

Integritätskriterien für ein Endlagersystem im Kristallingestein

Integritätskriterien für ein Endlagersystem im Kristallingestein

Jens Eckel
Torben Weyand
Martin Navarro

August 2019

Anmerkung:

Das diesem Bericht zugrunde liegende FE-Vorhaben 4716E03230 wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) durchgeführt.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Auftragnehmer.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der Meinung des Auftraggebers übereinstimmen.

Deskriptoren

Integrität, Integritätskriterien, Integritätsnachweis, Kristallingestein

Inhaltsverzeichnis

1	Zielsetzung.....	1
2	Integritätsbegriff und Integritätsnachweis.....	5
3	Sachstand zu Integritätskriterien	9
3.1	Problematik von ewG-Konzepten für kristalline Wirtsgesteine.....	9
3.2	Integritätskriterien für den ewG	11
3.2.1	Dilatanzkriterium	11
3.2.2	Minimalspannungs- bzw. Fluiddruckkriterium.....	12
3.2.3	Advektionskriterium	13
3.2.4	Temperaturkriterium	13
3.3	Anforderungen in nationalen Regelwerken	14
3.3.1	Schweden.....	14
3.3.2	Finnland.....	15
3.4	Referenzsystem.....	16
3.4.1	KBS-3-Konzept.....	18
3.4.2	Sicherheitsfunktionen	20
3.5	Komponentenmodell und zugeordnete Sicherheitsfunktionen.....	28
3.6	Integritätsgefährdende Prozesse und Zustände.....	35
4	Konkretisierung von Integritätskriterien für Kristallingestein	51
4.1	Ableitung von Integritätskriterien.....	51
4.2	Identifikation der zu betrachtenden Endlagerkomponenten.....	53
4.3	Ableitung von Integritätsindikatoren	55
4.3.1	Abfallmatrix.....	59
4.3.2	Abfallbehälter.....	59
4.3.3	Abfallnaher Versatz	61
4.3.4	Streckenversatz der Einlagerungsstrecken.....	64
4.3.5	Geosphäre.....	65

5	Zusammenfassende Schlussfolgerungen	67
	Literaturverzeichnis.....	71
	Abbildungsverzeichnis.....	83
	Tabellenverzeichnis.....	85
	Abkürzungsverzeichnis.....	87

1 Zielsetzung

Die derzeit gültigen *Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder Abfälle* von 2010 /BMU 10/ (nachfolgend Sicherheitsanforderungen genannt) fordern eine „Langzeitaussage zur Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“, wobei Integrität als „Erhalt der Eigenschaften des Einschlussvermögens des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs eines Endlagers“ definiert wird. Die Integritätsbetrachtung der Sicherheitsanforderungen behandelt also nicht die Integrität sämtlicher Barrieren, sondern beschränkt sich auf den einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG). Die hierzu anzuwendenden Integritätskriterien umfassen neben Kriterien zur geomechanischen Stabilität auch hydraulische und thermische Kriterien.

Das im Jahr 2013 verabschiedete und im Jahr 2017 novellierte *Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle* (nachfolgend StandAG genannt) /STA 17/ fordert, dass die Suche nach einem Standort für ein Endlager in Deutschland auch für Kristallingestein zu erfolgen hat. Aufgrund der Klüftung kristalliner Gesteine ist die Ausweisung eines ewG für dieses Wirtsgestein mit Problemen verbunden /ESK 16/. Bei Sicherheitskonzepten für Kristallingestein stellen daher die technischen und geotechnischen Barrieren die wesentlichen Barrieren dar. Solche Sicherheitskonzepte müssen nach StandAG /STA 17/ nicht zwingend einen ewG ausweisen. Daher sind die in den Sicherheitsanforderungen von 2010 /BMU 10/ formulierten Integritätskriterien für den ewG nicht mehr ohne weiteres auf Endlagerkonzepte im Kristallingestein übertragbar.

Unter anderem aus diesem Grund sind die Sicherheitsanforderungen, wie in § 26 des StandAG /STA 17/ gefordert, derzeit Gegenstand einer umfassenden Überarbeitung durch eine vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) eingesetzte Expertengruppe. Ein Entwurf dieser überarbeiteten Sicherheitsanforderungen wird in einer Stellungnahme der Entsorgungskommission (ESK) aus dem Jahr

2019 /ESK 19/ zitiert, auf diese Stellungnahme wird im vorliegenden Bericht zurückgegriffen¹.

Ziel des Berichts ist es, Betrachtungen zu einem möglichen Integritätsnachweis für ein auf technischen Barrieren beruhendes Endlagerkonzept im Kristallingestein durchzuführen. Hierbei stehen folgende Fragen im Vordergrund:

- Wie können konkrete Integritätskriterien formuliert werden?
- Für welche technischen Endlagerkomponenten ist Integrität nachzuweisen?
- Wie weit kann der Integritätsnachweis für diese Komponenten konkretisiert werden?

Zunächst werden in Kapitel 2 der diesem Bericht zugrundeliegende Integritätsbegriff spezifiziert und Grundsätze eines Integritätsnachweises erläutert. In Kapitel 3 wird zur Einordnung der Betrachtungen der Sachstand zu Integritätskriterien erhoben. Hierbei wird zunächst auf die Besonderheiten von Endlagerkonzepten im Kristallingestein eingegangen und es werden die Integritätskriterien aus den Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ mit einem möglichen Bezug zum Kristallingestein dargestellt. Es werden grundsätzlich integritätsgefährdende Prozesse im Kristallingestein thematisiert; falls zutreffend wird der Bezug zwischen den integritätsgefährdenden Prozessen und den geowissenschaftlichen Kriterien im StandAG aufgezeigt. Hieraus und aus der Stellungnahme der ESK /ESK 19/ werden in Kapitel 4 denkbare Integritätskriterien für ein auf technischen Barrieren beruhendes Endlagerkonzept im Kristallingestein formuliert.

Zur Konkretisierung des Integritätsnachweises für Sicherheitskonzepte für Kristallingestein werden das schwedische KBS-3-Konzept und Anforderungen aus dem StandAG betrachtet. Zur Identifikation der Endlagerkomponenten, für die ein Integritätsnachweis durchzuführen ist, wird auf das Komponentenmodell und die Gliederung der Sicherheitsfunktionen aus dem Vorhaben „Vergleichende Sicherheitsanalysen (VerSi-II)“ /FIS 17/ zurückgegriffen. Damit soll eine Übertragbarkeit der hier durchgeführten Überlegungen

¹ Der Referentenentwurf zu der Verordnung über die sicherheitstechnischen Anforderungen an die Entsorgung hochradioaktiver Abfälle (EndlSiAnfV) wurde während der Drucklegung dieses Berichts im Rahmen der Öffentlichkeitsbeteiligung veröffentlicht und konnte in diesem Bericht daher nicht berücksichtigt werden. Die im Folgenden dargelegten Schlussfolgerungen bleiben grundsätzlich unbeeinflusst.

auf andere Endlagerkonzepte ermöglicht werden. Anschließend werden aus den Sicherheitsfunktionen des KBS-3-Konzeptes, soweit möglich, exemplarisch quantitative Integritätsindikatoren² abgeleitet, die in einem Integritätsnachweis verwendet werden können. Aus dem Versagen einer bestimmten Sicherheitsfunktion kann dann abgeleitet werden, welches Integritätskriterium nicht mehr erfüllt ist.

Damit zeigt der Bericht einen Weg auf, wie vor dem Hintergrund aktualisierter Integritätskriterien für ein spezifisches Endlagerkonzept im Kristallingestein ein Integritätsnachweis geführt werden kann. Eine weitere Konkretisierung kann nur in Abhängigkeit vom gewählten Endlagerkonzept vorgenommen werden.

² Unter dem Begriff des Integritätsindikators ist eine Bewertungsgröße zu verstehen, die der Überprüfung des Erhalts einer komponentenbezogenen Sicherheitsfunktion dient. Die Bewertungsgröße selbst kann mit einem quantitativen Wertebereich versehen sein.

2 Integritätsbegriff und Integritätsnachweis

Der Begriff der Integrität wird in der Literatur nicht einheitlich verwendet. Wie /HOT 10/ darstellt, ergibt sich aus den dort gesichteten Unterlagen zu internationalen Sicherheitsanforderungen, Standortauswahlkriterien und Sicherheitsanalysen der Länder Frankreich, Schweiz, Finnland und Schweden, dass der Integritätsbegriff in Bezug auf das Wirtsgestein nicht explizit erwähnt, sondern allenfalls umschrieben bzw. Kriterien genannt werden, welche die Einschlusswirksamkeit der geologischen Barriere gewährleisten sollen. Dies zeigt hierauf aufbauend auch /WEY 16/ unter Berücksichtigung des sich bis dorthin zeitlich weiterentwickelten Standes von Regelwerken sowie von Wissenschaft und Technik.

Für Deutschland maßgeblich ist das Integritätsverständnis der derzeit gültigen Sicherheitsanforderungen /BMU 10/. Diese betrachten die Integrität des ewG und definieren den Begriff der Integrität als Erhalt des Einschlussvermögens des ewG in Bezug auf die eingelagerten Radionuklide. Die Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ sind nicht vor dem Hintergrund eines potentiellen Wirtsgesteins Kristallingestein formuliert worden, während hingegen das StandAG /STA 17/ explizit dieses Wirtsgestein berücksichtigt (§ 1 (3) ebenda). Nach § 26 (1) StandAG sollen in den zu erarbeitenden Sicherheitsanforderungen die wesentlichen Grundlagen zur Gewährleistung des sicheren Einschlusses der Radionuklide über den Nachweiszeitraum in vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen festgelegt werden. Nach § 26 (3) StandAG wird das BMU ermächtigt, durch Rechtsverordnung Sicherheitsanforderungen festzulegen, die den Schutzzielen und allgemeinen Sicherheitsprinzipien nach § 26 (2) genügen.

Als Konsequenz können die Integritätskriterien in den zu erstellenden Sicherheitsanforderungen so aufgeteilt sein, dass entweder der ewG als wesentliche Barriere erfasst wird, oder technische und geotechnische Barrieren als wesentliche Barrieren erfasst werden. Beide Barrierenkonzepte sind zunächst verschieden, können sich aber, wie z. B. bei der Verwendung von Bentonitbuffer als geotechnische Barriere, ergänzen. Der Integritätsbegriff selbst bleibt unverändert und bezieht das Einschlussvermögen eben

nicht mehr ausschließlich auf einen ewG, sondern in Abhängigkeit vom gewählten Endlagerkonzept auf den Einlagerungsbereich³ im Sinne von § 2 StandAG /STA 17/.

Nach /ESK 19/ soll ein robustes, gestaffeltes System verschiedener Barrieren die gestellten Anforderungen passiv und wartungsfrei gewährleisten. Hierbei wird zwischen „wesentlichen“ und „weiteren“ Barrieren unterschieden. Die wesentlichen Barrieren sind diejenigen Barrieren, auf denen der Einschluss im Endlagersystem beruht; dies sind im Kristallingestein die technischen und geotechnischen Barrieren, sofern im Wirtsgestein selbst kein ewG ausgewiesen werden kann.

Die weiteren Barrieren sind nach /ESK 19/ alle geologischen, technischen und geotechnischen Barrieren, die in einem Endlagersystem zusätzlich zu und im Zusammenwirken mit den wesentlichen Barrieren eine Ausbreitung von Radionukliden be- oder verhindern. Die wesentlichen und weiteren Barrieren des Endlagersystems müssen so zusammenwirken, dass das Endlagersystem auch für abweichende Entwicklungen seine Funktionstüchtigkeit in ausreichendem Maße beibehält und Austragungen von Radionukliden aus den radioaktiven Abfällen geringgehalten werden. Es ist außerdem nachzuweisen, dass die für den Erhalt der Integrität relevanten Eigenschaften der weiteren Barrieren des Endlagersystems mindestens über den Zeitraum erhalten bleiben, der für den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle nach dem Sicherheitskonzept erforderlich ist /ESK 19/.

Das Barrierensystem aus (den wesentlichen) geologischen, geotechnischen und technischen Barrieren muss den Einschluss der radioaktiven Abfälle im Nachweiszeitraum sicherstellen. Für die einzelnen Barrieren entscheidend sind deren Funktionsfähigkeit und das Zusammenwirken der Barrieren im Barrierensystem. Dazu ist nachzuweisen, dass das Barrierensystem integral die Anforderungen des Einschlusses und des Erhalts der Einschlusseigenschaften während des Nachweiszeitraums erfüllt.

