MW = 3,24 2,99 – 3,55 (3)	3,01	2,13	2,01	2655
feinkörniger Granit	MW = 3,63 3,58 – 3,68 (2)	3,45	1,97	1,99	2640

Tab. 4.4: Gesteinsmechanische Parameter des Äspö-Diorits (Labortests an Bohrkernen aus den TASQ-, TBM- und ZEDEX-Stollen, wenn nicht anders erwähnt).

Parameter	Einheit	Mittelwert ± Standardabw.	Wertebereich (Anzahl)	Literatur
uniaxiale Druckfestigkeit	MPa	211 ± 23,3	187 – 244 (7)	1, 2 (TASQ)
E-Modul, intaktes Gestein	GPa	76 ± 6,5	69 – 79	1, 2 (TASQ)
E-Modul	MPa	64,1 ± 7,1	52,25 – 77,31 (9)	5 (TBM)
E-Modul, intaktes Gestein	GPa	55		1, 2 (TASQ)
Poissonzahl, intaktes Gestein	–	0,25 ± 0,02	0,21 – 0,28 (15)	1, 2 (TASQ)
Poissonzahl, intaktes Gestein	–	0,22 ± 0,03	0,18 – 0,26 (9)	5 (TBM)
Reibungswinkel, intaktes Gestein	°	49*		1, 2 (TASQ)
Reibungswinkel	°		49	4 (TASQ)
Reibungswinkel, Klüfte	°		25 – 35	4 (TASQ)
Kohäsion, intaktes Gestein	MPa	31*		1, 2 (TASQ)
Kohäsion	MPa		22,5 – 31	4 (TASQ)
Kohäsion, Klüfte	MPa		0 – 20	4 (TASQ)
Zugfestigkeit	MPa	14,9 ± 1,1	12,9 – 15,9 (6)	1, 2 (TASQ)
Druckfestigkeit	MPa	223,2 ± 42,2	136 – 265 (7)	1, 2 (TASQ)
Wärmeleitfähigkeit	W/(m·K)	2,60	2,39 – 2,80	1, 2 (TASQ)
Wärmespeicherzahl (auf das Volumen bezogene Wärmekapazität)	MJ/(m³·K)	2,10	2,05 – 2,29	1, 2 (TASQ)
Lineare Ausdehnung (Wärmeausdehnung)	(1/K) · 10⁻⁶	7,0	6,2 – 8,3	1, 2 (TASQ)
Dichte (trocken)	kg/m³	2746 ± 5	2740 – 2750 (5)	1, 2 (TASQ)
Dichte (feucht)	kg/m³	2754 ± 5	2750 – 2760 (5)	1, 2 (TASQ)
Dichte	kg/m³	2733 ± 13	2716 – 2756 (6)	1, 2 (TASQ)
Porosität	%	0,3 ± 0,10	0,15 – 0,40 (5)	1, 2 (TASQ)
hydraulische Leitfähigkeit	m/s	1,5 · 10⁻¹³		3 (ZEDEX)
Initiale Temperatur des Gesteins (intaktes Gestein, gemessen in situ)	°C	14,5		1, 2 (TASQ)
Rissbildungsspannung	MPa	121	80 – 160	1, 2 (APSE)
Rissbildungsspannung	MPa	95	83 – 112	1, 2 (APSE)
normale Steifigkeit, Klüfte	GPa/m		20 – 27.000	4 (TASQ)
Schersteifigkeit, Klüfte	GPa/m		2 – 2.700	4 (TASQ)
Dilatationswinkel, Klüfte	°		2	4 (TASQ)
Kluft-Zugfestigkeit, K_{IC}	MPa · m ^{0,5}		3,8	4 (TASQ)
Kluft-Scherfestigkeit, K_{IIC}	MPa · m ^{0,5}		4,4	4 (TASQ)
Initiale Kluftweite	m		10 · 10 ⁻⁶	4 (TASQ)
Residual Kluftweite	m		1 · 10 ⁻⁶	4 (TASQ)
Initiale Risslänge	m		0,002	4 (TASQ)
Initiale Rissgröße (DQ)	m		0,075	4 (TASQ)
Initiale Rissgröße (TASQ)	m		0,25 – 0,05	4 (TASQ)

* Durchschnittswerte aus Äspö URL. 1 - Anderson (2007), 2 - Staub et al. (2004), 3 - Emsley et al. (1997), 4 - Rinne et al. (2013), 5 - Hakala et al.

4.3.3.3 Onkalo

Felsmechanische und thermische Kennwerte der Gesteine aus URL Onkalo sind in Tab. 4.5 zusammengestellt.

Tab. 4.5: Gesteinsmechanische Parameter für die Hauptgesteinstypen des URL Onkalo

Parameter	Gestein	MW ± Stabw.	95% Konfidenz- niv.	Probenanzahl	Literatur
E-Modul [GPa]	GN	60 ± 10	31 / 81	109	1
	PGR	60 ± 8	47 / 73	13	1
Poissonzahl [mm/mm]	GN	0,25 ± 0,04	0,15 / 0,33	109	1
	PGR	0,29 ± 0,06	0,14 / 0,34	13	1
Druckfestigkeit [MPa]	GN	108 ± 26	58 / 161	94	1
	PGR	102 ± 27	56 / 146	13	1
Indirekte Zugfestigkeit, $\sigma_{T,I}$ [MPa]	GN	12,1 ± 2,9	6,6 / 17,4	98	1
	PGR	8,9 ± 2,1	4,6 / 12,0	51	1
Direkte Zugfestigkeit, $\sigma_{T,D}$ [MPa]	GN	7,6 ± 1,5	5,9 / 10,3	18	1
	PGR	–	–	–	1
Wärmeleitfähigkeit [W/(m·K)]	VGN	2,83 ± 0,53		216	1
	TGG	2,78 ± 0,39		56	1
	DGN	2,95 ± 0,64		20	1
	MGN	2,66 ± 0,49		6	1
	PGR	3,20 ± 0,41		89	1
	KFP	2,78		1	1
	QGN	2,49		2	1
	alle	2,91 ± 0,51		390	1
spezifische Wärmekapazität [J/(kg·K)]	VGN	725 ± 33		149	1
	TGG	696 ± 19		22	1
	DGN	708 ± 28		17	1
	MGN	724 ± 41		6	1
	PGR	689 ± 17		61	1
	KFP	687		1	1
	QGN	714		1	1
	alle	712 ± 32		257	1
Lineare Ausdehnung (Wärmeausdehnung) [1/K · 10 ⁻⁶]	VGN	10,6 ± 2,2		10	1
	TGG	n.a.			1
	DGN	8,3 ± 0,7		6	1
	MGN	n.a.			1
	PGR	7,2 ± 2,8		6	1
	alle	9,0 ± 2,5		22	1
Dichte [kg/m ³]	VGN	2741 ± 43		217	1
	TGG	2700 ± 29		54	1
	DGN	2742 ± 51		20	1
	MGN	2742 ± 33		6	1
	PGR	2635 ± 38		89	1
	KFP	2729		1	1
	QGN	2766		2	1
	alle	2711 ± 59		389	1
Diffusivität [10 ⁻⁶ m ² /s]	VGN	1,37 ± 0,25		147	1
	TGG	1,35 ± 0,12		21	1
	DGN	1,53 ± 0,34		17	1

Parameter	Gestein	MW ± Stabw.	95% Konfidenz- niv.	Probenanzahl	Literatur
	MGN	1,34 ± 0,28		6	1
	PGR	1,75 ± 0,18		61	1
	KFP	1,48		1	1
	QGN	0,01		1	1
	alle	1,47 ± 0,29		254	1
Kohäsion	PGR	12,9			2, 3
	VGN	12,4			2, 3
	VGN _⊥	13,8			2, 3
Reibungswinkel	PGR	47			2, 3
	VGN	45			2, 3
	VGN _⊥	47			2, 3
Kluft-Festigkeit (Mode I)	PGR	1,96			2, 3
	VGN	1,87			2, 3
	VGN _⊥	3,05			2, 3
Kluft-Festigkeit (Mode II)	PGR	3,30			2, 3
	VGN	3,00			2, 3
	VGN _⊥	3,86			2, 3
Kluft-Kohäsion [MPa]	PGR	10			2, 3
	VGN	10			2, 3
	VGN _⊥	10			2, 3
Kluft-Reibungswinkel [°]	PGR	35			4
	VGN	35			4
	VGN _⊥	35			4
Kluft-Dilatationswinkel [°]	PGR	2,5			4
	VGN	2,5			4
	VGN _⊥	2,5			4
normale Kluft-Steifigkeit [GPa/m]	PGR	20.000			2, 3
	VGN	20.000			2, 3
	VGN _⊥	20.000			2, 3
Kluft-Schersteifigkeit [GPa/m]	PGR	2.000			2, 3
	VGN	2.000			2, 3
	VGN _⊥	2.000			2, 3
VGN = veined gneiss, TGG = tonalitic-granodioritic-granitic gneiss, DGN = diatexitic gneiss, MGN = mica gneiss, PGR = pegmatitic granite, KFP = potassiumfeldspar porphyry; QGN = quartzitic gneiss 1 – Posiva Oy (2012), 2 – Siren (2011), 3 – Siren (2012), 4 – Annahme nach Posiva (2012b)					

4.4 Klassifikation des Eignungsgrades kristalliner Gesteine

Aufgrund der häufig großen räumlichen Veränderlichkeit der hydraulischen und geomechanischen Barriereeigenschaften von kristallinen Wirtsgesteinen ist für die Platzierung der Einlagerungsstrecken und der Einlagerungsbohrlöcher sowie für die Auswahl der Standorte für den Bau der geotechnischen Barrieren eine in der praktischen Erkundungsarbeit unkompliziert einzusetzende Methode zur Bewertung des Eignungsgrades der kristallinen Wirtsgesteine erforderlich. Das im finnischen Untertagelabor ONKALO entwickelte und umfangreich praktisch getestete Verfahren zur Klassifikation des Eignungsgrades von kristallinen Gesteinen („Rock Suitability Classification“ (RSC)) entspricht diesen Anforderun-

gen und gestattet die Ausweisung geeigneter Gesteinsbereiche auf der Grundlage von Gesteinsbewertungskriterien (McEwen et al. 2012).

Die RSC-Klassifikation dient neben der Kontrolle der Erfüllung der Standortanforderungen durch die einzelnen im Endlagerbergwerk erschlossenen Wirtsgesteinsbereiche auch zur Standortbewertung. Sie kann in unterschiedlichen Phasen der Standorterkundung angewendet werden und ermöglicht, bei unterschiedlichem Maßstab der Erkundungsarbeiten, nacheinander die Ausweisung des Gesteinsbereiches zum Bau des Endlagerbergwerkes (repository stage), der Einlagerungsbereiche (panel stage), der Einlagerungsstrecken (tunnel stage) und der Einlagerungsbohrlöcher (depositional hole stage).

Die Entwicklung des RSC-Bewertungssystems begann Anfang der 2000-er Jahre, ein erster Zwischenstand der Methodenentwicklung wurde in Hellä et al. (2009) dargestellt. Die Gesteinseignungsklassifikation basiert auf mehreren quantifizierbaren oder kartierbaren Gesteinsparametern, die von entscheidender Bedeutung für die Langzeitsicherheit des geplanten Endlagers sind. Die Gesteinseignungskriterien werden nach McEwen et al. (2012) in 3 Gruppen eingeteilt:

1. Kriterien in Bezug auf die Geochemie der Grundwässer im Einlagerungsniveau
2. Kriterien bezüglich der hydraulischen Eigenschaften der Wirtsgesteine
3. Kriterien bezüglich der mechanischen Eigenschaften der Wirtsgesteine.

Die Einschätzung der geochemischen Eignung von Wirtsgesteinsbereichen basiert auf einer Bewertung der Einflüsse der Grundwässer im geplanten Einlagerungsniveau auf die Behälterkorrosion, auf die anforderungsgemäße Entwicklung der Buffer- bzw. Versatz-Eigenschaften sowie auf die Freisetzung und den Transport von Radionukliden. Die im zu betrachtenden Wirtsgesteinsbereich einzuhaltenden hydro-chemischen Parameter der Grundwässer sind in Abb. 4.34 zusammengestellt und umfassen insbesondere Anforderungen bezüglich des pH-Wertes, der Chlorid-Konzentration und Gesamtmineralisation der Grundwässer. Außerdem müssen die Grundwässer anoxisch und frei von korrodierenden Beimengungen (wie z.B. HS^- , NO_3^- , NH_4^+ und Acetat) sein sowie zwecks Begrenzung mikrobieller Aktivitäten nur geringe Gehalte organischer Substanzen, von H_2 , S_{total} und Methan enthalten.

Die im RSC-System zu bewertenden hydraulischen Parameter der Wirtsgesteine sind in Abb. 4.35 graphisch zusammengestellt. Ihre Berücksichtigung bei der Auswahl von Lokationen für die Einlagerungshohlräume und -bohrlöcher gewährleistet den Ausschluss von hydraulisch aktiven Gesteinsbereichen, die Einhaltung von ausreichenden Abständen (20 m Abstand) zu (möglicherweise in der Zukunft) hydraulisch aktiven Grundwassermigrationspfaden und die Ausweisung von Gesteinsbereichen mit hohem Radionuklid-Rückhaltevermögen. Die Anwendung eines solchen Verfahrens wird dann besonders interessant, wenn es darum geht, „multiple ewGs“ auszuweisen (vgl. Kap. 2.3.2, Abb. 2.5).

Level 3 – Zieleigenschaften – Chemische Zusammensetzung des Grundwassers			
Behälterkorrosion			
Um eine Behälterkorrosion zu vermeiden, muss das Grundwasser auf Einlagerungsebene anoxisch (sauerstofffrei) sein, außer in der Anfangsphase bis zu dem Zeitpunkt, an dem der im Nahfeld eingeschlossene Sauerstoff aufgebraucht ist. Deshalb darf kein gelöster Sauerstoff vorhanden sein, nachdem der ursprünglich im Nahfeld eingeschlossene Sauerstoff aufgebraucht ist.			L3-ROC-10
Das Grundwasser auf Einlagerungsebene muss einen genügend hohen pH-Wert und eine genügend geringe Chlorid-Konzentration haben, um eine Chloridkorrosion der Behälter zu vermeiden. Der pH-Wert soll deshalb höher als 4 und die Chlorid-Konzentration $[Cl^-] < 2M$ sein.			L3-ROC-11
Die Konzentrationen von behälterangreifenden Komponenten im Grundwasser auf der Einlagerungsebene (HS , NO_2^- , NO_3^- , und NH_4^+ , Azetat) müssen begrenzt sein.			L3-ROC-12
Die Anteile an organischen Substanzen, H_2 und S_{tot} und Methan im Grundwasser auf Einlagerungsebene müssen gering sein, um mikrobielle Aktivität insbesondere von Sulfat reduzierenden Bakterien zu begrenzen.			L3-ROC-13
Eigenschaften/Verhalten von Buffer und Verfüllmaterial			
Anfangs muss das Grundwasser auf Einlagerungsebene eine genügend hohe Ionenstärke aufweisen, um die Wahrscheinlichkeit einer chemischen Korrosion des Buffers oder des Verfüllmaterials zu reduzieren. Deshalb soll das Gesamtladungsäquivalent an Kationen $\sum q[Mq^+]*$ anfangs größer als 4 mM sein. (* $[Mq^+]$ = Stoffmengenkonzentration an Kationen, q = Ladungszahl des Ions)			L3-ROC-14
Die Salinität des Grundwassers auf Einlagerungsebene muss begrenzt sein, damit im Buffer und Verfüllmaterial einen genügend hoher Quelldruck aufrechterhalten bleibt. Deswegen soll die Grundwassersalinität (TDS, total dissolved solids (vollständig gelöste Feststoffe)) unter den zukünftig erwarteten Bedingungen weniger als 35 g/l TDS betragen. Während und aufgrund der Baumaßnahmen vorübergehend auftretende Salinitäten von 70g/l sind akzeptabel.			L3-ROC-15
Der pH-Wert des Grundwassers auf Einlagerungsebene soll in einem Bereich liegen, in dem der Buffer und das Verfüllmaterial stabil bleiben (keine Montmorillonit-Lösung). Deshalb soll der pH-Wert zwischen 5 und 10 liegen. Lokal sind anfangs allerdings höhere Werte (bis zu 11) erlaubt. Der erlaubte Level hängt auch von den Kieselsäure- und Kalziumkonzentrationen ab.			L3-ROC-16
Der Gehalt an gelösten Stoffen, die sich schädlich auf die Stabilität von Buffer oder Verfüllmaterial auswirken können (K^+ , Fe_{tot}) muss im Grundwasser auf Einlagerungsebene begrenzt sein.			L3-ROC-17
Radionuklidfreisetzung und -transport			
Für eine stabile Brennstoffmatrix und eine geringe Löslichkeit müssen die Bedingungen im Grundwasser reduzierend sein.			L3-ROC-29
Um die Daten für die Sorptionsparameter zu ermitteln, muss der pH-Wert nach der Anfangsphase, in der pH-Werte bis zu 11 erlaubt sind, im Bereich 6-10 liegen.			L3-ROC-30
In der Nähe der Einlagerungsbohrlöcher muss der Gehalt an Kolloiden und organischen Stoffen im natürlichen Grundwasser gering sein, um den Radionuklidtransport zu begrenzen.			L3-ROC-31
↓			
Level 4			
Der Einsatz von Fremdmaterialien in untertägigen Hohlräumen soll kontrolliert und reglementiert sein.			L4-ROC-44
↓			
Level 5			
In einem Einlagerungsbohrloch ist keine Kluft erlaubt, in der Injektionsmaterial beobachtet wurde oder in der es Hinweise auf Injektionsmaterial gibt. L5-ROC-65	Die Grundwassersalinität soll gemäß ONK-005466 überwacht werden. L5-ROC-79	Die chemische Zusammensetzung des Grundwassers auf Einlagerungsebene soll innerhalb der durch die Zieleigenschaften festgelegten Grenzen liegen: $6 < pH < 11$, $Cl^- < 2M$, Gesamtladungsäquivalent an Kationen $\sum q[Mq^+]*$, $> 4E-3 M$, * $[Mq^+]$ = Stoffmengenkonzentration an Kationen, q = Ladungszahl des Ions L5-ROC-19	

Abb. 4.34: Anforderungen an die geochemischen Eigenschaften der Wirtsgesteine und ihrer Grundwässer entsprechend dem RSC-Klassifikationssystem (übersetzt aus: McEwen et al. 2012).

Level 3 – Zieleigenschaften – Grundwasserfluss und Lösungstransport				
Unter gesättigten Bedingungen soll der Grundwasserfluss in allen Rissen/Klüften in der Nähe eines Einlagerungsbohrlochs gering sein, um den Stofftransport zu und vom technischen Barrierensystem zu begrenzen. Deshalb soll die Flussrate in solch einer Kluft höchstens 1 Liter Fluss pro Meter durchquerender Kluftbreite pro Jahr (l/m·Jahr) betragen. Sollte mehr als eine Kluft vorhanden sein, wird die Summe aller Flussraten gebildet.				
L3-ROC-10				
Die Flussbedingungen im Wirtsgestein sollen zu einem hohen Transportwiderstand beitragen. Deshalb sollen die Migrationspfade in der Nähe eines Einlagerungsbohrlochs in den meisten Pfaden einen Transportwiderstand (WL/Q) von mehr als 10.000 Jahren/m und mindesten mehrere 1.000 Jahre/m haben.				
L3-ROC-11				
Das Eindringen von Grundwasser in die Einlagerungsstrecken soll begrenzt sein, um die Wirksamkeit des Verfüllmaterials zu gewährleisten.				
L3-ROC-12				
Die Eigenschaften des Wirtsgesteins sollen Matrixdiffusion und Sorption begünstigen.				
L3-ROC-13				
Level 4				
Alle untertägigen Räume	Einlagerungsstrecken	Einlagerungsbohrlöcher		
Bei der Positionierung der untertägigen Räume soll die Durchkreuzung weitreichender Störungszonen weitestgehend vermieden werden. (RSC-II)	Bei der Positionierung der Einlagerungsstrecken soll die Durchkreuzung weitreichender Störungszonen weitestgehend vermieden werden. (RSC-II)	Zufluss zu den Einlagerungsstrecken soll begrenzt sein, um die Installation des Verfüllmaterials zu gewährleisten und Röhrenbildung und Erosion zu begrenzen. (RSC-II)	Zufluss zu den Einlagerungsbohrlöchern soll begrenzt sein, um günstige Konditionen für das technische Barrierensystem und die Rückhaltung von Radionukliden zu schaffen.	Einlagerungsbohrlöcher sollen keine hydrogeologischen aktiven Zonen durchkreuzen. (RSC-II)
L4-ROC-42	L4-ROC-8	L4-ROC-9	L4-ROC-13	L4-ROC-14
Level 5				
	Der maximal zulässige Zufluss (punktweise oder kluftbezogen) zu einer Einlagerungsstrecke während des Verfüllens ist 0,25 l/min.	Der maximal zulässige Zufluss zu einem Einlagerungsbohrloch beträgt 0,1 l/min. (RSC-II)	In einem Einlagerungsbohrloch ist keine Kluft erlaubt, in der Injektionsmaterial beobachtet wurde oder in der es Hinweise auf Injektionsmaterial gibt. (RSC-II)	Eine Kluft, die gemäß L5-ROC-64 einen Behälter nicht kreuzen darf, darf die 0,5-m Sicherheitszone weder ober- noch unterhalb des Behälters kreuzen.
	L5-ROC-54	L5-ROC-62	L5-ROC-65	L5-ROC-82

Abb. 4.35: Zusammenstellung der hydraulischen Eignungskriterien im RSC-Klassifikationssystem (übersetzt aus: McEwen et al. 2012).