Es ist nachzuweisen, dass die relevanten Eigenschaften der technischen und geotechnischen Barrieren, mithin deren Sicherheitsfunktionen, mindestens über den Zeitraum erhalten bleiben, während dessen diese Barrieren für den sicheren Einschluss der

³ Der Einlagerungsbereich im Sinne von § 2 StandAG beschreibt den „räumlichen Bereich des Gebirges, in den die radioaktiven Abfälle eingelagert werden sollen; falls das Einschlussvermögen des Endlagersystems wesentlich auf technischen und geotechnischen Barrieren beruht, zählt hierzu auch der Bereich des Gebirges, der die Funktionsfähigkeit und den Erhalt dieser Barrieren gewährleistet“.

radioaktiven Abfälle nach dem Sicherheitskonzept erforderlich sind. Dazu müssen geeignete Indikatoren gefunden werden.

3 Sachstand zu Integritätskriterien

Zur Identifikation möglicher Integritätskriterien für das Wirtsgestein Kristallingestein werden im Folgenden die Integritätskriterien der aktuellen Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ dargestellt. Integritätskriterien für die technischen und geotechnischen Barrieren des schwedisch-finnischen KBS-3-Konzeptes werden ebenfalls beschrieben, da die Endlagerkonzeption in diesen Ländern bereits abgeschlossen ist. Es werden außerdem die Besonderheiten des grundlegenden Sicherheitskonzepts in Kristallingestein im Vergleich zu den Wirtsgesteinen Steinsalz und Tonstein dargestellt, da diese Besonderheiten direkte Auswirkungen auf die Integritätskriterien für ein Endlager im Kristallingestein haben.

Mögliche Integritätskriterien für ein auf technischen und geotechnischen Barrieren beruhendes Sicherheitskonzept werden dann in Kapitel 4.1 abgeleitet.

3.1 Problematik von ewG-Konzepten für kristalline Wirtsgesteine

Die Besonderheiten des grundlegenden Sicherheitskonzepts für Endlagersysteme im Kristallingestein sind bereits in einer Stellungnahme der ESK zusammengefasst /ESK 16/:

„Das grundlegende Sicherheitskonzept für Endlagersysteme im Kristallin weicht von den Sicherheitskonzepten bei Steinsalz und Tonstein ab. Hauptgrund ist, dass im Gegensatz zu Endlagersystemen im Steinsalz oder Tonstein das Kristallingestein aufgrund seiner hydraulischen Eigenschaften keine vergleichbaren einschlusswirksamen geologischen Barriereigenschaften aufweist.“

Die erwähnten hydraulischen Eigenschaften kristalliner Gesteine ergeben sich insbesondere durch deren Klüftung. Infolge der Klüftung ist die Ausweisung eines ewG im Kristallingestein nicht möglich /ESK 16/. Entsprechend gewährleisten dann, anstelle des ewG, die technischen oder geotechnischen Barrieren den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle.

Um das Konzept des ewG auch für Kristallingestein zugänglich zu machen, wurden im Forschungsvorhaben CHRISTA /JOB 16/ zwei verschiedene Konzepte betrachtet. Zum einen ein ewG-Konzept, welches unvollständig durch den Wirtsgesteinskörper

umschlossen ist⁴, zum anderen wird das Konzept eines *multiplen ewG* vorgeschlagen und detailliert betrachtet. Die Idee des multiplen ewG besteht nach /JOB 16/ darin, einzelne ewG im Kristallingestein auszuweisen, die aus Bereichen, die nur sehr gering von hydraulisch wirksamen Klüften durchzogen sind, bestehen, siehe auch Abb. 3.1. Die hydraulisch wirksamen Klüfte definieren dann die Berandung eines einzelnen ewG. Der einzelne ewG kann weiterhin von mineralisierten Klüften durchzogen sein, die potentiell mechanische Schwächezonen darstellen können. Auf diesen ewG sollen dann nach /JOB 16/ die Integritätskriterien aus /BMU 10/ angewendet werden.

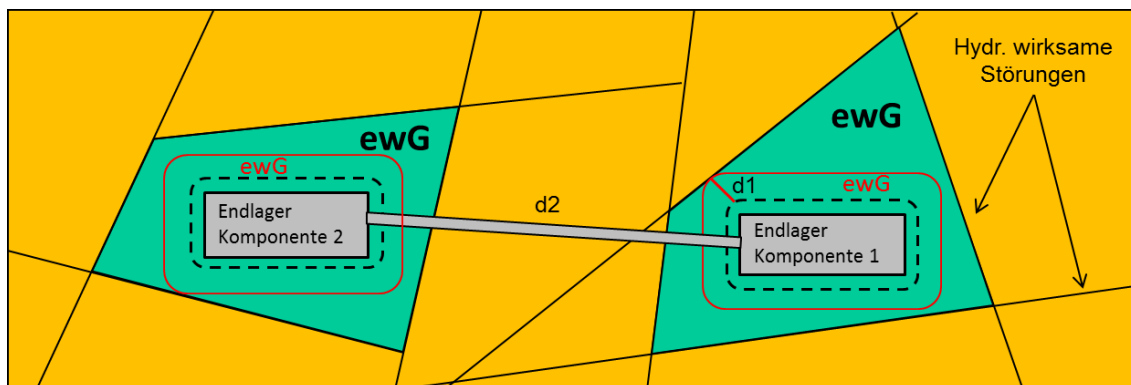


Abb. 3.1 Darstellung zweier benachbarter ewG (ewG-Typ „multipler ewG“) nach /JOB 16/

Nach /ESK 16/ ist unklar, inwieweit das Konzept des multiplen ewG in Kristallingestein in Deutschland realisierbar ist. In Deutschland müssen mehrere tausend Behälter eingelagert werden, d. h. es müssten, auch wenn mehrere Behälter in einem ewG eingelagert werden können, ewG in entsprechender Größenordnung ausgewiesen werden; dies scheint praktisch nicht möglich zu sein /ESK 16/. Weiterhin sind Klüfte im Kristallingestein mit derzeitigen Methoden schwierig zu detektieren /RÖH 99/, so dass unklar ist, wie diese als Berandungen eines einzelnen ewG angesehenen Klüfte zweifelsfrei nachgewiesen werden sollen. Nach /KOC 18/ erscheint die Detektion von einzelnen Klüften für die Ausweisung konkreter kleinskaliger ewG mit übertägigen nichtinvasiven Erkundungsmethoden nicht möglich, sondern konkrete Bohrlochmessungen sind erforderlich. Für jeden einzelnen ewG wäre zudem ein eigener radiologischer Langzeitsicherheitsnachweis einschließlich Nachweis des langfristigen Integritätsverlusts zu führen /ESK 16/; aufgrund der hohen einzulagernden Behälterzahl scheint dies nicht realisierbar zu sein.

⁴ Dieses Konzept greift die Idee des Typ Bb aus /AKE 02/ auf.

Für den von /JOB 16/ genannten Typ Bb ist grundsätzlich eine geologische Situation denkbar, in der ein Wirtsgestein Kristallingestein durch eine Salz- und/oder Tonsteinformation hydraulisch getrennt von der Oberfläche vorliegt. Nach Einschätzung von /WOL 19/ liegt eine solche geologische Situation beispielsweise am Standort Konrad vor. In diesem Fall würde der ewG jedoch nicht durch das kristalline Wirtsgestein, sondern durch die geringpermeable Überdeckung gebildet. Integritätskriterien für diese Überdeckung wären dann diejenigen für das Wirtsgestein Salz- und/oder Tonstein.

Da das Konzept des multiplen ewG aus Sicht der Autoren nicht realisierbar erscheint und im Typ Bb Kristallingestein selbst nicht Bestandteil des ewG ist, werden im Folgenden ausschließlich Sicherheitskonzepte für Kristallingestein untersucht, die keinen ewG aufweisen und bei denen die technischen und geotechnischen Barrieren die wesentlichen Barrieren darstellen. Als Referenzkonzept dient hierbei das KSB-3 Konzept, das im Kapitel 3.4.1 näher beschrieben wird.

3.2 Integritätskriterien für den ewG

Auch wenn aus Sicht der ESK /ESK 16/ unklar ist, wie ein Sicherheitskonzept im Kristallingestein mit einem ewG umzusetzen wäre, kann die Ausweisung eines ewG grundsätzlich nicht ausgeschlossen werden. Bei Sicherheitskonzepten mit ewG kämen dann zur Zeit noch die in den Sicherheitsanforderungen von 2010 /BMU 10/ enthaltenen Integritätskriterien zur Anwendung. Diese werden daher im Folgenden erläutert. Dabei werden die im Vorhaben CHRISTA /JOB 16/ erzielten Ergebnisse zur Anwendbarkeit der Integritätskriterien auf einen ewG im Kristallingestein dargestellt.

3.2.1 Dilatanzkriterium

Das Dilatanzkriterium beschreibt nach /BMU 10/, dass (mechanische) Beanspruchungen die Dilatanzfestigkeiten der Gesteinsformationen des ewG außerhalb der Auflockerungszone nicht überschreiten dürfen. Für Salzgestein wurde u. a. von /CRI 98/, /HUN 03/ ein Dilatanzkonzept entwickelt, das in /KOC 12/ angewendet wurde.

Das Dilatanzkriterium gilt demnach als verletzt, wenn durch mechanische Beanspruchungen (Spannungen in den Gesteinsformationen des ewG) die sogenannte Dilatanzgrenze überschritten wird. Bei der Dilatanzgrenze handelt es sich um eine Spannungsgrenze, bei der für die Volumenänderung eines Gesteinskörpers gilt

$$\frac{d\varepsilon_{Vol}}{d\varepsilon_l} \leq 0. \quad (3.1)$$

Eine negative Volumenänderung beschreibt eine Kompaktion. Bei Verletzung des Dilatanzkriteriums können sekundäre Wasserwegsamkeiten z. B. durch Rissbildung entstehen (Sekundärpermeabilitäten).

Für die Übertragung auf Kristallingestein schlägt /JOB 16/ vor, den Nachweis der Einhaltung des Dilatanzkriteriums derart zu führen, dass unterschiedlich starke Klüftigkeiten (mineralisierte Klüfte) in ihrer reduzierenden Wirkung auf die Festigkeit des Gesteins berücksichtigt werden. Hierzu wird auf die Arbeiten von /HOE 97/, /HOE 07a/, /HOE 07b/, /HAM 02/, /HOE 88/, /HOE 80/ verwiesen, die ein entsprechendes Stoffgesetz entwickelt haben. Dieses Stoffgesetz muss für einen Integritätsnachweis zunächst qualifiziert werden.

3.2.2 Minimalspannungs- bzw. Fluidruckkriterium

Das Minimalspannungs- bzw. Fluidruckkriterium besagt, dass durch die zu erwartenden Fluiddrücke die Fluidruckbelastbarkeiten des ewG insofern nicht überschritten werden dürfen, als dass erhöhte Grundwassermengen in den ewG zutreten können /BMU 10/. Dies bedeutet, dass durch fluiddruckgenerierte Beanspruchungen keine hydraulischen Fließwege entstehen dürfen und ein druckgetriebenes Eindringen von möglicherweise anstehenden Fluiden unter den gegebenen Spannungsbedingungen nicht möglich sein darf. Dieses Kriterium wurde für das Wirtsgestein Salz (unter Verwendung des Fluiddruckes einer hypothetischen Flüssigkeitssäule) angewendet und gilt als erfüllt, wenn die Summe aus der kleinsten Gebirgsdruckspannung zuzüglich einer zu überwindenden Zugfestigkeit kleiner ist als der lokale Fluidruck /KOC 12/.

Nach dem Forschungsvorhaben CHRISTA /JOB 16/ ist zur Übertragung des Fluidruckkriteriums auf Kristallingestein zu beachten, dass die Zugfestigkeit des Gesteins durch die Klüftigkeit und mögliche Vorschädigungen beeinflusst sein kann und im Extremfall unmineralisierter Klüfte gegen Null gehen kann. In diesem Fall soll als Kriterium die effektive Zugspannung betrachtet werden. In Bereichen, in denen zu allen Zeiten die größte effektive Hauptspannung kleiner oder gleich Null ist, gilt das Fluidruckkriterium dann als erfüllt /JOB 16/.

3.2.3 Advektionskriterium

Nach /BMU 10/ ist zu zeigen, dass *„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 advective Transportprozesse allenfalls vergleichbar zur Ausbreitung durch diffusive Transportprozesse erfolgt.“*

Nach /JOB 16/ ist im Kristallingestein nicht davon auszugehen, dass die advective Transportgeschwindigkeit im Kluftsystem in der Größenordnung der diffusiven Transportgeschwindigkeit liegt, sondern in der Regel sehr viel höher ist. Damit nähme das Kluftwasser innerhalb eines im Kristallingestein ausgewiesenen ewG am hydrogeologischen Kreislauf außerhalb dieses ewGs teil, so dass das Advektionskriterium für einen ewG im Kristallingestein nicht erfüllbar sei. In /NAV 19/ wird argumentiert, dass sich der diffusive Transport nicht als Maßstab für einen langsamen advectiven Transport eignet, da der lokale diffusive Fluss gegen Null gehen kann, was eine Übersensitivität des Kriteriums zur Folge haben kann /NAV 19/. Gemäß dem 1. Fickschen Gesetz verschwindet der diffusive Fluss eines einzelnen Radionuklids nämlich am Ort der Konzentrationsmaxima und -minima, so dass sich lokale Verletzungen des Advektionskriteriums ergeben, wenn sich ein Konzentrationsmaximum advektiv bewegt – auch dann, wenn der ewG seine Eigenschaften nicht ändert. Weitere Kritikpunkte am Advektionskriterium finden sich in /NAV 19/.

Inwiefern das Advektionskriterium aus /BMU 10/ in den aktuell in Erstellung befindlichen Sicherheitsanforderungen Eingang finden wird, bleibt bis zur Veröffentlichung der Sicherheitsanforderungen abzuwarten.

3.2.4 Temperaturkriterium

Nach /BMU 10/ darf durch die Temperaturentwicklung die Barrierewirkung des ewG nicht unzulässig beeinflusst werden. Für das Wirtsgestein Salz wurden zur Überprüfung dieses Kriteriums bereits thermische Auslegungsrechnungen durchgeführt /BOL 12/, /MÖN 12/. Das Temperaturkriterium beinhaltet eine Reihe temperaturabhängiger Prozesse, die in ihrer Wirkung auf den ewG zu prüfen sind, Details finden sich in /BRA 19/. Nach /JOB 16/ wird eine entsprechende Analyse zu einer Quantifizierung des Kriteriums für Kristallingestein zu führen sein und die Anwendbarkeit ist dann gegeben.

Aktuelle Arbeiten von /BRA 19/ beschäftigen sich mit der Temperatur- bzw. Wärmeeinwirkung infolge des radioaktiven Zerfalls der einzulagernden hochradioaktiven Abfälle auf die Wirtsgesteine Steinsalz, Tonstein und Kristallingestein. Hierzu gehört insbesondere eine Betrachtung temperaturabhängiger Prozesse, welche potentiell die Integrität bzw. Endlagersicherheit gefährden können.

Die Genese kristalliner Gesteine ist in der Regel mit hohen Temperaturen verbunden (bspw. 650 – 700 °C /ROH 11/). In diesen Fällen ist für das eigentliche Wirtsgestein keine wesentliche Veränderung durch temperaturabhängige Prozesse zu erwarten. Wesentliche temperaturabhängige Prozesse beeinflussen eher die technischen und geotechnischen Barrieren (z. B. Bentonit, Behälter), Fluide (geochemisches Milieu) und Kluffüllungen, insofern letzteren eine sicherheitsrelevante Barrierefunktion im Endlagerkonzept zugewiesen wird /BRA 19/.

3.3 Anforderungen in nationalen Regelwerken

Endlager für wärmeentwickelnde bzw. hoch radioaktive Abfälle im Kristallingestein werden in Schweden und Finnland umgesetzt, und deren Planung bzw. Errichtung ist in diesen beiden Ländern abgeschlossen bzw. weit fortgeschritten. Deshalb sind im Folgenden zur Vollständigkeit des Sachstandes die wesentlichen regulatorischen Aspekte dieser beiden Länder in Bezug auf Integritätskriterien wiedergegeben. Eine detaillierte Übersicht befindet sich in /WEY 16/.

3.3.1 Schweden

Gesetzlich geregelt ist die Endlagerung radioaktiver Abfälle im „Swedish Radiation Safety Authority Regulatory Code“ /SSM 08a/, /SSM 08b/. Zum Schutz der menschlichen Gesundheit dürfen in der Nachverschlussphase schädliche Wirkungen nur mit einer Wahrscheinlichkeit von maximal 10^{-6} auftreten. Für die ersten 1.000 Jahre nach Verschluss ist eine detaillierte Risikoanalyse durchzuführen. Ein quantitativer Nachweis für einen sicheren Einschluss der Radionuklide muss für 100.000 Jahre erbracht werden. Über diesen Zeitraum hinaus sollen bis eine Million Jahre mögliche externe Einflüsse wie Vergletscherung und Erdbeben auf die Barrierenwirksamkeit anhand qualitativer Kriterien aufgezeigt werden /SSM 08a/, /SSM 08b/. Die Sicherheitsanforderungen nach /SSM 08a/ schreiben vor, dass das Barrierensystem allen sog. *features, events and processes* (FEP) in der Nachverschlussphase standhalten soll.

Geologische Voruntersuchungen haben ergeben, dass in Schweden ausschließlich das Wirtsgestein Granit für eine Endlagerung von hoch radioaktiven Abfällen in Frage kommt. Geeignete Salz- und Tonstandorte sind in Schweden nicht vorhanden /KOM 16/. Das Endlagerkonzept sieht neben der natürlichen Barriere durch den Granit besonders technische Barrieren vor. Kupferbehälter mit hoch radioaktiven Abfällen sollen in Bentonit(ringe) eingebracht werden. Das Wirtsgestein dient der mechanischen Stabilität des Endlagers, braucht aber selbst nicht wesentlich zur Rückhaltung von Radionukliden beizutragen /SKB 11a/. Daher wird der Begriff der Integrität in schwedischen Studien hauptsächlich für die Behälter verwendet. Insbesondere muss für die Kupferbehälter ein Nachweis hinsichtlich der Druckbeständigkeit und Korrosion über den Nachweiszeitraum erbracht werden.

3.3.2 Finnland

Die regulatorischen Anforderungen für ein Endlager für hoch radioaktive Abfälle sind im finnischen Kernenergiegesetz geregelt /NEA 08/, auf dessen Basis die Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung für radioaktive Abfälle entwickelt wurde /STUK 14/. Ein genauer Zeitrahmen für die Nachweispflicht der Sicherheit der technischen Einlagerungslösung wird in /STUK 14/ nicht genannt. Für weniger als einige 1.000 Jahre soll der Dosisgrenzwert als Maß für den Schutz vor strahlenbedingter Gesundheitsschäden eingehalten werden, darüber hinaus dienen die Dosisgrenzwerte als Indikator für die Einschlusswirksamkeit des Endlagersystems /STUK 14/. Daher wurde im Langzeitsicherheitsnachweis /POS 12a/ ein hinreichend zuverlässiger (*sufficient reliability*) Nachweis über 10.000 Jahre erbracht und darüber hinaus soll bis hin zu einer Million Jahre eine grundsätzliche Einhaltung der Sicherheitsfunktionen gezeigt werden /POS 12a/.

In Finnland standen ausschließlich potentielle Standorte für ein Endlager für hoch radioaktive Abfälle für das Wirtsgestein Kristallingestein zur Verfügung. Untersucht wurden von Posiva Oy insgesamt vier verschiedene Standorte. Grundsätzlich erwiesen sich alle Standorte als geeignet, und der Standort Olkiluoto wurde aufgrund seiner Nähe zum Zwischenlager und seiner günstigen standortspezifischen Eigenschaften ausgewählt. Der Standort zeichnet sich aus durch eine stabile tektonische Situation, eine aus bergbautechnischer Sicht gute Qualität des kristallinen Grundgebirges, günstige geochemische Eigenschaften des Grundwassers (u. a. mit reduzierenden Bedingungen) sowie eine über einen langen Zeitraum stabile geringe Grundwasserfließgeschwindigkeit /POS 12a/.

Finnland verwendet das Endlagerkonzept KBS-3, das Kupferbehälter mit hoch radioaktiven Abfällen, umgeben von einer Bentonitbarriere im Kristallingestein, vorsieht. Um den Wärmeeintrag zu verringern und eine denkbare Beeinträchtigung der Bentonitbarriere zu verhindern, werden die abgebrannten Brennelemente in den Kupferbehältern erst nach 20 bis 40 Jahren nach Entnahme aus den Reaktoren eingelagert.

Die integritätsgefährdenden Prozesse und Zustände für das Wirtsgestein Kristallingestein und der geotechnischen Barrieren werden von Posiva Oy auf Basis einer Sicherheitsanalyse für den Standort Olkiluoto /POS 12b/, /POS 13/, /POS 12a/ identifiziert. Der Begriff der Integrität wird in den Sicherheitsanforderungen im Kontext der Behälterintegrität genannt /STUK 14/.

Für die technischen Barrieren gelten folgende Sicherheitsfunktionen, die gewährleistet bleiben sollen /STUK 14/:

- Immobilisierbarkeit der Radionuklide in der Abfallmatrix,
- Korrosionsresistenz der Abfallmatrix,
- Mechanische Belastbarkeit der Abfallmatrix,
- Widerstand des Buffers gegenüber kleineren Gebirgsbewegungen.

3.4 Referenzsystem

In der Analyse der Integritätskriterien für einen möglichen Integritätsnachweis im Kristallingestein wird im vorliegenden Bericht als Referenzsystem das schwedische KBS-3-Konzept verwendet, das eine Einlagerung in kupferummantelten Behältern in vertikalen Bohrlöchern vorsieht /SKB 11b/. In der Entwicklung des Komponentenmodells im Vorhaben VerSi-II /FIS 17/ wurde die prinzipielle Anwendbarkeit des KBS-3-Konzeptes für deutsche Kristallingesteinvorkommen gezeigt. Dies wird im Folgenden zusammengefasst.

Die Untersuchung bezüglich der geologischen Situation der für ein Endlager potentiell in Frage kommenden Kristallingesteinvorkommen⁵ in Deutschland hat gezeigt, dass auch wenn die tektonische Überprägung der deutschen Kristallingesteinvorkommen allgemein höher ausfällt als im Kristallingestein des Baltischen Schildes (Schweden, Finnland) oder des kanadischen Schildes (Kanada), keine eindeutigen Hinweise auf notwendige Modifikationen des schwedisch-finnischen KBS-3-Konzeptes bestehen /FIS 17/. Auch die Beschaffenheit des „tiefen Grundwassers“ in Deutschland ist neben der Eigenschaft als Transportmedium insbesondere für Korrosionsverhalten bzw. -beständigkeit der Behälter und Buffer von Bedeutung. Für die Korrosion der Endlagerbehälter spielt die Zusammensetzung der Wässer im Nahfeld eine wichtige Rolle. Zwar bestehen große lokale Schwankungen in der hydrochemischen Zusammensetzung der Tiefengrundwässer in Deutschland, es bestehen jedoch keine Hinweise, dass Tiefenwasservorkommen existieren, deren hydrochemische Zusammensetzung die Indikatoren nach /SKB 11b/ nicht erfüllen könnten und damit den Einsatz von geotechnischen Barrieren als wesentliche Barrieren grundsätzlich gefährden könnten. Dadurch ist die Anwendbarkeit des schwedischen KBS-3 Konzeptes als Referenzsystem möglich.

⁵ Es wurden nicht-salinare Formationen ohne geringpermeable Überdeckung in Deutschland im Rahmen einer Vorauswahl aufgelistet /BRÄ 94/, /JOB 16/, die nach Ansetzen von geologischen und geotechnischen Ausschlusskriterien übrig geblieben waren.