Um die Aufsättigung der Bentonitbarriere und damit die anforderungsgemäße Funktion des Versatzsystems einer Einlagerungsstrecke oder des Bentonitbuffers eines Einlagerungsbohrloches zu gewährleisten, wird von einem Grundwasserzufluss von < 0,25 L/min bzw. < 0,1 L/min ausgegangen (Abb. 4.35).

Die im RSC-System anzuwendenden geomechanischen Gesteinsbewertungsparameter dienen zur Verhinderung von Container- bzw. Kanister-Ausfällen durch Scherprozesse, die an Erdbeben gebunden sind (siehe Abb. 4.36). Bei der Festlegung der maximal möglichen Scherverschiebungen entlang von Klüften, die den Container schneiden (maximal 5 cm), ist man von einer linearen Abhängigkeit der maximal möglichen Scherbewegung und der Stö-

rungs- bzw. Kluftlänge ausgegangen (Kim & Sanderson 2005). Zur Bewertung der Größe und damit des möglichen Einflusses der Klüfte auf die mechanische Integrität des Containers im Falle eines Erdbebens wird das "Full Perimeter Intersection (FPI)-Kriterium" (Munier 2006, Hellä et al. 2009) genutzt.

Level 3 – Zieleigenschaften – Mechanische Stabilität			
<p>Die Lage der Einlagerungsbohrlöcher soll so gewählt werden, dass die Wahrscheinlichkeit minimiert wird, dass Scherverschiebungen des Wirtsgesteins auftreten, die so hoch sind, dass sie zum Bruch des Behälters führen.</p> <p>Deswegen soll die Wahrscheinlichkeit einer Scherverschiebung von mehr als 5 cm gering sein.</p>			
			L3-ROC-23
Level 4			
Alle untertägigen Räume		Einlagerungsbohrlöcher	
Bei der Positionierung der untertägigen Räume soll die Durchkreuzung weitreichender Störungszonen weitestgehend vermieden werden. (RSC-II)		Einlagerungsbohrlöcher dürfen weitreichende Störungszonen nicht schneiden. (RSC-II)	Einlagerungsbohrlöcher dürfen spröde Deformationszonen nicht schneiden. (RSC-II)
L4-ROC-42	L4-ROC-19	L4-ROC-16	L4-ROC-15
Level 5			
	(1) Klüfte mit einem Ausmaß größer als dem Grenzausmaß dürfen den Behälter nicht schneiden (2) Wenn das Kluftausmaß nicht bekannt ist, wird das "Full Perimeter Intersection (FPI)-Kriterium" angewandt; eine Kluft, die sich über den vollen Umfang der Einlagerungsstrecke nachweisen lässt, darf den Behälter nicht schneiden. (3) Wenn eine Kluft ein gesamtes Einlagerungsbohrloch an der potenziellen Einlagerungsposition des Behälters schneidet und so ausgerichtet ist, dass es nicht möglich ist, ihre Fortsetzung in einer Strecke oder anderem Einlagerungsbohrloch zu beobachten, ist dieses Einlagerungsbohrloch abzuwerfen.		L5-ROC-64

Abb. 4.36: Eignungskriterien im RSC-Klassifikationssystem in Bezug auf die geomechanische Stabilität der betrachteten Wirtsgesteinsbereiche (übersetzt aus: McEwen et al. 2012).

Durch Anwendung dieser Gesteinseignungskriterien werden unter Zugrundelegung detaillierter geologischer Kartierungen (in den Strecken und an den Kernen der Erkundungs- und Einlagerungsbohrungen) sowie umfangreicher hydraulischer In-situ-Messungen und hydrogeochemischer Untersuchungen der Grundwässer im geplanten Einlagerungsniveau die zu bewertenden Gesteinsbereiche in möglicherweise geeignete und möglicherweise ungeeignete Wirtsgesteinsvolumina eingeteilt (Abb. 4.37). In diese Bewertungen des Eignungsgrades sollten sehr detaillierte 3D-Modelle der am Standort nachgewiesenen Störungszonen und Kluftsysteme („DFN-Modelle“) einfließen (siehe Beispiele dafür in McEwen et al. 2012).

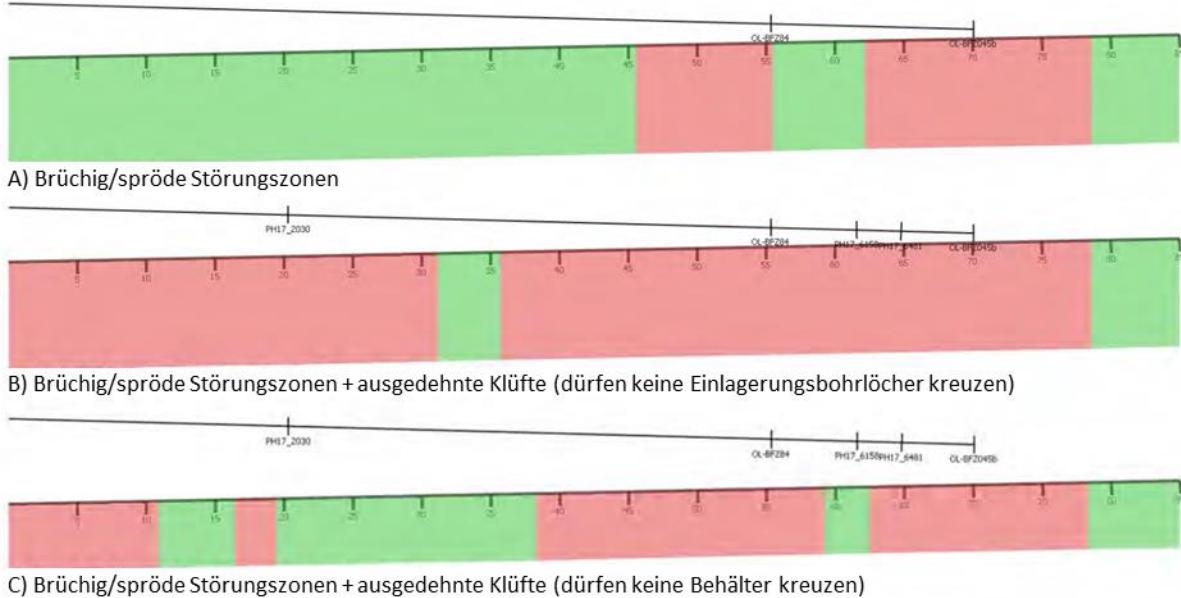


Abb. 4.37: Beispiel für die Bewertung des Eignungsgrades von Wirtsgesteinen auf der Basis von: A) spröden Störungszonen, B) spröden Störungszonen und möglicherweise die Einlagerungsbohrlöcher schneidenden großen Klüften, sowie C) spröden Störungszonen und möglicherweise die Behälter schneidenden großen Klüften; grün – eher geeignet, rot – eher ungeeignet.

Ausgehend von den Erfahrungen des Einsatzes dieses Gesteinsbewertungssystems beim Bau des Untertagelabors und bei der Festlegung der Standorte für die In-situ-Experimente im ONKALO-URL ist das RSC-System sehr gut für die zielgenaue (minimale Radionuklid-Freisetzung und nur vernachlässigbar geringe Schadstofffreisetzung in die Biosphäre) Lokalisierung der Gesteinsbereiche für die Auffahrung der Einlagerungsstrecken und die Platzierung der Einlagerungsbohrlöcher und geotechnischen Barrieren geeignet. Es ermöglicht den Ausschluss von nicht oder nur sehr wenig geeigneten Wirtsgesteinsbereichen, wie Deformationszonen und hydraulisch aktiven Gesteinsvolumina aus den Planungen der Einlagerungsbereiche im Endlagerbergwerk.

In McEwen et al. (2012) wird am Beispiel von 2 Einlagerungsstrecken und 4 Bohrungen für In-situ-Experimente die praktische Einsetzbarkeit des RSC-Systems erfolgreich demonstriert. Allerdings ist nach Ansicht der finnischen Autoren noch eine Weiterentwicklung einiger Bewertungskriterien und eine Optimierung der Vorgehensweise bei der Anwendung des Bewertungssystems erforderlich.

5 Diskussion und Bewertung

5.1 Sicherheits- und Nachweiskonzept

Die aktuellen Sicherheitsanforderungen und der Abschlussbericht des AkEnd gehen von einem Sicherheitskonzept bei derendlagerung aus, welches darauf basiert, dass die radioaktiven Abfälle in einer tiefen geologischen Formation mit hohem Einschlussermögen endgelagert werden (Typ A, Tabelle 2.1). Insbesondere die in den Sicherheitsanforderungen formulierten Anforderungen an den ewG sind auf Gesteine zugeschnitten, die von sich aus ein hohes Einschlussermögen haben, z.B. Ton- oder Salzgesteine.

Bei kristallinen Gesteinen kann man nicht a priori davon ausgehen, dass sie ein hohes Einschlussermögen aufweisen, da sie, je nach Art und Entstehung, von Klüften durchzogen sind, die ggf. hydraulisch wirksam sein können. Will man kristalline Gesteine unter Anwendung des ewG-Konzeptes als potenzielle Wirtsgesteine mit in die Betrachtungen einbeziehen, wäre eine Erweiterung des ewG-Konzeptes in den Sicherheitsanforderungen eine mögliche Option. Diese Erweiterung könnte zum einen darin bestehen, dass ein kristallines Wirtsgestein von einem anderen Gestein umschlossen oder zumindest überdeckt wird, das ein hohes Einschlussermögen aufweist wie z.B. Tonstein oder Steinsalz. In diesem Fall würde der ewG sich auf diese Gesteine ausdehnen und nicht nur den kristallinen Bereich beinhalten. Das Endlager liegt in diesem Fall nicht im ewG. Diese Konfiguration war bereits im ursprünglichen ewG-Konzept des AkEnd enthalten (AkEnd 2002: Abb. 4.7).