3.4.1 KBS-3-Konzept

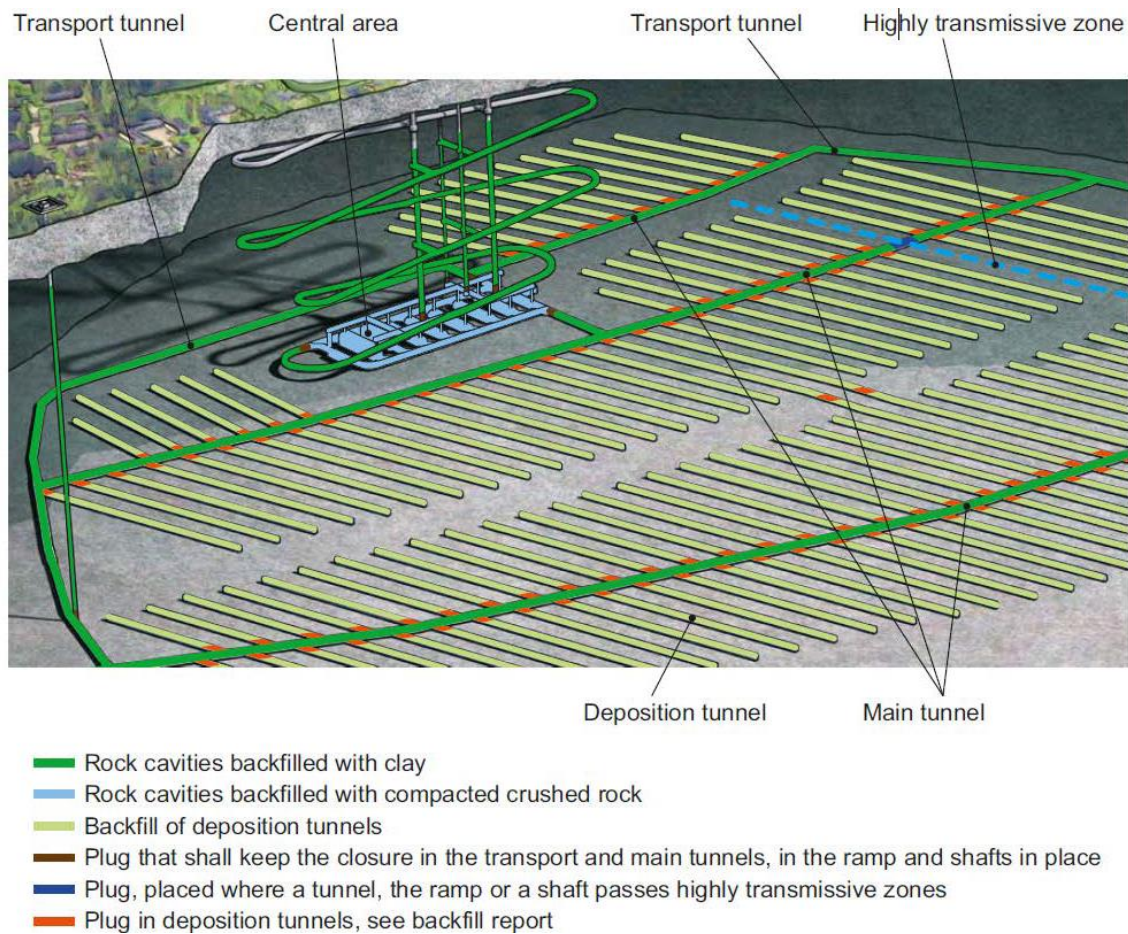


Abb. 3.2 Das Verschlusskonzept des KBS-3-Konzeptes /SKB 11b/

Das schwedische KBS-3-Konzept ist in /FIS 17/ detailliert dargestellt. Im Folgenden wird ein sich daran orientierender Überblick gegeben. Die weiterführenden Details sind in /FIS 17/, /SKB 11b/ zu finden.

Das KBS-3-Konzept sieht eine Endlagerung der Abfallgebinde in ca. 6,7 m tiefen vertikalen Einlagerungsbohrlöchern im Kristallingestein vor /SKB 11b/. Das Wirtsgestein Granit ist klüftig und wasserführend. Daher ist die Einlagerung der radioaktiven Abfälle in Kupferbehältern geplant, die eine hohe Korrosionsresistenz gegenüber den in Schweden zu erwartenden Grundwässern aufweisen. Somit besitzen die Behälter eine hohe Relevanz zur Isolation des Radionuklidinventares. Die Behälter werden zusätzlich von Bentonit (Bentonit-Buffer) umschlossen. Dieser soll mechanischen Schutz bieten und hydraulisch abdichten. Im KBS-3-Konzept ist der Behälter im Verbund mit dem umgebenden Bentonit-Buffer somit die wesentliche einschlusswirksame Barriere. Alle weiteren Versatz- und Verschlussmaßnahmen dienen zum einen der Erhaltung der

Behälterintegrität und zum anderen der Retardation des Radionuklidtransportes bei einem zu unterstellenden Behälterausfall. Es werden eine Reihe sicherheitskonzeptioneller Anforderungen an das KBS-3-Endlagerdesign bzw. den Standort gestellt, s. a. /FIS 17/, /SKB 11b/, aus denen sich die in Kapitel 3.4.2 beschriebenen Sicherheitsfunktionen der Komponenten des Endlagersystems herleiten.

Im Endlagerbergwerk sind folgende Verschlussmaßnahmen geplant (Abb. 3.2):

- Versatz der Bohrlochüberfahrungsstrecke mit Bentonit („Backfill“),
- Versatz der Zugangs- und Transportstrecken mit einem Ton/Bentonit-Gemisch („Clay“),
- Versatz von Grubenbauen (Infrastrukturbereich) mit kompaktiertem, zerkleinertem Ausbruchsmaterial („closure“, „crushed rock“),
- Verschlussbauwerke („Plugs“) zum Verschluss der Beschickungsstrecken,
- Verschlussbauwerke („Plugs“) zur Abgrenzung hoch transmissiver Zonen,
- Verschlussbauwerke („Plugs“) zur räumlichen Fixierung des zerkleinerten Ausbruchsmaterials.

Der Endlagerbehälter besteht aus zwei wesentlichen Komponenten: Dem inneren Brennelementbehälter aus Gussstahl und der äußeren Umhüllung aus Kupfer. Der Behälter aus Gussstahl dient zur Aufnahme von entweder 12 Brennelementen aus Siedewasserreaktoren oder 4 Brennelementen aus Druckwasserreaktoren. Er hat im Zusammenwirken mit der äußeren Umhüllung die Aufgabe zu erwartende isostatische Lasten und Scherbewegungen schadlos aufzunehmen /BEU 16/. Die äußere Umhüllung des Behälters aus Kupfer bildet mit einer Wandstärke von 5 cm die Hauptbarriere. Hauptaufgabe der äußeren Umhüllung aus Kupfer, welche den Korrosionsschutz gewährleistet, ist es im Verbund mit dem Gussbehälter, den Einschluss der Radionuklide über einen möglichst langen Zeitraum zu gewährleisten /BEU 16/.

Die Behälter in den Einlagerungsbohrlöchern werden von einem Bentonit-Buffer umschlossen. Die Bohrlochüberfahrungsstrecken werden ebenfalls mit Bentonit verfüllt. Die Bohrlochüberfahrungsstrecke wird gegenüber der Transportstrecke mit einem „Plug“ verschlossen. Die Hauptfunktion des Buffers ist es den Lösungstransport zum Abfallbehälter und mögliche Radionuklidfreisetzungen aus dem Abfallbehälter zu begrenzen.

Dies soll durch eine geringe hydraulische Durchlässigkeit des Buffers erreicht werden. Der Buffer quillt bei der Aufsättigung mit Lösung auf, wodurch er sich selbst abdichten soll. Zudem soll der Buffer den Behälter in dem Bohrloch in Position halten, Scherbewegungen des Wirtsgesteines abdämpfen, mikrobielle Aktivität auf der Behälteroberfläche limitieren und bei einem potentiellen Ausfall der Behälterintegrität den Kolloidtransport beschränken.

Die Bohrlochüberfahrungsstrecken werden ebenfalls mit Bentonit verfüllt (backfill in deposition tunnels). Der Buffer in den Einlagerungsbohrlöchern quillt und wird deshalb voraussichtlich nach oben zur Bohrlochüberfahrungsstrecke hin expandieren. Dies würde die Dichte des Buffers reduzieren. Der Bentonitversatz der Bohrlochüberfahrungsstrecke soll dem entgegenwirken und damit als Widerlager agieren.

3.4.2 Sicherheitsfunktionen

Für den Standort Forsmark wurde ein Langzeitsicherheitsnachweis /SKB 11a/ erstellt. Dieser wird im Folgenden verwendet um integritätsgefährdende Prozesse und Zustände für das Wirtsgestein Kristallingestein und der in diesem Zusammenhang stehenden geotechnischen Barrieren zu identifizieren.

/SKB 11b/ teilt die Sicherheitsfunktionen in einschlusswirksame (containment) Sicherheitsfunktionen (Abb. 3.3) und rückhaltende (retardation) Sicherheitsfunktionen (siehe spätere Abb. 3.4) ein. Es wird davon ausgegangen, dass die rückhaltenden Sicherheitsfunktionen (nicht zu verwechseln mit den gleichnamigen RSF, die in VerSi /FIS 10/, /FIS 17/ betrachtet werden) erst wirksam werden, wenn ein oder mehrere Behälter ausfallen. Diese Sicherheitsfunktionen werden im Folgenden kurz beschrieben, weitere Details sind in /FIS 17/ zu finden.

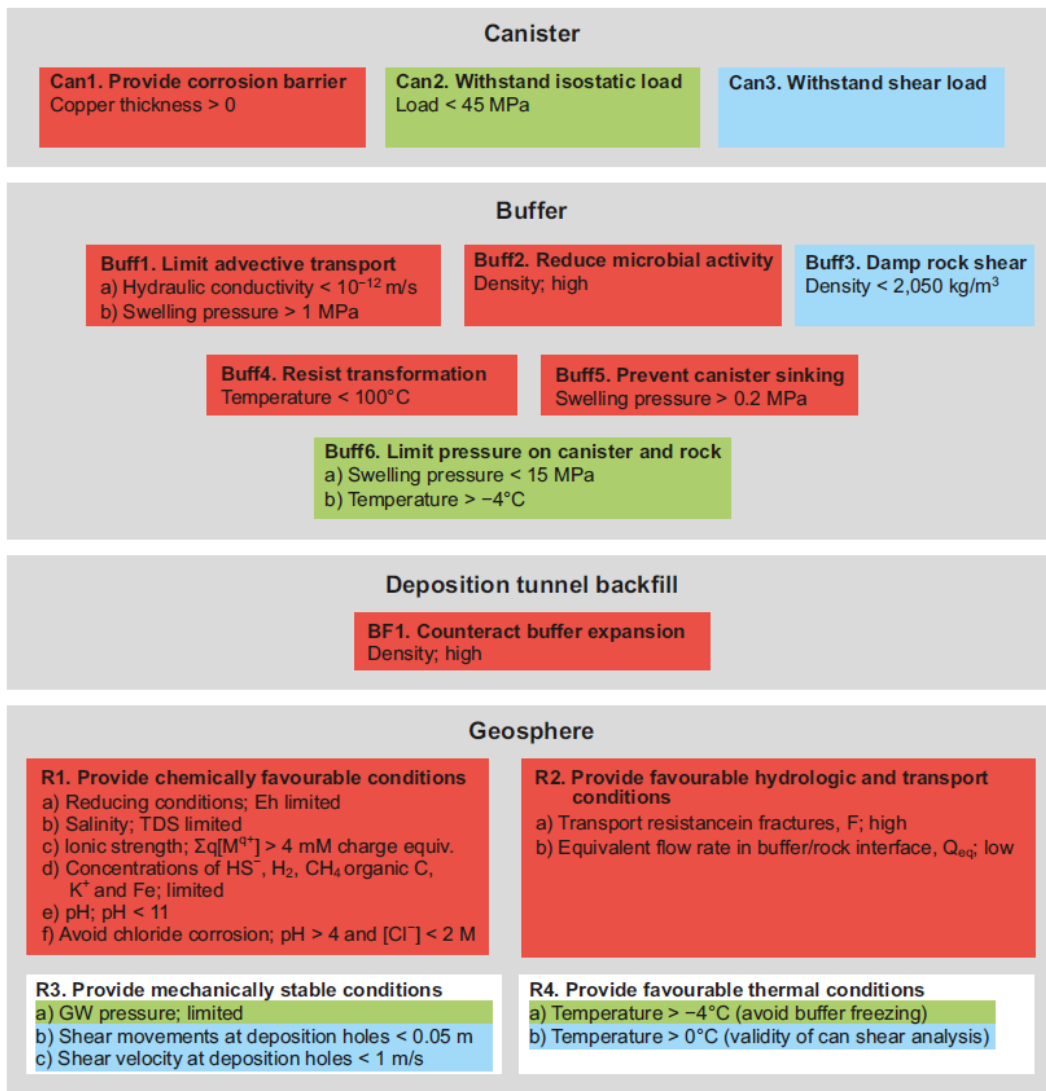


Abb. 3.3 Sicherheitsfunktionen des KBS-3-Konzepts bezogen auf den Einschluss der Radionuklide /SKB 11b/

Einschlusswirksame Sicherheitsfunktionen

Im schwedischen Langzeitsicherheitsnachweis wurden Sicherheitsfunktionen definiert, welche die Einschlusswirksamkeit der geotechnischen Barrieren, insbesondere der Endlagerbehälter, gewährleisten sollen. Für die Einschlusswirksamkeit der Behälter werden drei Sicherheitsfunktionen (Can1-3) genannt, welche drei mögliche Integritätsverletzungen beschreiben, die durch integritätsgefährdende Prozesse hervorgerufen werden:

- Korrosion der Kupferummantelung der Behälter (**Can1**),
- Isostatische Belastung der Behälter (**Can2**),
- Beanspruchungen durch Scherkräfte (**Can3**).

Diesen drei Sicherheitsfunktionen des Behälters sind, farblich in Abb. 3.3 markiert, weitere Sicherheitsfunktionen des Buffers, des Versatzes und der Geosphäre zugeordnet, welche ihrerseits den Erhalt der Sicherheitsfunktionen des Behälters und nicht selbst den Einschluss gewährleisten.

Darüber hinaus sollen die Sicherheitsfunktionen des Bentonits in den Einlagerungsbohrlöchern (Buff1-6) sowie als Versatzmaterial in den Einlagerungsstrecken (BF1) und der Geosphäre (R1-R4) die Einschlusswirksamkeit der Endlagerbehälter unterstützen. Der Bentonit in den Einlagerungsbohrlöchern soll

- einen hohen Quelldruck ($> 1 \text{ MPa}$) erzeugen, sodass eine geringe hydraulische Leitfähigkeit (10^{-12} m/s) im Umfeld des Behälters vorliegt und somit einen Lösungszutritt zum Behälter verhindert (**Buff1**), damit **Can1** nicht verletzt wird.
- eine hohe Dichte aufweisen, sodass Mikroorganismen nicht an den Behälter gelangen können und somit eine mikrobiell induzierte beschleunigte Korrosion der Behälter verhindert wird (**Buff2**).
- dennoch eine Dichte von weniger als 2.050 kg/m^3 besitzen, sodass die plastischen Eigenschaften des Bentonits nicht eingeschränkt werden und weiterhin Beanspruchungen durch Scherbewegungen abdämpfen (**Buff3**).
- keinen Temperaturen höher als 100 °C ausgesetzt werden, welche durch unzulässige Mineralumwandlungen die Rückhaltefunktion des Bentonits gefährden würden (**Buff4**).
- einen Quelldruck von mehr als $0,2 \text{ MPa}$ besitzen, sodass ein Absinken des Behälters ausgeschlossen wird und der Behälter nicht in Kontakt mit dem Wirtsgestein steht (**Buff5**).
- und einen maximalen Quelldruck von 15 MPa aufweisen sowie keinen Temperaturen kleiner als -4 °C ausgesetzt sein, sodass ein Gefrieren von Lösungen im Buffer ausgeschlossen wird und keine unzulässigen Drücke auf den Behälter einwirken (**Buff6**).

Der Bentonit als Versatzmaterial in den Einlagerungsstrecken soll eine hohe Dichte besitzen, die dem Quelldruck des Versatzes in den Einlagerungsbohrlöchern entgegenwirkt, sodass die Sicherheitsfunktionen des Bentonits in den Einlagerungsbohrlöchern nicht unzulässig beeinflusst werden, d. h. seine sicherheitsrelevanten Eigenschaften nicht

verloren gehen (**BF1**). Durch eine hohe Dichte des Verfüllmaterials wird verhindert, dass sich der Bentonitbuffer bei Aufsättigung unzulässig in vertikale Richtung ausdehnt und damit seine niedrige hydraulische Durchlässigkeit nach Buff2 nicht erfüllen würde und infolgedessen Can1 verletzt wird.

Das umgebende Kristallingestein, d. h. die Geosphäre, soll chemisch günstige Bedingungen aufweisen, sodass ein Lösungszutritt in den Buffer zu keinen unzulässigen Mineralumwandlungen führt und keine unzulässig hohe Korrosion am Behälter auftritt (R1a-f), den Radionuklidtransport minimieren (R2a-b), mechanisch stabil sein (R3a-c) und günstige thermische Bedingungen liefern (R4a-b). Chemisch günstige Bedingungen sind gegeben, wenn

- anaerobe Bedingungen vorliegen, d. h. eine aerobe Korrosion ausgeschlossen werden kann (**R1a**),
- der Salz- bzw. TDS-Gehalt limitiert ist (**R1b**),
- die Ionenstärke begrenzt ist (**R1c**),
- besonders die Konzentrationen von HS^- , H_2 , CH_4 , C_{org} , K^+ und Fe gering sind, sodass Korrosion und mikrobielle Aktivitäten minimiert werden (**R1d**),
- der pH-Wert kleiner 11 ist (**R1e**),
- und gleichzeitig größer als 4 ist und der Chloridgehalt kleiner 2 M ist, sodass eine Chlorid gesteuerte Korrosion der Behälter verhindert wird (**R1f**).

Der Radionuklidtransport im Wirtsgestein soll minimiert werden durch

- eine geringe Transmissivität in Klüften, verbunden mit einem geringen hydraulischen Gradienten (**R2a**),
- sowie die Behinderung des Transports durch den Buffer in das Wirtsgestein (Diese Anforderung kann durch einen intakten Buffer mit einem formschlüssigen Kontakt mit dem Ringraum des Einlagerungsbohrloches (Bufferquelldruck) und eine begrenzte Kluftweite derjenigen Klüfte, die das Einlagerungsbohrloch schneiden, gewährleistet werden.) (**R2b**).

Eine günstige mechanische Stabilität des Kristallingesteins wird erreicht, indem

- der hydrostatische Druck des Grundwassers und somit der isostatische Druck auf die Behälter möglichst gering ist (**R3a**),
- Scherbewegungen am Einlagerungsbohrloch kleiner als 0,05 m sind (**R3b**),
- und die Geschwindigkeit der Scherbewegungen am Einlagerungsbohrloch bei seismischer Aktivität kleiner als 1 m/s sind (**R3c**).

Günstige thermische Bedingungen liegen vor, wenn

- die Gebirgstemperatur im Nachweiszeitraum nicht geringer als -4 °C ist, sodass ein Gefrieren des Bentonits in den Einlagerungslöchern verhindert wird (**R4a**),
- und idealerweise größer als 0 °C ist, sodass die Gültigkeit, der bei den geomechanischen Berechnungen verwendeten Materialgesetzen eingehalten wird (**R4b**).

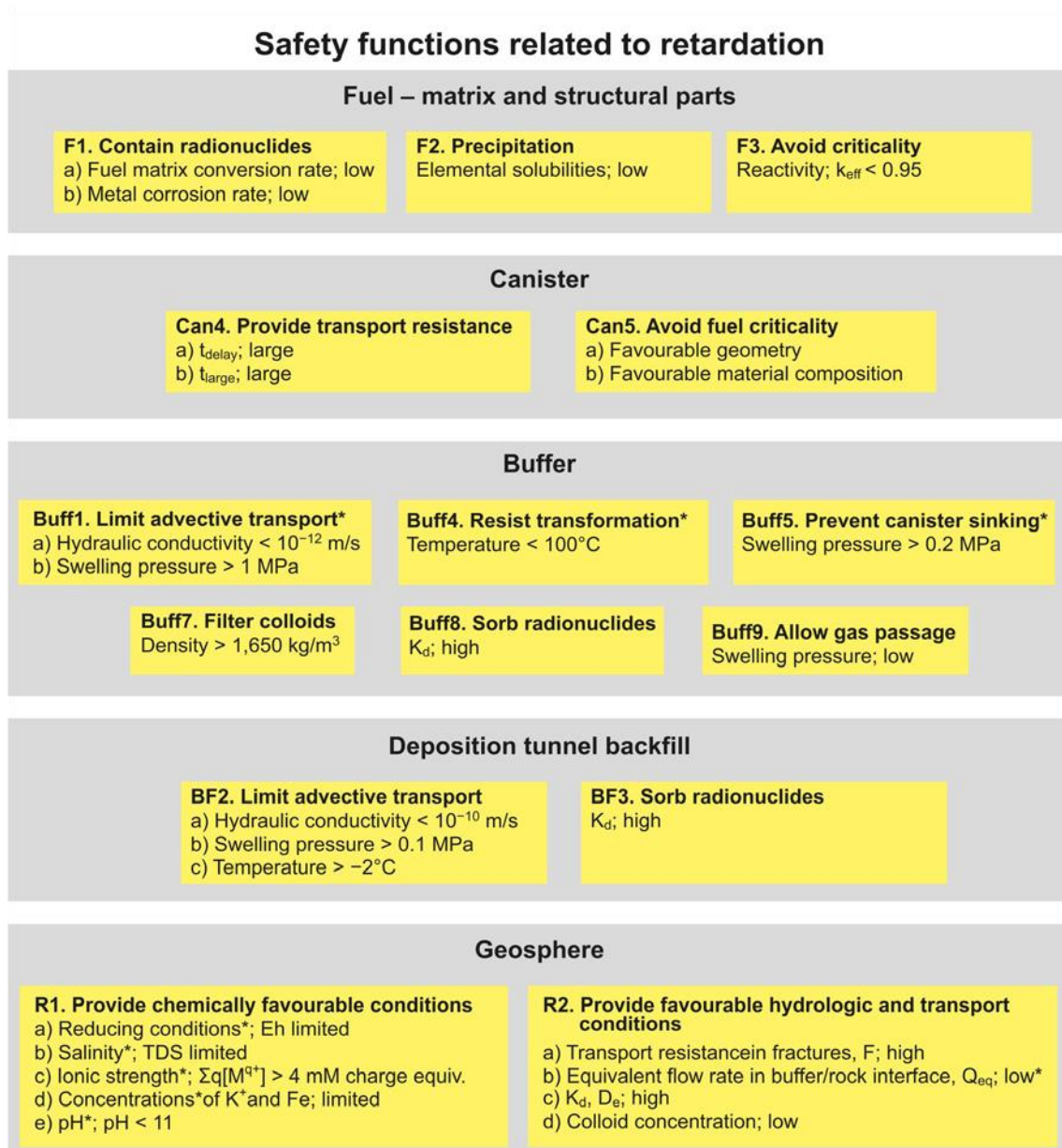


Abb. 3.4 Sicherheitsfunktionen des KBS-3-Konzeptes bezogen auf die Rückhaltung der Radionuklide /SKB 11b/

Rückhaltende Sicherheitsfunktionen

Im Folgenden werden die rückhaltenden SF aus /SKB 11b/, welche in der Abb. 3.4 zusammengefasst sind, beschrieben. Die Sicherheitsfunktionen werden folgenden Komponenten zugewiesen: Abfall („fuel – matrix and structural parts“), Behälter („canister“), Buffer („buffer“) und Versatz der Bohrlochüberfahrungsstrecke („deposition tunnel backfill“). Es werden hier nur die Sicherheitsfunktionen beschrieben, die noch nicht zuvor bei den einschlusswirksamen Sicherheitsfunktionen beschrieben worden sind.

In /SKB 11b/ werden der Abfallmatrix verschiedene Sicherheitsfunktionen zugewiesen:

- Eine rückhaltende Funktion (**F1**), die durch die Matrixstruktur des Abfalls und die hohe Stabilität unter Endlagerbedingungen begründet wird. Auch die strukturellen Metallteile der Brennelemente enthalten Radionuklide. Die Korrosionsrate dieser Metalle ist daher auch ein Indikator für die Sicherheitsfunktion F1 des Abfalls. In /SKB 11b/ werden jedoch keine Angaben gemacht, welche Werte die Mobilisierungsrate bzw. Korrosionsrate aufweisen muss, um als „gering“ zu gelten.
- Eine löslichkeitsbegrenzende Funktion (**F2**); diese Funktion bezieht sich auf die Löslichkeit der Radionuklide. Viele der Radionuklide haben eine begrenzte Löslichkeit im Grundwasser, wodurch die Radionuklidfreisetzung nach einem Behälterausfall begrenzt wird.
- Eine rekritikalitätsverhindernde Funktion (**F3**). Die Abfalleigenschaften und die geometrische Anordnung in dem Behälter sollten so sein, dass Kritikalität ausgeschlossen wird, wenn Wasser in einen defekten Behälter eindringt. Die Brennstoffreaktivität sollte niedrig sein und der Multiplikationsfaktor für den Brennstoff in einem mit Wasser gefüllten Behälter sollte 0,95 einschließlich Ungewissheiten nicht überschreiten.