Zum anderen könnte eine Erweiterung des ewG-Konzeptes auch darin bestehen, nicht nur einen einzigen ewG auszuweisen, sondern mehrere ewG-Komponenten („multipler ewG“, Abb. 2.3). Anzahl und Größe dieser ewG-Komponenten würden dann durch die Häufigkeit und Lage von hydraulisch wirksamen Klüften bzw. Kluftzonen im Wirtsgestein bestimmt. Die einzelnen ewG-Komponenten wären dann so anzurichten, dass keine der hydraulisch wirksamen Störungszonen einzelne ewG-Komponenten durchlaufen. Jede einzelne ewG-Komponente hätte dann ein hohes Einschlussermögen, da nicht geklüftetes Kristallingestein prinzipiell vergleichbare hydraulische Durchlässigkeiten wie Steinsalz oder Tonstein besitzt.

Zur Prüfung der Übertragbarkeit des schwedisch/finnischen Behälterkonzeptes wurde zunächst analog zu deren KBS-3-Konzept von einem zweischaligen Behälter ausgegangen, der aus einem inneren Stahlbehälter, der die mechanische Stabilität gewährleistet, und einem äußeren Kupferbehälter (Kupfermantel) besteht, der den Korrosionswiderstand sicherstellt. Der Nachweiszeitraum im KBS-3-Konzept beträgt 100.000 Jahre. Für diese Behälterstandzeit ist der Behälter konzipiert. Unterstützt durch den Buffer stellt er die maßgebliche Barriere dar. Für deutsche Verhältnisse ist ein Nachweiszeitraum von 1 Million Jahren zu berücksichtigen. Soll analog zum KBS-3-Konzept auch für diesen Zeitraum der Behälter die Hauptbarriere sein, würde man praktisch das **ewB**-Konzept gemäß dem Vorschlag der ESK zugrunde legen, wo die Einschlusserksamkeit durch die geotechnischen Barrieren allein erzeugt wird. Wie in Kapitel 3.1 erläutert, wäre eine Geringfügigkeit der Freisetzung nur dann nachweisbar, wenn man entweder den Kupfermantel des Behälters verstärkt, oder aber einen deutlich mächtigeren Buffer als im KBS-3-Konzept vorsieht, der dann auch eine signifikante Rückhaltefunktion zugeordnet bekommt.

Soll in Abänderung des KBS-3-Konzeptes ein Konzept bestehend aus Behälter, Buffer und einem **ewG** verwendet werden, so erscheint die Nachweisbarkeit einer nur geringfügigen Freisetzung besser erreichbar. Darüber hinaus könnte unter Umständen auf die Kupferhülle am Behälter verzichtet werden. Die indikativen Berechnungen in Kapitel 2.5 deuten an, dass auch bei einer angenommenen Behälterstandzeit von nur 1.000 Jahren der „multiple ewG“ mit einer nur geringen Mächtigkeit unter bestimmten Bedingungen, und bei einem dazu passenden Verschlussystem für die Zugänge zu den ewG-Komponenten, eine geeignete Barriere darstellen könnte. Diese Option bedarf aber noch einer intensiven Analyse.

Ein weiterer großer Unterschied zu den Konzepten in Finnland und Schweden besteht für Deutschland darin, dass auch MOX-Brennelemente bei der Einlagerung zu berücksichtigen sind, die eine sehr starke Wärmeentwicklung aufweisen. Unterstellt man analog zum schwedisch/finnischen Konzept eine Grenztemperatur von 100°C an der Behälteroberfläche, ist eine Einlagerung ganzer MOX-Brennelemente aufgrund ihrer hohen Wärmeleistung definitiv nicht möglich. Zum einen könnte für eine Anwendung in Deutschland das schwedisch/finnische Behälterkonzept modifiziert werden. Es müsste ein Behälter verwendet werden, in dem die Brennstäbe mit den MOX-Abfällen in so einem Verhältnis gemischt werden, dass das Temperaturkriterium an der Behälteroberfläche eingehalten werden kann. Zum anderen könnte im Rahmen der Entwicklung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für deutsche Verhältnisse geprüft werden, ob eine andere Grenztemperatur, die ggf. auch nicht zwingend an der Behälteroberfläche definiert wird, sinnvoll festgelegt werden kann.

5.2 Bewertung der Ergebnisse der indikativen Modellrechnungen

Die im Rahmen dieser Untersuchung durchgeföhrten Modellrechnungen wurden konzipiert, um für zukünftig zu erstellende radiologische Nachweise eine erste Einschätzung bezüglich der Vereinbarkeit eines Endlagers im Kristallin mit dem **ewG**-Konzept zu erlauben. Als Datengrundlagen wurden dabei Modellrechnungen der GRS für ein Endlager im Granit im Rahmen der Studie SPA herangezogen, wobei die Radionuklidinventare an die aktuelle Situation angepasst wurden. Es wurden zwei theoretische Situationen bezüglich der Festlegung des **ewG** betrachtet, die dem **ewG-Typ Bb** und dem „multiplen **ewG**“ (Typ M) entsprechen. Die hier vorgestellten Modellrechnungen geben sehr spezifische und teilweise willkürlich festgelegte Situationen wieder. Die dabei zugrunde gelegten Annahmen, z.B. der Grundwasserstrom im oberflächennahen Grundwasserleiter können an einem konkreten Standort erheblich abweichen. Sie sind daher als exemplarisch anzusehen und dienen dem Systemverständnis.

Für die hier durchgeföhrten Rechenfälle wurde eine Berechnung der Strahlenexposition nach einem vorgegebenen Transportweg durch das Kristallingestein durchgeführt. Dabei werden auch Prozesse außerhalb des **ewG**, z.B. Sorption und Verdünnung, berücksichtigt. Es handelt sich nicht um einen vereinfachten Nachweis im Sinne der Sicherheitsanforderungen. Wie die Durchführung eines vereinfachten Nachweises am Rande des **ewG** vom Typ Bb oder Typ M erfolgen kann, ist in zukünftigen FuE-Projekten zu erarbeiten, sofern nicht, wie im Abschlussbericht der Endlagerkommission (Deutscher Bundestag (2016)) vorgeschlagen,

die Möglichkeit der vereinfachten Nachweisführung aus den Sicherheitsanforderungen gestrichen wird.

Bezüglich des Falles mit einer abdeckenden barriewirksamen Gesteinsschicht zeigen die Ergebnisse, dass eine horizontale Ausdehnung der abdeckenden Schicht, die in diesem Berechnungsbeispiel 2 km über den Rand des Endlagers hinausreicht, bereits eine hinreichend isolierende Funktion erfüllt. Eine weitere Vergrößerung der Schicht innerhalb realistischer Grenzen bewirkt lediglich eine Verzögerung, nicht aber eine Verringerung der maximalen Dosisrate.

Die Berechnungen zum Fall mit lokalem Einschluss (multipler ewG) haben ergeben, dass ein solcher bereits bei einer Mächtigkeit des kluftfreien Gesteinskörpers von 1 m oder sogar weniger effektiv funktionieren kann. Dabei wird allerdings vorausgesetzt, dass der gesamte Teilbereich vollständig von einem solchen Gesteinskörper umgeben ist (ohne Berücksichtigung einer entsprechend abzudichtenden Zugangsstrecke).

Aus den Ergebnissen ist zu schließen, dass beide Konzepte prinzipiell mit den Sicherheitsanforderungen vereinbar sein können, sofern der ewG-Begriff, wie oben beschrieben, entsprechend angepasst wird. Eine solche Vereinbarkeit kann auf Basis der durchgeführten Rechnungen auf Grund der genannten Einschränkungen jedoch nicht generell gefolgert werden. Um eine solche Aussage treffen und bezüglich ihrer Voraussetzungen eingrenzen zu können, sind umfangreiche Datenerhebungen an realen Kristallinformationen sowie erheblich erweiterte Modellrechnungen erforderlich. Hierzu müssen insbesondere die relevanten Ungewissheiten identifiziert und quantifiziert sowie in einer probabilistischen Modellierung berücksichtigt werden.

5.3 Anwendbarkeit vorhandener Berechnungswerkzeuge

Die Modellrechnungen wurden mit Modulen des Programmpakets RepoTREND durchgeführt. Diese sind für die Berechnung der Freisetzung aus einem Endlager im Kristallin und deren radiologischer Konsequenzen geeignet. Im Rahmen der Studie wurden jedoch einzelne Punkte identifiziert, bezüglich derer die Programme angepasst oder erweitert werden müssen:

- Das Nahfeldmodul CLAYPOS ist derzeit nicht voll in die RepoTREND-Struktur integriert. Es erlaubt auch keine Aufteilung des Endlagers in unterschiedliche Teilbereiche; diese lässt sich derzeit nur durch voneinander unabhängige CLAYPOS-Rechnungen darstellen. Für eine effektive Berechnung eines Endlagers mit räumlich aufgeteiltem ewG sollte das Programm umgearbeitet oder besser durch eine Neuentwicklung ersetzt werden.
- Für zukünftige detailliertere Analysen der Migration von Radionukliden ist die Berücksichtigung des Transports im Grubengebäude relevant, z.B. um Aussagen zu möglichen Austrittsstellen aus dem ewG in das umliegende Gestein machen zu können.
- Ein Transportweg mit mehreren Einstromstellen ist mit den Fernfeldmodulen FRAME und COFRAME nicht darstellbar. Deshalb konnte ein multipler ewG nicht direkt untersucht werden. Für künftige Modellierungen dieses Typs müssen die Module entsprechend erweitert werden.

- Anpassungsbedarf besteht ggf. nach Entwicklung einer Methodik zum vereinfachten Nachweis am Rande des ewG vom Typ Bb oder Typ M.

5.4 Anwendung der Integritätskriterien

Für die beiden identifizierten ewG-Typen – Typ „multipler ewG“ und „überlagernder ewG“ – lassen sich die in den aktuellen Sicherheitsanforderungen spezifizierten Integritätskriterien prinzipiell anwenden.