Dem Abfallbehälter werden in /SKB 11b/ zusätzlich zwei weitere Sicherheitsfunktionen zugewiesen:

- Erhalt des Transportwiderstands (**Can4**); Diese Funktion bezieht sich auf die rückhaltende Funktion des Behälters (z. B. durch Sorption am korrodierten Behältermaterial), wenn der Behälter versagt und Lösung zugetreten ist. Hierfür werden charakteristische Zeiten definiert, die als Indikatoren dienen können /FIS 17/.
- Vermeidung Brennstoffkritikalität (**Can5**); Materialzusammensetzung und Behältergeometrie müssen so beschaffen sein, dass sie nicht zur Kritikalität beitragen.

Dem Buffer werden nach /SKB 11b/ neben den bereits unter den einschlusswirksamen Sicherheitsfunktionen beschriebenen Funktionen weitere Funktionen zugeordnet:

- Filterung von Kolloiden (**Buff7**); als Anforderung soll der Buffer eine Dichte größer 1.650 kg/m^3 aufweisen, damit der Transport von Brennstoffkolloiden aus einem defekten Behälter durch den Buffer verhindert wird.
- Sorptionsfähigkeit (**Buff8**); beschränkt bzw. verzögert potentiellen Radionuklidtransport wesentlich, geeignete Indikatoren sind Sorptions- und Diffusionskoeffizienten.
- Gasdurchlassfähigkeit (**Buff9**); der Buffer soll ermöglichen, dass potentiell im beschädigten Behälter gebildetes Gas entweichen kann, damit keine integritätsgefährdenden Gasdrücke entstehen.

Dem Versatz (Bentonit) in den Bohrlochüberfahrungsstrecken werden laut /SKB 11b/ weitere Sicherheitsfunktionen zugewiesen:

- Beschränkung des advektiven Transports (**BF2**); im Bentonitversatz sollen sich keine bevorzugten Wegsamkeiten für Radionuklide ausbilden, hierfür soll der Quelldruck des Versatzes größer $0,1 \text{ MPa}$ sein und die hydraulische Leitfähigkeit soll kleiner 10^{-10} m/s sein.
- Sorptionsfähigkeit (**BF3**); ist analog zu **Buff8** zu verstehen.

Die rückhaltenden Sicherheitsfunktionen für die Geosphäre sind bereits bei den einschließenden Sicherheitsfunktionen beschrieben worden.

3.5 Komponentenmodell und zugeordnete Sicherheitsfunktionen

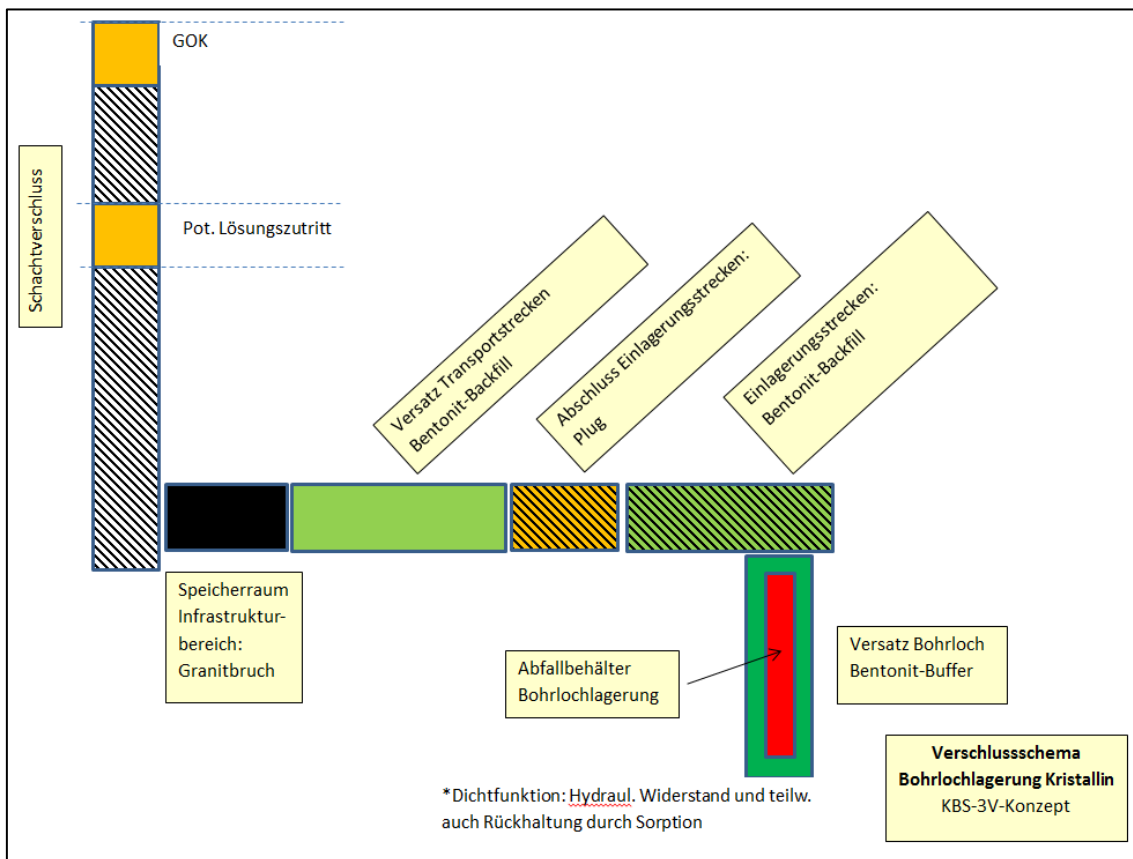


Abb. 3.5 Schematische Darstellung des schwedischen KBS-3-Konzeptes durch lo-
kations- und funktionsbezogenen Komponenten nach /FIS 17/

Um die Komponenten des KBS-3V(ertikal)-Konzeptes zu identifizieren und diese den Sicherheitsfunktionen zuzuordnen, wird auf das im Vorhaben VerSi-II /FIS 17/ entwickelte Komponentenmodell zurückgegriffen, dessen Komponenten nicht nur lokationsbezogen, sondern auch funktionsbezogen sind. Funktionsbezogen bedeutet, dass die entsprechenden Komponenten entsprechend ihrer wesentlichen Sicherheitsfunktion (Dichtwirkung, geomechanische Stabilisierung, Speicherung etc.) definiert wurden. Durch die entsprechende Auswahl und Anordnung dieser modularen Komponenten können grundsätzlich verschiedene Verschlussysteme für unterschiedliche Wirtsgesteine und Einlagerungsarten beschrieben und im Anschluss verglichen werden. Die Komponenten des KSB-3V-Konzeptes werden dann wie in Abb. 3.5 gezeigt gruppiert. In Tab. 3.1 sind die Komponenten aus der Abbildung näher erläutert und den entsprechenden Sicherheitsfunktionen zugeordnet.

Für ein konkretes Endlagerkonzept im Kristallingestein in Deutschland müssen die Komponenten ggfls. modifiziert werden.

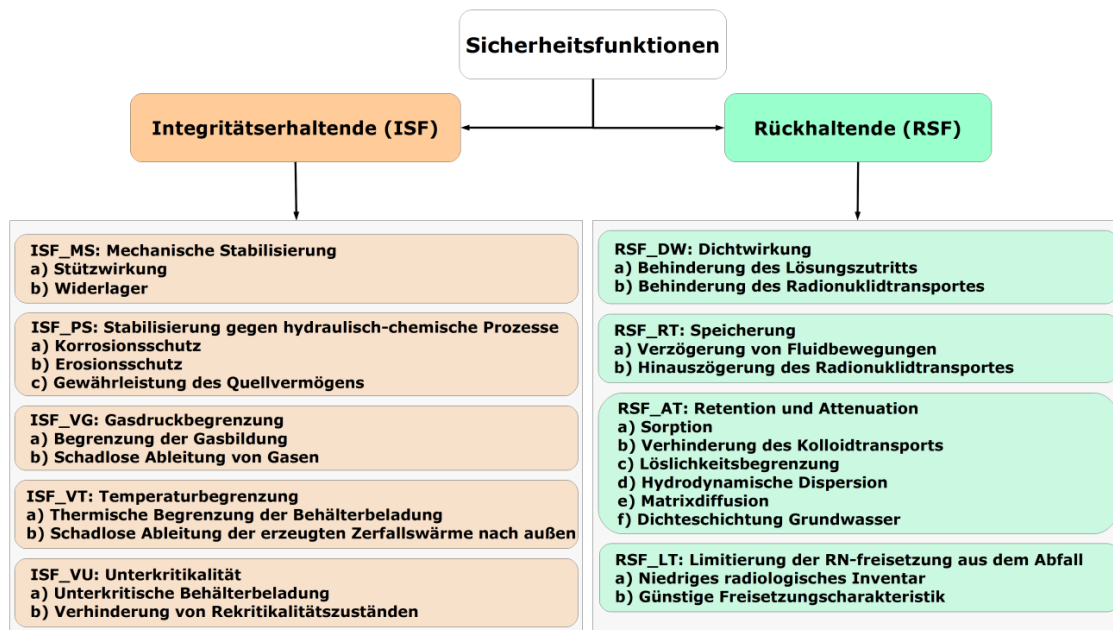


Abb. 3.6 Kategorisierung der Sicherheitsfunktionen im Vorhaben VerSi-II

Logik und Bezeichnung der Sicherheitsfunktionen im KBS-3-Konzept und in der VerSi-Methode sind verschieden: Nach /FIS 17/ werden als einschlusswirksame Sicherheitsfunktionen seitens SKB solche Sicherheitsfunktionen verstanden, die sämtlich darauf abzielen, die Behälterintegrität zu gewährleisten. Entsprechend der VerSi-Nomenklatur wären dies vor allem integritätserhaltende Sicherheitsfunktionen (ISF). Rückhaltende Sicherheitsfunktionen, die den Radionuklidtransport begrenzen sollen, werden seitens der SKB nur für den Fall von Freisetzungen infolge von Behälterdefekten betrachtet. Dagegen werden in VerSi als rückhaltende Sicherheitsfunktionen (RSF) solche bezeichnet, die entweder den Einschluss von Radionukliden (z. B. in einem intakten Behälter) bewirken oder auf eine Verzögerung des Radionuklidtransportes abzielen. In der in diesem Bericht durchgeführten Analyse werden die Bezeichnungen der Sicherheitsfunktionen aus VerSi-II /FIS 17/ genutzt. Diese sind in Abb. 3.6 gezeigt. Die Zuordnung der einzelnen Sicherheitsfunktionen und Komponenten des KBS-3-Konzeptes zu diesen beiden Klassen erfolgt im Detail in /FIS 17/, Kapitel 3.4.2, und ist für die RSF in Tab. 3.2 und für die ISF in Tab. 3.3 zusammengefasst. Diese Zuordnung wird in der Ableitung von Integritätsindikatoren in Kapitel 4.3 genutzt.