Bei dem „überlagernden ewG“ handelt es sich um einen Teil einer sedimentären Überdeckung aus Salz- oder Tonstein (Abb. 2.4), d.h., der ewG besteht aus Sedimenten und nicht aus kristallinem Gestein. Das bedeutet, dass alle oben genannten Kriterien, wie in den Sicherheitsanforderungen für Steinsalz und Tonstein gefordert, prinzipiell angewendet werden können. Der Integritätsnachweis wird hier also für Tonstein und Steinsalz und nicht für geklüftetes kristallines Gestein geführt. In diesem Fall könnten z.B. die in den Projekten ANSICHT (Ton) und VSG (Salz) entwickelten Verfahren zum Einsatz kommen.

Bei dem ewG-Typ „multipler ewG“, bestehen die einzelnen ewG-Komponenten prinzipiell alle aus dem ewG-Typ A (Abb. 2.1). Ein einzelner ewG umschließt also vollständig einen einzelnen Endlagerbereich. In diesem Fall ist aber davon auszugehen, dass der als ewG ausgewiesene Gesteinsbereich aus kristallinem Gestein besteht. Auch für diesen ewG-Typ lassen sich die Integritätskriterien prinzipiell anwenden. Allerdings müsste für die Auswertung des Dilatanz-Kriteriums ein Stoffgesetz eingesetzt und qualifiziert werden, das es ermöglicht, den Grad einer Klüftung bei der Bewertung der Gebirgsfestigkeit mit zu berücksichtigen. Ein solches Stoffgesetz ist prinzipiell vorhanden. Das Fließdruck-Kriterium könnte, analog zum ANSICHT-Projekt, über den Ausschluss effektiver Zugspannungen angewendet werden. In diesem Fall bräuchte kein Kredit von Kluftzugfestigkeiten genommen werden, die ggf. Null sein können. Bei dem Temperatur-Kriterium verbleibt zu prüfen, ob es thermisch induzierte Prozesse gibt, die einzelne ewG-Komponenten in ihrem Einschlussermögen signifikant schädigen könnten. Einer Anwendung steht aber grundsätzlich nichts entgegen.

5.5 Verschlusskonzepte

Bei Umsetzung des Konzeptes „multipler ewG“ ist die Anordnung der Einlagerungs- bzw. Beschickungsstrecken abhängig vom Gesteinskörper mit sicherheitsrelevanten Gesteinseigenschaften. Wurden mit diesen Strecken hoch transmissive Zonen durchörtert, so sollte das schwedisch/finnische Konzept umgesetzt werden, das für diesen Fall vorsieht, den Streckenbereich der hoch transmissiven Durchörterung mit hochporösen Material zu versetzen. Dadurch werden das hydraulische System und insbesondere die herrschenden Druckgradienten möglichst wenig verändert. Damit werden auch keine Öffnungsprozesse von Klüften in Folge hydraulischer Druckgradienten wirksam und bisher trockene Bereiche bleiben erhalten. Dieses Konzept ist ohne weiteres übertragbar.

Für die Abdichtung der Beschickungsstrecken reichen die bisherigen Konzepte für die Anwendung im Rahmen eines multiplen ewG nicht aus. Hier sollten zusätzliche Elemente eingesetzt werden, die eine instantane Abdichtung ermöglichen. Insofern werden zwei Konzeptvorschläge gemacht, wie dies erreicht werden kann.

5.6 Bisherige Untersuchungen zu kristallinen Wirtsgesteinen in Deutschland

Es wurde eine Synthese von Erkenntnissen aus den im Rahmen der Kristallinstudie der BGR erbrachten wissenschaftlichen Arbeiten unter Berücksichtigung der dabei verwendeten Datengrundlagen erstellt. Neben der Darstellung der wichtigsten Ergebnisse der Vorstudien zu verschiedenen Kristallinvorkommen in den alten und neuen Bundesländern wird primär das seinerzeit angewandte Auswahl- und Bewertungsverfahren erläutert, das zur Selektion der zur weiteren Untersuchung als geeignet eingestuften Standortregionen geführt hat. Das umfangreiche Kartenmaterial, das ebenfalls mit Fertigstellung des Endberichtes vorlag, wurde danach digital aufbereitet und in ein Fachinformationssystem überführt.

Es wird erläutert, welche Erkenntniszuwächse erwartet werden können, die seit dem Erscheinen der Kristallinstudie im Jahr 1994 zu verzeichnen sind. Im Wesentlichen wird dabei Bezug auf die Arbeit der Geologischen Dienste der Bundesländer genommen, die mit der hoheitlichen Aufgabe betraut sind, möglichst umfassend die verfügbaren Geodaten in ihrem jeweiligen fachlichen und räumlichen Zuständigkeitsbereich zu archivieren und aufzubereiten. Viele dieser Daten wie Ergebnisse von Bohrungen und geophysikalischen Untersuchungen werden von den Staatlichen Geologischen Diensten (SGD) und anderen Einrichtungen in Fachinformationssystemen und Datenbanken eingepflegt und vorgehalten, die dann z.B. bei der Erstellung von Geoinformationssystemen und geologischen Kartenwerken zum Einsatz kommen. Viele Informationen liegen für weiterführende Arbeiten in elektronischer Form vor und können für die Erstellung von geologischen 3D-Standortmodellen herangezogen werden.

5.7 Standorterkundung und Eigenschaften kristalliner Gesteine

Mit Blick auf die in Kapitel 2.3.2 als mögliche ewG-Typen identifizierten „multipler ewG“ und „überlagernder ewG“ setzt insbesondere der „multiple ewG“ eine Erkundung des Standortes voraus, die es ermöglicht, hydraulisch aktive Störungszonen zu identifizieren, um auszuschließen, dass einzelne ewG-Komponenten von solchen Zonen durchzogen werden.

Anhand der Standortauswahlverfahren in Schweden, Finnland, Russland, Frankreich und der Schweiz werden die bei der Suche und Erkundung von Standorten für ein Endlager für Wärme entwickelnde Abfälle in kristallinen Wirtsgesteinen eingesetzten geologisch-geophysikalischen Untersuchungsmethoden beschrieben. Die für kristalline Wirtsgesteine auf der Grundlage ihrer Barriereeigenschaften abgeleiteten Erkundungsziele unterscheiden sich deutlich vom Vorgehen in Salz- oder Tongesteinen und haben z.T. andere Erkundungsmethoden zur Folge.

Die Darstellung der Methoden der Standorterkundung erfolgt getrennt für die über- und untätigten Erkundungsarbeiten. Im Rahmen übertätigiger Standorterkundungen werden schwerpunktmaßig aerogeophysikalische Untersuchungen und geophysikalische Messungen an der Erdoberfläche, Tiefbohrungen sowie hydrogeologische Untersuchungen in den Erkundungsbohrungen durchgeführt. Die Darstellung der Methoden der geologisch-geotechnischen untätigten Erkundung umfasst Beispiele der in Untertagelabors durchgeföhrten Untersuchungen der Wirtsgesteinseigenschaften, In-situ-Tests von Einlagerungs-

konzepten bzw. Einlagerungstechnik sowie Analysen der Wechselwirkungen zwischen den eingelagerten Abfällen und dem Multibarrierensystem.

Auf der Grundlage der zusammengestellten Informationen und Erfahrungen erscheint die Erarbeitung und Anwendung eines Erkundungskonzeptes für ein Endlager für Wärme entwickelnde Abfälle in kristallinen Gesteinen in Deutschland auch unter Berücksichtigung des Konzeptes „multipler ewG“ möglich. Eine Berücksichtigung der „Rock Suitability Classification“ (RSC), also der Eignungsklassifizierung kristalliner Gesteine, wie sie in Finnland entwickelt worden ist, kann als sehr hilfreich angesehen werden, insbesondere wenn es darum geht, Positionen für Abdichtmodule zu identifizieren, die Teil des Verschlusskonzeptes sind. Die Zusammenstellung der in den internationalen Untertagelaboratorien erzielten Ergebnisse hinsichtlich der Eigenschaften kristalliner Gesteine erlaubt die Entwicklung vorläufiger technischer Endlagerkonzepte, die dann als Grundlagenmodule im Rahmen der Entwicklung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes herangezogen werden können.

6 Schlussfolgerungen und Ausblick

Im Rahmen des Projektes CHRISTA wurden verschiedene Optionen mit unterschiedlichen Sicherheitskonzepten für eine Endlagerung hochradioaktiver Wärme entwickelnder Abfälle in deutschen Kristallingesteinen untersucht. Zum einen wurde geprüft, ob das **ewG**-Konzept, das den aktuellen deutschen Sicherheitsanforderungen zugrunde liegt und vorrangig auf Salz- und Tonformationen abstellt, auch für Kristallin als Wirtsgestein genutzt werden kann. Dies betrifft auch den Nachweis zur Integrität der geologischen Barriere mit den in den Sicherheitsanforderungen genannten Kriterien. Zum anderen wurde die Übertragbarkeit des skandinavischen auf Kristallin ausgerichteten KBS-3-Konzeptes auf deutsche Verhältnisse geprüft. In diesem Zusammenhang wurde auch der Vorschlag der Entsorgungskommission (ESK) mit einbezogen, der ein **ewB**-Konzept beinhaltet, bei dem die Einschlusswirksamkeit durch die geotechnischen und technischen Barrieren allein erzeugt werden soll. Je nach Sicherheitskonzept ergeben sich unterschiedliche Anforderungen an die verschiedenen Barrieren, wobei zu berücksichtigen ist, ob ein sogenannter vereinfachter Nachweis der Geringfügigkeit der Radionuklid-Freisetzung aus dem **ewG/ewB** oder ein Nachweis bis hin zu den Expositionspfaden in der Biosphäre vorgesehen ist. Die Bewertung der Optionen erfolgte verbal-argumentativ und mit Hilfe indikativer Berechnungen.

Als Ergebnis kann festgestellt werden, dass prinzipiell zwei **ewG**-Typen geeignet erscheinen, einen erfolgreichen vereinfachten Nachweis zu diesem Konzept zu führen. Es handelt sich dabei um die Typen „multipler **ewG**“ und „überlagernder **ewG**“.

Bei dem Typ „multipler **ewG**“ werden mehrere kleinere **ewG**-Komponenten ausgewiesen, bei denen davon ausgegangen wird, dass die einzelnen Komponenten in hinreichend gering geklüfteten Gesteinsblöcken im Wirtsgestein positioniert werden. Die Einschlussfunktion basiert auf der geringen hydraulischen Durchlässigkeit dieser Wirtsgesteinsblöcke in Kombination mit den geotechnischen Barrieren, die die Zugänge verschließen. Bei dem Typ „überlagernder **ewG**“ wird die Einschluss- und Rückhaltefunktion durch überlagernde Sedimentgesteine mit geringer hydraulischer Leitfähigkeit (z.B. Tone, Salze) sowie die Schachtverschlüsse gewährleistet. Die Besonderheit dieses **ewG**-Typs ist, dass der **ewG** hier Teil des Deckgebirges ist und somit hohe hydraulische Anforderungen an diesen Teil des Deckgebirges bestehen, während an das kristalline Wirtsgestein vor allem betriebliche Anforderungen für das Endlager (mechanische Stabilität, begrenzter Lösungszutritt, etc.) zu stellen sind. Für beide **ewG**-Typen lassen sich die in den Sicherheitsanforderungen spezifizierten Integritätskriterien prinzipiell anwenden.

Bezüglich der Übertragbarkeit des schwedisch/finnischen KBS-3-Konzeptes ist festzuhalten, dass in Übereinstimmung mit den für Schweden und Finnland geltenden nationalen Regelwerken der Sicherheitsnachweis dort nur für einen Nachweiszeitraum von 100.000 Jahren (in Deutschland 1 Million Jahre) zu führen ist. Dabei wird der Einschluss der Radionuklide durch ein Barrierensystem aus einem kupferummantelten Endlagerbehälter und einem außen anliegenden Buffer gewährleistet. An das Wirtsgestein bestehen in erster Linie mechanische und geochemische Anforderungen zum Schutz dieser beiden Barrieren sowie, für den Fall deren Versagens, chemische und hydraulische Anforderungen im Sinne einer weiteren Reduzierung der Radionuklid-Freisetzung durch Sorption und Verdünnung in

Grundwasserleitern. Darüber hinaus ist in Schweden und Finnland nicht die Endlagerung von MOX-Brennelementen vorgesehen, deren extreme Wärmeentwicklung im KBS-3-Konzept nicht abgefangen würde. Eine Anpassung des Behälterkonzeptes an deutsche Verhältnisse wäre aber denkbar (vgl. Kap. 3.1).

Bei Sicherheitskonzepten, die vorrangig auf technisch zu fertigende Barrieren basieren (KBS-3-Konzept und ewB-Vorschlag der ESK), ergibt sich auch noch generell das Problem der nicht gänzlich auszuschließenden Fehlerquoten bei der Fertigung, Errichtung und Prüfung von Komponenten. Daher muss bei der für deutsche Verhältnisse anzunehmenden großen Anzahl der technischen Komponenten (Behälter, Buffer) vorsorglich immer die Möglichkeit eines frühzeitigen Versagens einzelner Komponenten berücksichtigt werden. Ein vereinfachter radiologischer Nachweis über die Geringfügigkeit der Freisetzung aus einem ewB würde daher für dieses Konzept aufwändige technische Maßnahmen (z.B. einen Behälter mit einer doppelten Kupferschale) erfordern. Falls ein Nachweis bis hin zu den Expositionspfaden in der Biosphäre einschließlich möglicher Verdünnungseffekte in hinreichend mächtigen überlagernden Grundwasserleitern akzeptiert wird, erscheint der Nachweis der Einhaltung der radiologischen Schutzziele über das ewB-Konzept ohne einen Behälter mit einer doppelten Kupferschale möglich.

Generell wird eingeschätzt, dass dem Sicherheitsnachweis auf Basis des in den aktuellen Sicherheitsanforderungen verankerten ewG-Konzeptes, also unter Einbeziehung einer geologischen Barriere, der Vorzug gegenüber einem Nachweis für rein technisch gefertigte Barrieren zu geben ist.

Im nächsten Schritt wären Sicherheits- und Nachweiskonzepte sowohl für die oben als potenziell geeignet ausgewiesenen ewG-Typen als auch für ein ewB-Konzept zu entwickeln. Im Rahmen dieser Sicherheits- und Nachweiskonzepte werden u. a. auch die Anforderungen an die einzelnen Komponenten des jeweiligen Barrierensystems spezifiziert.

Die Endlagerkommission ist bei der Formulierung der Standortauswahl-Kriterien über die aktuelle Version der Sicherheitsanforderungen hinausgegangen, um sicherzustellen, dass deutsche Kristallinformationen im Standortauswahlverfahren berücksichtigt werden können. Um die Konsistenz im Regelwerk wieder herzustellen, wird eine entsprechende Aktualisierung der Sicherheitsanforderungen vorgeschlagen.

7 Literaturverzeichnis

- AkEnd (2002). Auswahlverfahren für Endlagerstandorte Empfehlungen des AkEnd – Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte.
- ANDRA (2005). Dossier 2005 Granite, Synthesis - Assets of granite formations for deep geological disposal. Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA), 159 pp., Châtenay-Malabry.
- Baudoin, P., Gay, D., Certes, D., Serres, C., Alonso, J., Luehrmann, L., Martens, K.-H., Dodd, D., Marivoet, J. & Vieno, T. (2000). Spent fuel disposal Performance Assessment – SPA project, Final report, EUR 19132, Luxembourg.
- Autio, J., Hjerpe, T. & Siitai-Kauppi, M. (2005). Porosity, diffusivity and permeability of EDZ in crystalline rock and effect on the migration in a KBS-3 type repository. In EU, 2005. Impact of excavation disturbed or damaged zone (EDZ) on the performance of radioactive waste geological repositories. Proc European Commission Cluster Conf and Workshop. 149–155. Luxembourg Nov 3–5, 2003.
- European Commission EUR 21028 En.Baldschuhn, R., Binot, F., Fleig, S. & Kockel, F. (2001). Geotektonischer Atlas von Nordwest-Deutschland und dem deutschen Nordsee-Sektor, 88 S. Hannover (Schweizerbart).
- Balzer, D. & Maurer, U. (2003). Fachinformationssystem (FIS) Geowissenschaften und Entsorgung von Abfällen (GEA), Ergebnisse des Auswahl und Bewertungsverfahrens, 52 S., Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.
- Bäckblom (2008). Excavation damage and disturbance in crystalline rock – results from experiments and analyses, SKB Technical Report TR-08-08, Stockholm.
- Becker, D.-A., Buhmann, D., Storck, R., Alonso, J., Cormenzana, J.-L., Hugi, M., van Gemert, F., O'Sullivan, P., Laciok, A., Marivoet, J., Sillen, X., Nordman, H., Vieno, T. & Niemeyer, M. (2003). Testing of Safety and Performance Indicators (SPIN), EUR 19965 EN, European Commission, Brussels.
- Belov, S. V., Morozov, V. N., Tatarinov, V. N., Kamnev, E. N. & Hammer, J. (2007). Investigation of the structure and geodynamical evolution of the Nizhnekansky massif with regard to disposal of the radioactive high-level waste (HLW) (russ.), Geoekologija, Moskau, 2, 1-19.
- Bender, F. (1984). Angewandte Geowissenschaften – Bd. 3. - Geologie der Kohlenwasserstoffe, Hydrogeologie, Ingenieurgeologie, Angewandte Geowissenschaften in Raumplanung und Umweltschutz, 674 S., Stuttgart, Enke.
- Bender, F. (1985). Angewandte Geowissenschaften – Bd. 2. - Methoden der Angewandten Geophysik und mathematische Verfahren in den Geowissenschaften, 766 S., Stuttgart, Enke.
- Berckhemer, H. (1990). Grundlagen der Geophysik, 201 S., Wiss. Buchges., Darmstadt.
- BGR (2014). Der tiefere geologische Untergrund von Deutschland, Kurzübersicht über Verteilung und Dichte geowissenschaftlicher Daten und Informationen, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.
- BMU (2010). Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle, Bonn.
- Bräuer, V. (1984a). Aufstellung und ingenieurgeologische Beschreibung von Granitvorkommen in der Bundesrepublik Deutschland, 3. Teil: Die Kristallinmassive des Odenwaldes, des Spessarts und des Westharzes, BGR, Hannover.
- Bräuer, V. (1984b). Kurzbericht für das Jahr 1983, 8 S., BGR, Hannover.
- Bräuer, V. (1994). Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten in Salz und Hartgestein "GEISHA", Arbeitspaket 3: Randbedingungen Hartgestein in Deutschland, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.
- Bräuer, V., Reh, M., Schulz, P. & Sprado, K.-H. (1991). Standortmöglichkeiten zur Endlagerung stark wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in nichtsalinaren Formationen auf dem Gebiet der fünf neuen Bundesländer, 1. Bericht, BGR, Hannover.