Tab. 3.1 Erläuterung der Verschlusskomponenten und deren Schutzfunktion

	Komponente	Wesentliche Sicherheitsfunktionen	Erläuterung	Beispiele
	Abfallbehälter	Dichtwirkung, untergeordnet mechanische Stabilisierung (Stützfunktion) des Abfallprodukts	Alle Abfallbehälter dienen der Handhabbarkeit der Abfälle und dem Strahlenschutz während der Betriebsphase. In der Nachbetriebsphase bestehen wirtsgesteinsabhängig sehr unterschiedliche Anforderungen an die Behälterstandzeit im Sinne der Dichtwirkung. Diese hängen von der Einschlusswirksamkeit des Wirtsgesteins und der Geschwindigkeit der Entwicklung der Dichtwirkung des abfallnahen Versatzes ab.	KBS-3-Cu-Behälter, Pollux-Behälter, Mosaik-Behälter, BSK-3- Kokillen
	Abfallnaher Versatz	Dichtwirkung, im kristallinen Wirtsgestein auch Stabilisierung (mechanisch, chemisch)	Starke Wechselwirkung mit Abfallbehälter: Die erforderliche Behälterstandzeit richtet sich nach der für die vollständige Versatzkompaktion/Quellung benötigte Zeitdauer (Salz, Tonstein). Im KBS-3-Konzept bestehen Anforderungen bezüglich Korrosionsschutz und mechanischem Schutz (z.B. gegenüber Scherbewegungen).	Salzgrus, Bentonit, Bentonit-Gemische mit Sand oder Wirtsgestein
	Geotechnisches Bauwerk	Dichtwirkung	Abdichtungsbauwerk, welches aufgrund einer geringen Gesamtporosität den Zutritt von Lösungen zu den Abfällen be- bzw. verhindern soll	Schachtnahe Streckenabdichtungen, Dichtelemente und Widerlager im Schacht; Pfropfen in Strecken, Plugs (Bentonit, Salzbeton, Mg-Beton)
	Geotechnisches Bauwerk	Dichtwirkung und mechanische Stabilisierung (Widerlager)	Wie oben, jedoch zusätzliche sicherheitskonzeptionell vorgeschriebene Widerlagerfunktion	
	Streckenversatz	Mechanische Stabilisierung (Stützfunktion)	Das Einbringen von Versatz in aufgefahrene Hohlräume, soll der Gebirgskonvergenz entgegenwirken und damit eine Auflockerung des Wirtsgesteins verhindern	Salzgrus, Bentonit
	Streckenversatz	Mechanische Stabilisierung (Widerlager)	Das Einbringen von Versatz in aufgefahrene Hohlräume, soll gerichteten Drücken, wie Fluid- oder Quelldrücken entgegenwirken	Salzgrus, Bentonit
	Speicherraum	Speicherung (Zutritts- und Transportverzögerung)	Nicht kompaktierbarer Versatz bietet ein Speichervolumen (Porenraum) zur Aufnahme von Fluiden	Basalt-Serpentinit-Schotter
	Widerlager	Mechanische Stabilisierung (Widerlager)	Ohne Dichtwirkung	Widerlager im Schachtverschluss, z.B. VSG Plugs
	Reaktiver Versatz	Stabilisierung gegen hydraulisch-chemische Prozesse	Im Regelfall geht es darum, günstige chemische Bedingungen, z.B. durch Pufferung des pH-Wertes, zu erzeugen, die entweder freisetzungs- oder korrosionsmindernd wirken.	Opferschichten im Schachtverschluss (VSG)

Tab. 3.2 Komponentenspezifische rückhaltende Sicherheitsfunktionen (RSF) für Kristallingestein (KBS-3-Konzept) nach /FIS 17/

Sicherheitsfunktion		Komponente (KBS-3-Komponente in Klammern)
RSF_DW – Dichtwirkung	a) Behinderung des Lösungszutritts	Abfallbehälter (Canister)
		Abfallnaher Versatz (Buffer)
		Streckenversatz (Tunnel Backfill)
		Geotechnisches Bauwerk (Plugs)
		Einlagerungsbereich (Geosphere)
	b) Behinderung des Radionuklidtransportes	Abfallbehälter (Canister)
		Abfallnaher Versatz (Buffer)
		Streckenversatz (Tunnel Backfill)
		Geotechnisches Bauwerk (Plugs)
		Einlagerungsbereich (Geosphere)
RSF_RT - Speicherung	a) Verzögerung einer Fluidbewegung	Speicherraum (z. B. crushed granite) Nicht im KBS-3-Konzept gefordert
	b) Hinauszögerung des Radionuklidtransportes	Speicherraum (z. B. crushed granite) Nicht im KBS-3-Konzept gefordert

Tab. 3.2 Komponentenspezifische rückhaltende Sicherheitsfunktionen (RSF) für Kristallingestein (KBS-3-Konzept) nach /FIS 17/ (Forts.)

Sicherheitsfunktion		Komponente (KBS-3-Komponente in Klammern)
RSF_AT – Retention und Attenuation	a) Sorption	Abfallbehälter (Canister)
		Abfallnaher Versatz (Buffer)
		Streckenversatz (Tunnel Backfill)
		Geotechnisches Bauwerk (Plugs)
		Einlagerungsbereich (Geosphere)
	b) Verhinderung des Kolloid- transports	Abfallnaher Versatz (Buffer)
		Streckenversatz (Tunnel Backfill)
		Geotechnisches Bauwerk (Plugs)
		Einlagerungsbereich (Geosphere)
	c) Löslichkeitsbegrenzung	Abfallbehälter (Canister)
		Abfallnaher Versatz (Buffer)
		Streckenversatz (Tunnel Backfill)
		Geotechnisches Bauwerk (Plugs)
		Einlagerungsbereich (Geosphere)
	d) Hydrodynamische Disper- sion	Streckenversatz (Tunnel Backfill)
		Einlagerungsbereich (Geosphere)
	e) Matrixdiffusion	Einlagerungsbereich (Geosphere)
	f) Dichteschichtung Grundwas- ser	Deckgebirge
RSF_LT	b) Günstige Freisetzungsscha- rakteristik	Abfallmatrix

Tab. 3.3 Komponentenspezifische integritätserhaltende Sicherheitsfunktionen (ISF) für Kristallingestein (KBS-3-Konzept) nach /FIS 17/

Sicherheitsfunktion		Komponente (KBS-3-Komponente in Klammern)
ISF_MS – Mechanische Stabilisierung	a) Aufnahme isostatischen Drucks	Abfallnaher Versatz (Buffer)
		Streckenversatz (Tunnel Backfill)
		Geotechnisches Bauwerk (Plugs)
		Einlagerungsbereich (Geosphere)
	b) Aufnahme gerichteten Drucks	Abfall (Abfallmatrix)
		Abfallbehälter (Canister)
		Abfallnaher Versatz (Buffer)
		Streckenversatz (Tunnel Backfill)
		Geotechnisches Bauwerk (Plugs)
ISF_PS – Stabilisierung gegen hydraulisch-chemische Prozesse	a) Schutz vor Degradation	Abfall (Abfallmatrix)
		Abfallbehälter (Canister)
		Abfallnaher Versatz (Buffer)
		Streckenversatz (Tunnel Backfill)
		Geotechnisches Bauwerk (Plugs)
		Einlagerungsbereich (Geosphere)
	b) Schutz vor Subrosion und Erosion	Abfallnaher Versatz (Buffer)
		Streckenversatz (Tunnel Backfill)
		Einlagerungsbereich (Geosphere)
	c) Gewährleistung des Quellvermögens	Abfallnaher Versatz (Buffer)
		Streckenversatz (Tunnel Backfill)
		Geotechnisches Bauwerk (Plugs)
		Einlagerungsbereich (Geosphere)

Tab. 3.3 Komponentenspezifische integritätserhaltende Sicherheitsfunktionen (ISF) für Kristallingestein (KBS-3-Konzept) nach /FIS 17/ (Forts.)

Sicherheitsfunktion		Komponente (KBS-3-Komponente in Klammern)
ISF_VG - Gasdruckbegrenzung	a) Begrenzung der Gasbildung	Abfall (Abfallmatrix)
		Abfallbehälter (Canister)
		Abfallnaher Versatz (Buffer)
		Streckenversatz (Tunnel Backfill)
		Einlagerungsbereich (Gesosphere)
	b) Schadloose Ableitung von Gasen	Abfallnaher Versatz (Buffer)
		Streckenversatz (Tunnel Backfill)
		Einlagerungsbereich (Gesosphere)
ISF_VT - Temperaturbegrenzung	b) Schadloose Ableitung der erzeugten Zerfallswärme nach außen	Abfallbehälter (Canister)
		Abfallnaher Versatz (Buffer)
		Streckenversatz (Tunnel Backfill)
		Geotechnisches Bauwerk (Plugs)
		Einlagerungsbereich (Geosphere)
ISF_VU - Un-terkritikalität	b) Verhinderung von Rekritikalitätszuständen	Abfall (Abfallmatrix)
		Abfallbehälter (Canister)
		Abfallnaher Versatz (Buffer)
		Streckenversatz (Tunnel Backfill)

3.6 Integritätsgefährdende Prozesse und Zustände

Im Folgenden werden THMCB-Prozesse aufgezeigt, die grundsätzlich die Integrität eines Endlagersystems im Kristallingestein gefährden können. Diese berücksichtigen insbesondere Erkenntnisse der schwedischen und finnischen Sicherheitsbetrachtungen, da diese beiden Länder im Auswahlverfahren für ein Endlager im Wirtsgestein Kristallingestein bereits weit fortgeschritten sind. Falls zutreffend wird der Bezug zwischen den integritätsgefährdenden Prozessen und Kriterien im StandAG aufgezeigt. Hierzu gehört eine Betrachtung, inwiefern die identifizierten integritätsgefährdenden Prozesse bereits durch die Kriterien im StandAG abgedeckt erscheinen und somit keine gesonderten Kriterien in anderen Regelwerken diese Prozesse zwingend erfassen müssen.

Bergbauinduzierte Effekte

Eine bergbaubedingte Auflockerungszone (häufig als EDZ abgekürzt, d. h. **Excavation Disturbed Zone**) kann als potentieller Migrationspfad für Fluide und Radionuklide in flüssiger und gasförmiger Phase dienen /AND 05/. Nach /BMU 10/ ist die sog. Auflockerungszone (für das Dilatanzkriterium, s. Kap. 3.2.1) von der Integritätsbetrachtung ausgenommen. Eine bergbaubedingte Auflockerungszone im Kristallingestein kann den Grundwasserzufluss infolge eines vernetzten Kluftnetzwerkes im Umfeld der Behälter unzulässig erhöhen und somit den Transport durch das Wirtsgestein grundsätzlich beschleunigen /SKB 11b/, /POS 13/.

Die **Auflockerungszone** ist im Kristallingestein aufgrund seiner mechanischen Eigenschaften allerdings auf eine **wenige Zentimeter** mächtige konturnahe Zone beschränkt /SKB 11c/. Diese Aussage basiert auf Messungen in vertikalen, mit Einlagerungsbohrlöchern vergleichbaren Bohrungen im Kristallingestein /SKB 11c/, /MUS 10/. In Abhängigkeit der aufzufahrenden Struktur (Schacht, Einlagerungsstrecke, Einlagerungsbohrloch) werden spezifische Bohrverfahren eingesetzt, um das Ausmaß der EDZ und die Konnektivität zum Kluftnetzwerk im Wirtsgestein zu minimieren /POS 13/.

Am stärksten ausgeprägt ist die Auflockerungszone an dem First der Einlagerungsstrecken /POS 13/. Dort beträgt im zitierten Beispiel die **Transmissivität** bis zu $10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$, in anderen Teilen lediglich $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ /MUS 10/. /KOS 09/, /HAR 10/ folgern im zitierten Beispiel aus der starken räumlichen Begrenzung (max. 30 cm Eindringtiefe) und der geringen Transmissivität der Auflockerungszone, dass deren Auswirkung auf den Grundwasserzufluss gering ist.

Mögliche **Abschalungen im Kristallingestein** können infolge der Auffahrung in der Nähe der Einlagerungslöcher auftreten /SKB 11c/. Dies würde im schwedischen Sicherheitskonzept im ungünstigsten Fall ca. 100 – 200 von 6.000 Einlagerungsbohrlöchern betreffen /BEU 16/. Die Auswirkung dieser Abschalungen wird als vernachlässigbar angesehen, da die Stärke der Abschalungen lediglich ca. 5 cm beträgt. Weiterhin sind diese leicht detektierbar, sodass die Ungewissheiten bzgl. des Vorkommens von Abschalungen gering sind /SKB 11c/. In /SKB 11c/ wurde weiterhin gezeigt, dass die Erhöhung der hydraulischen Durchlässigkeit im Nahbereich der Barrieren infolge von Abschalungen keinen Einfluss auf die Darcy-Geschwindigkeit d. h. das Strömungsregime im Gebirge hat.

Im Rahmen des finnischen Sicherheitskonzeptes wurden Messungen der Seismizität infolge einer Auffahrung von Einlagerungsbohrlöchern im Wirtsgestein Kristallingestein gemessen /POS 12b/. Es wurde eine geringe Seismizität mit Magnituden von 0,2 bis 0,9 festgestellt /SAA 08/, /SAA 11/, die darüber hinaus auch räumlich stark begrenzt sind /SAA 12/. Sicherheitsrelevante bergbauinduzierte Erdbeben durch die Reaktivierung von Klüften während der Auffahrung werden ausgeschlossen, da die in den schwedischen Sicherheitsfunktionen der Behälter vorgeschriebene maximale Magnitude von fünf nicht erreicht wird /SKB 11c/.