- Bräuer, V., Reh, P., Maraschek, U., Sprado, K.-H., Duschek, B., Schulz, P. & Woersching, C. (1993). Standortmöglichkeiten zur Endlagerung stark wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in nichtsalinaren Formationen auf dem Gebiet der fünf neuen Bundesländer, 2. Bericht, BGR, Hannover.
- Bräuer, V., Reh, M., Schulz, P., Schuster, P. & Sprado, K.-H. (1994). Endlagerung stark wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands, Untersuchung und Bewertung von Regionen in nichtsalinaren Formationen, 147 S., BGR, Hannover.
- Buhmann, D., Becker, D.-A., Laggiard, E., Rübel, A., Spießl, S. & Wolf, J. (2016). Probabilistische Bewertung von Szenarien in Langzeitsicherheitsanalysen – Ergebnisse des Vorhabens ISI-BEL, GRS-416, BMWi-FKZ 02E10719, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Braunschweig 2016.
- Chandler, N.A., Cornut, A., Dixon, D., Fairhurst, C., Hansen, F., Gray, M., Hara, K., Ishijima, Y., Kozak, E., Martino, J., Masumoto, K., McCrank, G., Sugita, Y., Thompson, P., Tillerson, J. & Vignal, B. (2002). The five year report on the tunnel sealing experiment: An international project of AECL, JNC, ANDRA and WIPP, Chalk River: Atomic Energy of Canada Limited (AECL), AECL-12127.
- Chapman, N. A. & McKinley, I. G. (1987). The geological disposal of nuclear waste, 280 pp, John Wiley & Sons Public., Chichester.
- Deutscher Bundestag (2016): Abschlussbericht der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe. Drucksache 18/9100 vom 05.07.2016.
- DBETEC (2016). Flächenbedarf für ein Endlager für wärmeentwickelnde, hoch radioaktive Abfälle (FEHRA), Gutachten für die Endlagerkommission, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine.
- Dixon, D., Hansen, J., Korkiala-Tanttu, L., Karvonen, T.H., Marcos, N & Sievänen, U. (2012). Underground Disposal Facility Closure Design 2012, Working Report 2012-09, POSIVA.
- ESK (2015). Evaluation der Rand-und Rahmenbedingungen, Bewertungsansätze sowie der Kriterien des Arbeitskreises Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd), RSK/ESK-Geschäftsstelle beim BfS, 10.12.2015
- Fälth, B., Hökmark, H. & Munier, R. (2010). Effects of large earthquakes on a KBS-3 repository, evaluation of modelling results and their implications for layout and design, Clay Technology AB & SKB, Technical Report TR-08-11, Stockholm.
- Fecker, E. & Reick, G. (1996). Baugeologie, 2. Aufl., Enke.
- Filbert, W., Bollingerfehr, W., Heda, M., Lerch, C., Niehues, N., Pöhler, M., Schulz, J., Schwarz, T., Toussaint, M. & Wehrmann, J. (2010). Optimization of the Direct Disposal concept by Emplacing SF Canisters in Boreholes, Final Report, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine.
- Fricke, S. & Schön, J. (1999). Praktische Bohrlochgeophysik, 254 S., Stuttgart, Enke in Thieme Verlag.
- Genske, D. (2006). Ingenieurgeologie: Grundlagen und Anwendung, 588 S., Berlin, Springer.
- Grahm, P. & Karlzén, R. (2015). System design of Dome Plug, Experiences from full-scale wire sawing of a slot abutment for the KBS-3V deposition tunnel plug, SKB Report R 14-24.
- Grützner, C., Fischer, P. & Reicherter, K. (2016). Holocene surface ruptures of the Rurrand Fault, Germany, insights from palaeoseismology, remote sensing and shallow geophysics. – Geophysical Journal International, 204(3): 1662-1677. doi:10.1093/gji/ggv558.
- Hammer, J. (2005). Vorschläge für ergänzende geologisch-geophysikalische Untersuchungen zur detaillierten Charakterisierung potenzieller Endlagerstandorte für hochradioaktive Abfälle im Umfeld des Bergbau-Chemischen Kombinates Schelesnogorsk bei Krasnojarsk, Sibirien, Russland, Bericht BGR, Hannover, Tagebuch-Nr. 10990/05.
- Hellä, P., Ikonen, A., Mattila, J., Torvela, T. & Wikström, L. (2009). RSC programme - Interim report, Approach and basis for RSC development, layout determining features and preliminary criteria for tunnel and deposition hole scale, Posiva Working Report 2009-29, Posiva Oy, Eurajoki.

- Herold, P., Gruner, M., Jobmann, M. & Kudla, W. (2016). Konzeptentwicklung für Schachtverschlüsse im Ton- und Salzgestein, FuE-Projekt ELSA Phase II, Teilbericht zum Arbeitspaket 1, DBE TECHNOLOGY GmbH, TU Bergakademie Freiberg, Peine, Freiberg.
- Hoek, E., & Brown, E. (1997). Practical estimates of rock mass strength. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 34(8), 1165-1186.
- Hoek, E., & Marinos, P. (2007). A brief history of the development of the Hoek-Brown failure criterion. Soils and Rocks, 2, 1-13.
- Hoek, E., Carranza-Torres, C., & Corkum, B. (2002). Hoek-Brown failure criterium - 2002 edition. Proc. NARMS-TAC Conference, 1, S. 267-273. Toronto.
- Hoek, E. (2007). Practical Rock Engineering (ed.), free set of notes.
(<https://www.rocscience.com/learning/hoek-s-corner/books>)
- Hölting, B. & Coldewey, W. G. (2005). Hydrogeologie – Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie, 6. Auflage, 348 S., Spektrum Akademischer Verlag.
- IAEA (1999). International Atomic Energy Agency: Hydrogeological Investigation of Sites for the Geological Disposal of Radioactive Waste, Technical Reports Series No. 391, 60 pp., Vienna.
- Jobmann, M. & Clauser, Ch. (1994): Heat advection versus conduction at the KTB: possible reasons for vertical variations in heat-flow density, Geophysical Journal International Vol. 119, pp. 44-68.
- Jobmann, M., Maßmann, J., Meleshyn, A. & Polster, M. (2015). Projekt ANSICHT, Quantifizierung von Kriterien für Integritätsnachweise im Tonstein, Technischer Bericht, TEC-08-2013-AP, BGR, GRS, DBE TECHNOLOGY GmbH, Hannover, Braunschweig, Peine.
- Jobmann, M., Burlaka, V., Herold, P., Maßmann, J., Meleshyn, A. & Rübel, A. (2016a). Projekt ANSICHT, Systemanalyse für die Endlagerstandortmodelle, Technischer Bericht, TEC-23-2015-TB, BGR, GRS, DBE TECHNOLOGY GmbH, Hannover, Braunschweig, Peine (in Vorbereitung).
- Jobmann, M. (Editor), Flügge, J., Hammer, J., Herold, P., Krone, J., Kühnlenz, T., Li, S., Lommerzheim, A., Meleshyn, A. & Wolf, J. (2016b). Site-specific evaluation of safety issues for high-level waste disposal in crystalline rocks, Abschlussbericht, FuE Vorhaben URSEL (02E10750/60), BGR, GRS, DBE TECHNOLOGY GmbH, Hannover, Braunschweig, Peine.
- Jobmann, M. (2016c). Mikrostrukturelle Untersuchungen an Salzgrus-Ton-Gemischen und Bitumen-Steinsalz Proben, FuE-Vorhaben ELSA-Phase-II, Technischer Bericht TEC-22-2015-TB, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine.
- Keusen, H.R., Ganguin, J., Schuler, P. & Buletti, M. (1989). Felslabor Grimsel, Geologie, Nagra Technischer Bericht 87-14, Baden/Schweiz, NAGRA.
- Kim, Y.-S. & Sanderson, D. J. (2005). The relationship between displacement and length of faults: a review, Earth-Science Reviews, Vol. 68, p. 317–334.
- Kleine Bornhorst, A., Banchet, D. S. v. & Bräuer, V. (1984). Aufstellung und ingenieurgeologische Beschreibung von Granitvorkommen in der Bundesrepublik Deutschland, 2. Teil: Die Schwarzwälder Granitmassive, BGR, Hannover.
- Knödel, K., Krummel, H. & Lange, G. (Hrsg.) (2005). Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten, Bd. 3. Geophysik, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Springer, Berlin.
- Kosinowski, M. & Banchet, D. S. v. (1983a). Aufstellung und ingenieurgeologische Beschreibung von Granitvorkommen in der Bundesrepublik Deutschland - 1. Teil: Das bayerische Kristallin am Westrand der Böhmischen Masse, BGR, Hannover.
- Kosinowski, M. & Banchet, D. S. v. (1983b). Kurzbericht für das Jahr 1982. Das bayerische Kristallin am Ostrand der Böhmischen Masse, BGR, Hannover.
- KTB (1990a). Grundlagenforschung und Bohrlochgeophysik (Bericht 9), Hydraulische Untersuchungen in der Bohrung KTB-Oberpfalz VB, KTB-Report 90-5, NLfB Hannover.
- KTB (1990b). Grundlagenforschung und Bohrlochgeophysik (Bericht 10), Langzeitmeß- und Testprogramm in der KTB-Oberpfalz VB, KTB-Report 90-6a, NLfB Hannover.

- KTB (1991). Forschungsergebnisse im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms „KTB“, 1986-1990, KTB-Report 91-1, NLfB Hannover.
- KTB (1995). KTB Hauptbohrung, Results of Geoscientific Investigation in the KTB Field Laboratory, Final Report: 0-9101 m, KTB-Report 95-2, NLfB Hannover.
- Kühn, F. & Hörig, B. (1995). Geofernerkundung – Grundlagen und Anwendung, Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten, Band 1, Springer, Berlin.
- Langguth, H.-R. & Voigt, R. (2004). Hydrogeologische Methoden, 2., überarb. u. erw. Aufl., Springer, Berlin.
- Laverov, N. P., Petrov, V. A., Velitschkin, V. I. & Poluektov, V. V. (2002). Petrophysical properties of granitoids of the Nizhnekansky massive: Toward the issue of the selection of the regions for the disposal of LAW and spent fuel (russ.), Geoekologija, Moskau, 4, 293-310.
- Leydecker, G. (2011). Geologisches Jahrbuch, Reihe E, Geophysik: Erdbebenkatalog für Deutschland mit Randgebieten für die Jahre 800 bis 2008 Hannover, ISBN 978-3-510-95989-1.
- LIAG (2006). Geothermisches Informationssystem für Deutschland, Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik, Verfügbar unter: <https://www.geotis.de> (Zugriff: 11.02.2016).
- Liedtke, L., Götschenberg, A., Jobmann, M. & Siemering W. (1994). Felslabor Grimsel – Bohrlochkranzversuch - Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Stofftransport in geklüftetem Fels, NTB 94-02, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.
- Liedtke, L., Shao, H., Alheid, H.J. & Sönnke, J. (1999). Stofftransport in geklüftetem Fels – Gebirgscharakterisierung im Stollennahbereich, Archiv-Nr. 119006, Tgb-Nr. 11257/97, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.
- Lührmann, L., Noseck, U., & Storck, R. (2000). Spent Fuel Performance Assessment (SPA) for a hypothetical repository in crystalline formations in Germany. GRS-154, BMWi-FKZ 02E8855, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Braunschweig,
- Lüschen, E., Görne, S., von Hartmann, H., Thomas, R. & Schulz, R. (2015). 3D seismic survey for geothermal exploration in crystalline rocks in Saxony, Germany, Geophysical Prospecting, 63(4): 975-989, ISSN 1365-2478, doi:10.1111/1365-2478.12249.
- Makurat, A., Løset, F., Wold Hagen, A., Tunbridge, L., Kveldsvik, V. & Grimstad, E. (2006). Äspö HRL, A descriptive rock mechanics model for the 380–500 m level, SKB Report R-02-11, Norwegian Geotechnical Institute, Oslo.
- Martino, J.B., Dixon, D.A., Stroes-Gascoyne, S., Guo, R., Kozak, E.T., Gascoyne, M., Fujiita, T., Vignal, B., Sugita, Y., Masumoto, K., Saskura, T., Bourbon, X., Gingras-Genois, A. & Collins, D. (2008). The Tunnel Sealing Experiment 10 year summary report. Mississauga, Ontario, Canada: Atomic Energy of Canada Limited (AECL). URL-121550-REPT-001.
- Maurer-Rurack, U., Balzer, D., Maraschek, U., Prüfer, S., Schulz, P., Seltenheim, J. & Wörsching, C. (2008). Fachinformationssystem "Geowissenschaften und Entsorgung von Abfällen" (FIS GEA), BGR, Hannover.
- McEwen, T. & Äikäs, T. (2000). The site selection process for a spent fuel repository in Finland – summary report. Posiva-Report, 2000-15, Posiva Oy, Helsinki.
- McEwen, T., Aro, S., Kosunen, P., Mattila, J., Pere, T., Käpyaho, A. & Hellä, P. (2012). Rock suitability classification - RSC 2012, Report POSIVA 2012-24, Posiva Oy, Eurajoki, ISBN 978-951-652-205-3.
- Militzer, H., Schön, J. & Stötzner, U. (1986). Angewandte Geophysik im Ingenieur- und Bergbau, 2., überarb. u. erw. Aufl., Stuttgart, Enke.
- Morozov, V.N., Kolesnikov, I.J., Belov, S.V. & Tatarinov, V.N. (2007). Spannungs- und Deformationszustand des Nischnekansker Massives als Gebiet einer möglichen Endlagerung radioaktiver Abfälle (russ.), Geoekologija, Moskau.
- Munier, R. (2006). Using observations in deposition tunnels to avoid intersections with critical fractures in deposition holes, SKB Report R-06-54, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co (SKB), Stockholm, Sweden.

- NAGRA (1999). Conclusions of the Tunnel Near-Field Programme (CTN), Grimsel test site investigation phase V (1997-2002), Wettingen, Schweiz.
- NAGRA (2002). Projekt Opalinuston - Synthese der geowissenschaftlichen Untersuchungsergebnisse. Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle, 659 S., Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen.
- NAGRA (2003). Grimsel Test Site – Investigation Phase V - Effective Field parameter EFP, Wettingen, Schweiz.
- NAGRA (2004). Nuclide Transport and Diffusion for Vein and Fracture Flow, NTB 04-03, Wettingen, Schweiz.
- Pahl, A. & Heusermann, S. (1991). In-situ-Untersuchungen zur Ermittlung von Gebirgsspannungen - Methoden, ausgewählte Messergebnisse und deren Interpretation, Mitteilungen des Instituts für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Verkehrswasserbau der RWTH Aachen (Hrsg.: W. Wittke), Heft 21, 81-110, Aachen.
- Papp, R. (1999). GEISHA: Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten in Salz und Hartgestein, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe.
- Petrov, V.A., Lespinasse, M. & Hammer, J. (2008). Tectonodynamics of fluid-conducting structural elements and migration of radionuclides in massifs of crystalline rocks. Geology of ore deposits, Pleiades Publ. Ltd., Vol. 50, 2, pp. 89-111, New York.
- Polster, M. & Jobmann, M. (2006). Untersuchungen zum THM-Verhalten von Tonsteininformationen anhand von in situ Erhitzerversuchen. In: Untertägige Entsorgung : siebtes Statusgespräch zu FuE-Vorhaben auf dem Gebiet der Entsorgung gefährlicher Abfälle in tiefen geologischen Formationen. 3./4. Mai 2006, Forschungszentrum Karlsruhe, 183 - 202.
- POSIVA (2005). Olkiluoto Site Description 2004 – Volume 1. Report Posiva Oy, Olkiluoto.
- POSIVA (2012a). Posiva Oy, Safety Case for the Disposal of Spent Nuclear Fuel at Olkiluoto - Synthesis 2012, POSIVA 2012-12, Helsinki, Finnland.
- POSIVA (2012b). Olkiluoto Site Description 2011. POSIVA Report 2011-02. Eurajoki, Posiva Oy, ISBN 978-951-652-179-7.
- Price, D.G. (2009). Engineering Geology - Principles and Practice, Springer Verlag, ISBN 978-3-540-29249-4.
- Prinz, H. & Strauß, R. (2006). Abriss der Ingenieurgeologie, 4. bearb. u. erw. Aufl., München Elsevier Spektrum Akad. Verlag.
- Pröhl, G. & Gering, F. (2002). Dosiskonversionsfaktoren zur Berechnung der Strahlenexposition in der Nachbetriebsphase von Endlagern nach dem Entwurf der Allgemeinen Verwaltungsvorschriften zu §47 Strahlenschutzverordnung, GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, Institut für Strahlenschutz, Neuherberg.
- Raiko, H. (2012). Canister Design 2012, Technical Report, POSIVA 2012-13, Olkiluoto.
- Read, R.S., Chandler, N.A. & Dzik E.J. (1998). In situ strength criteria for tunnel design in highly-stressed rock mass, Internat. J. Rock Mech. Min. Sci. 35, 261–278.
- Reiche, T., Noseck, U. & Wolf, J. (2014a): Modellierung des Schadstofftransports in geklüftet-porösen Medien unter der Berücksichtigung von Kolloiden mit den Transportprogrammen FRAME und COFRAME. GRS-333, BMWi-FKZ 02E10367, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Braunschweig.
- Reiche, T. & Becker, D.-A. (2014b): Berechnung radiologischer Konsequenzen der Freisetzung radioaktiver Stoffe aus einem Endlager in die Biosphäre mit dem Programm BioTREND, GRS-345, BMWi-FKZ 02E10367, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Braunschweig.
- Reiche, T. (2016). RepoTREND – Das Programmpaket zur integrierten Langzeitsicherheitsanalyse von Endlagersystemen, GRS-413, BMWi-FKZ 02E10367, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Braunschweig.

- Reinhold, K. (2005). Tiefenlage der Kristallin-Oberfläche in Deutschland, Abschlussbericht, BGR, Hannover/Berlin.
- Savage, D. (ed.) (1995). The scientific and regulatory basis for the geological disposal of radioactive waste, John Wiley & Sons Public., Chichester.
- Schreiner, M. & Kreysing, K. (1998). Geotechnik Hydrogeologie, Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten, Band 4., Springer, Berlin.
- SGD (o. J.). Infogeo, Staatliche Geologische Dienste Deutschlands, Verfügbar unter:
http://www.infogeo.de/home/index_html (Zugriff: 11.02.2016).
- Shebalin, N. V. & Leydecker, G. (1997). Earthquake catalogue for the former Soviet Union and borders up to 1988. European Commission, Report No. EUR 17245 EN, Nuclear Science and Technology Series, 135 pp., 13 fig., ISSN 1018-5593, Office for official publications of the European Communities, Luxembourg.
- Siren, T. (2011). Fracture mechanics prediction for Posiva's Olkiluoto spalling experiment (POSE), Working report 2011-23, Posiva Oy, Eurajoki. Available online at:
http://www.posiva.fi/files/1703/WR_2011-23_web.pdf.
- Siren, T. (2012). Fracture toughness properties of rocks in Olkiluoto: laboratory measurements 2008–2009, Working report 2012-25. Posiva Oy, Eurajoki, Available online at:
http://www.posiva.fi/files/2854/WR_2012-25web.pdf.
- SKB (2005a). Site investigation Oskarshamn – annual report 2005, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB (2005b). Site investigation Forsmark – annual report 2005, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB (2007). Oskarshamn site investigation method evaluation of single hole hydraulic injection tests at site investigations Oskarshamn, Report P-07-79.
- SKB (2008). Site description of Forsmark at completion of the site investigation phase - SDM-Site Forsmark. Technical Report TR-08-05, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- SKB (2008b). Äspö Hard Rock Laboratory, Planning Report 2008, SKB Report IPR-08-03, Stockholm, Sweden.
- SKB (2010a). Buffer, backfill and closure process report for the safety assessment SR-Site, SKB Technical Report TR-10-47, Stockholm.
- SKB (2010b). Design, production and initial state of the backfill and plug in deposition tunnels, SKB Technical Report TR-10-16, Stockholm.
- SKB (2010c). Design, production and initial state of the closure, SKB Technical Report TR-10-17, Stockholm.
- SKB (2010d). Design and production of the KBS-3 repository, SKB Technical Report TR-10-12, Stockholm.
- SKB (2015). System design of backfill. Project results, SKB Technical Reprt TR-14-20, Stockholm.
- Smith P.A., Alexander W.R., Heer W., Fierz T., Meier P.M., Baeyens B., Bradbury M.H., Mazurek M. & McKinley I.G. (2001). Grimsel Test Site Investigation Phase IV (1994-1996): The Nagra-JNC in situ study of safety relevant radionuclide retardation in fractured crystalline rock I: Radionuclide migration experiment - Overview 1990-1996, Nagra Technical Report NTB 00-09, Nagra, Wettingen.
- Stober, I. (1995). Die Wasserführung des kristallinen Grundgebirges, Stuttgart (Enke), ISBN 3-432-26771-1.
- Stober, I. & Bucher, K. (Hrsg.) (2000). Hydrogeology of crystalline rocks, VIII, 275 S., Dordrecht [u.a.] (Kluwer), ISBN 0-7923-6082-6.
- Sundberg, J. (2002). Determination of thermal properties at Äspö HRL, Comparison and evaluation of methods and methodologies for borehole KA 2599 G01, SKB Rapport R-02-27, Svensk Kärnbränslehantering AB, Stockholm.
- Terzaghi, K., & Fröhlich, O. (1936). Theorie der Setzung von Tonschichten, Eine Einführung in die analytische Tonmechanik, Franz Deuticke, Wien.

- Vieno, T., Hautojärvi, A., Koskinen L. & Nordman, H. (1992). TVO-92 Safety Analysis of Spent Fuel Disposal. Report YJT-92-33E, Nuclear Waste Commission of Finnish Power Companies, Helsinki.
- Vira, J. (2008). Preparing for licensing: progress in underground rock characterisation of Olkiluoto bedrock in Finland, Proceed. RepoSafe 2007, GRS & BfS, 44-51, Braunschweig.
- Wallner, M., Mrugalla, S., Hammer, J., Brewitz, W., Fahrenholz, Ch., Fein, E., Filbert, W., Haverkamp, B., Jobmann, M., Krone, J., Lerch, Ch., Ward, P., Weiß, E., Ziegenhagen, J., Gupalo, T., Kamnev, E., Konovalov, V., Lopatin, V., Milovidov, V. & Prokopova, O. (2005). Anforderungen an die Standorterkundung für HAW-Endlager im Hartgestein (ASTER), Abschlussbericht, DBE Technology, Peine.
- Weitkamp, A. (2016). CHRISTA - AP 3: Synthese Kristallinuntersuchungen, Task 3.1: Darstellung des Kenntnisstandes zur Geologie der Kristallinvorkommen in Deutschland, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.