Bergbauinduzierte Effekte (Auflockerungszone, Abschalungen, Reaktivierung von Kluftnetzwerken) können im Kristallingestein in Integritätsbetrachtungen einfließen, wenn eine Vernetzung zwischen einem bestehenden Kluftnetzwerk im Wirtsgestein und den entstehenden Rissen und Abschalungen in der Nähe des Endlagerbergwerkes denkbar oder möglich ist. Aufgrund der mechanischen Eigenschaften von kristallinen Gesteinen wie z. B. Granit ist ein geringes räumliches Ausmaß der bergbaubedingten Auflockerungszone zu erwarten, sodass eine Vernetzung von Fluidwegsamkeiten i. d. R. leicht ausgeschlossen werden können sollte.

Erosionsprozesse

Der Standort für ein Endlager für hoch radioaktive Abfälle muss einen ausreichend großen Abstand zur Tagesoberfläche besitzen, sodass ein Schutz vor einer flächenhaften Erosion gegeben /BOD 08/ und die Einschlusswirkung der geologischen Barriere sichergestellt ist /GOG 88/. Ausgehend vom geforderten Betrachtungszeitraum und der Hebungsrates am spezifischen Standort wird die Tiefenlage bestimmt, sodass das Endlager

in einer tiefen geologischen Formation im Betrachtungszeitraum nicht an die Erdoberfläche gelangt /ENSI 10/.

Im Standortauswahlgesetz /STA 17/ ist dies durch die Mindestanforderung „minimale Tiefe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“ sowie durch das Ausschlusskriterium „großräumige Vertikalbewegungen“ gesetzlich geregelt.

Gasbildung

Im schwedischen Langzeitsicherheitsnachweis /SKB 11b/ stellt die äußere Umhüllung der Kupferbehälter die Hauptbarriere dar, deren Deckel gasdicht verschweißt werden. Um eine Radionuklidmigration in der Gasphase (insbesondere ^{14}C und ^{222}Rn) zu verhindern, muss die Korrosionsbeständigkeit und die mechanische Beständigkeit der Kupferbehälter gewährleistet werden /SKB 11c/. Lösungen mit niedrigen pH-Werten wirken korrosionsbeschleunigend und es kann Wasserstoffgas entstehen /SZA 07/. Die Anwesenheit von Wasserstoffgas im Nahfeld der Kupferbehälter wiederum besitzt einen Einfluss auf die Korrosionsrate von Kupfer; dies ist derzeit Bestandteil von Forschungsarbeiten /POS 13/, /BEC 11/. Zusammenfassend schildert /POS 13/ allerdings, dass die auftretenden Prozesse innerhalb von einer Million Jahre zu einer maximalen Korrosion von aufsummiert weniger als fünf Millimeter führen /SKB 10/. Derzeit werden die Korrosionsprozesse im Rahmen eines Reviews detailliert ausgewertet, wodurch ggfls. eine Anpassung der Bewertung von Korrosionsprozessen an Kupferbehältern erfolgen kann /STR 19/.

Gasfreisetzungen aus dem Kupferbehälter bzw. Wasserstoffproduktion können zu einer Druckerhöhung im umgebenden Bentonit führen /POS 12a/, die ab einem experimentell ermittelten Grenzwert von 20 MPa Risse im Bentonit erzeugen, sodass Gas entweichen kann /HAR 03/. Sobald der Gasdruck unter ca. 10 MPa fällt, greift wieder der Selbstabdichtungseffekt des Bentonits und eine Gasmigration durch den Bentonit ist nur noch durch Diffusion möglich /SKB 11c/.

Da der Behälter (in Zusammenwirkung mit weiteren geotechnischen Barrieren wie dem Buffer aus Bentonit) im schwedisch/finnischen Konzept wesentliche Barrierefunktionen einnimmt, muss über diese der Einschluss über den Nachweiszeitraum gewährleistet sein. Hierzu gehört, dass die Korrosionsbeständigkeit aufgezeigt wird. Da z. B. Wasserstoffgas korrosionsfördernd wirkt und ein Druckaufbau durch Gasbildungen den Buffer beschädigen kann, sollte die Gasbildung in Integritätsbetrachtungen im Kristallingestein

als Prozess detaillierter betrachtet werden und kann einen wesentlichen Aspekt beim Integritätsnachweis im Kristallingestein darstellen. Ein Kriterium zur zulässigen Korrosion der Behälter könnte im Integritätsnachweis mittels Indikatoren zur Beschaffenheit des Grundwassers Anwendung finden. Gleichzeitig würde ein Druckaufbau infolge von Gasbildungen bei Korrosion eines Behälters im Fluidruckkriterium berücksichtigt.

Geochemisches Milieu

In einem Sicherheitskonzept im Kristallingestein stellt der Behälter eine wesentliche Barriere dar. Daher ist seine Korrosionsbeständigkeit relevant, die vom vorliegenden und dem sich ggfls. zeitlich veränderlichen geochemischen Milieu abhängig ist.

Im schwedischen Sicherheitskonzept wird als günstig ein geochemisches Milieu angesehen, dass eine geringe Korrosionsrate des Behältermaterials begünstigt, die Zersetzungsrate der Abfallmatrix gering hält und eine geringe Löslichkeit sowie ein effektives Rückhaltevermögen für freigesetzte Radionuklide begünstigt /SKI 93/.

Konkret darf unbeeinflusstes Grundwasser in der Endlagertiefe keinen gelösten Sauerstoff beinhalten, damit ein Korrosionsschutz und somit die Behälterintegrität nach dem Kriterium Can1 gewährleistet ist /AND 00/. Die Abwesenheit von Sauerstoff wird durch ein negatives Redoxpotential und der Anwesenheit von Fe(II) sowie von Sulfiden angezeigt /AND 00/. Der pH-Wert soll im Bereich von 6 – 10 liegen, eine niedrige Konzentration von organischen Verbindungen ($\text{DOC} < 20 \text{ mg}$) ist wie eine niedrige Ammonium-, Radon- und Radiumkonzentration und ein gewisser Gehalt an freien Ca^{2+} - und Mg^{2+} -Ionen ($> 4 \text{ mg/l}$) vorteilhaft /AND 00/. Insgesamt darf die Summe der gelösten Feststoffe in der Endlagertiefe 100 g/l nicht überschreiten /AND 00/.

Nach dem Kriterium R1e dürfen keine extremen alkalinen Bedingungen ($\text{pH} > 11$) vorliegen, um eine geringe Korrosion der Behälter zu gewährleisten. Eine Verletzung des Kriteriums R1e infolge eines Zutrittes von glazialen Schmelzwasser wird ausgeschlossen /SKB 11d/. Einzig könnten die Wechselwirkungen zwischen Grundwasser und dem in Klüften und Deformationszonen verpressten Zement im Endlagerbereich alkalische Verhältnisse erzeugen. Lokal kann der pH-Wert temporär auf 9 ansteigen, was nicht zu einer Verletzung des Kriteriums R1e führt /SKB 11d/.

Nach dem Kriterium R1f dürfen für die Korrosionsbeständigkeit der Behälter keine sauren Verhältnisse ($\text{pH} < 4$) vorliegen und die Chloridkonzentration nicht größer als 2 mol/l

sein /SKB 11d/. Eine Absenkung des pH-Wertes bis hin zu sauren Verhältnissen durch den Zutritt von Schmelzwasser wird, wie auch die Erhöhung der Chloridkonzentration, ausgeschlossen /SKB 11d/.

Nach dem finnischen Sicherheitskonzept soll das geochemische Milieu so geschaffen sein, dass die technischen Barrieren ihre spezifischen Eigenschaften möglichst lange behalten /POS 99/. Hierzu gehört Sauerstofffreiheit, ein niedriges Redoxpotential, ein neutraler pH-Wert sowie geringe Sulfidkonzentrationen /POS 99/. Der Salzgehalt des Grundwassers soll unterhalb von 100 g/l liegen /POS 99/. In Anlehnung an glaziale Schmelzwässer wird ein pH-Wert von 5,8 bis 9 in Abhängigkeit ihres für Schmelzwässer typischen Karbonatgehaltes bei einer Infiltration in das Endlager hinein erwartet /PAS 10/.

Im StandAG /STA 17/ stellt das „Kriterium zur Bewertung der hydrochemischen Verhältnisse“ ein Abwägungskriterium bzgl. des geochemischen Milieus dar. Als günstig werden ein chemisches Gleichgewicht zwischen dem Wirtsgestein im Bereich des ewG und dem darin enthaltenen tiefen Grundwasser, neutrale bis leicht alkalische Bedingungen, ein anoxisch-reduzierendes Milieu, ein möglichst geringer Gehalt an Kolloiden und Komplexbildnern sowie eine geringe Karbonatkonzentration angesehen. Ein Integritätskriterium, welches das geochemische Milieu (in Abhängigkeit von Wirtsgestein und den Materialeigenschaften und -zusammensetzungen der geotechnischen und technischen Barrieren) berücksichtigt, existiert in der aktuellen Fassung der Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ nicht. Ein solches wird z. B. in /NAV 19/ vorgeschlagen und nach /ESK 19/ ist ein günstiges geochemisches Milieu zum Erhalt der Einschlusswirksamkeit des Barrierensystems eines Endlagers (im Wirtsgestein Kristallingestein) wesentlich.

Glaziale Einflüsse

Durch glaziale Einflüsse kann die Temperatur in einem Endlager absinken und Scherbewegungen können geotechnische Barrieren unzulässig beeinflussen. Das Auftreten von Permafrost und glazialen Bedingungen wird z. B. in Schweden im Betrachtungszeitraum von 100.000 Jahren als wahrscheinlich angesehen /SKB 11d/. Daher wurden im schwedischen Langzeitsicherheitsnachweis verschiedene klimatische Entwicklungen berücksichtigt und thermische Rechnungen durchgeführt, um die glazialen Auswirkungen und hiermit im Zusammenhang stehende Verletzung der Behälterintegritätskriterien Buff6 (Gefrieren des Bentonits als Buffer unterhalb einer Grenztemperatur von -4 °C) und R4b (Geomechanische Stabilität bzgl. Scherbewegungen bis zu einer

Grenztemperatur von 0 °C) zu untersuchen /SKB 11d/. Eine Abkühlung bis auf 0 °C wurde in einer Teufe von bis zu 259 m und bis auf -4 °C in einer Teufe von bis zu 150 m berechnet /SKB 11d/. Diese beiden Isothermen liegen deutlich oberhalb des geplanten Einlagerungsbereiches (457 m bis 470 m Teufe), sodass in Schweden eine Verletzung der Behälterintegrität infolge einer Abkühlung, unter Berücksichtigung einer Unsicherheitsanalyse, ausgeschlossen wird /SKB 11d/. Auch mit pessimistischen Annahmen z. B. bzgl. Lufttemperatur, Vegetation, Schneebedeckung und Wärmeleitfähigkeit des Wirtsgesteins liegt die 4 °C-Isotherme lediglich in einer Teufe von 316 m /SKB 11d/.

Durch die zusätzliche Eisauflast während einer Eiszeit erhöht sich die isostatische Belastung der Behälter, sodass der Grenzwert – hier von 45 Mpa – überschritten werden kann /SKB 11d/. Nach Berechnungen von /SKB 11d/ wird die Behälterintegrität durch die zusätzliche isostatische Belastung nicht verletzt, da maximal eine isostatische Belastung von 43,5 MPa erreicht wird (4,5 MPa durch hydrostatischen Druck, max. 13 MPa durch Quelldruck des Bentonits als Buffer, max. 26 MPa durch Eisauflasten) /SKB 11d/.

Infolge einer Eiszeit wird sich das geomechanische Spannungsfeld, das Grundwasserpotential und dessen chemische Zusammensetzung (Verdünnungseffekt durch Schmelzwasser) verändern /POS 12b/. Nach /POS 13/ kann die glaziale Erosion eine Auswirkung auf den Schachtverschluss und die Strecken am oberen Bereich des Endlagers am Standort Olkiluoto in einer Teufe von 200 m bis 300 m haben. Allerdings wird die Barrierewirksamkeit nicht beeinträchtigt, da der Verschluss sehr mächtig ist und die Erosionsrate selbst in einer Eiszeit sehr gering ist. Mehrere Millionen Jahre seien notwendig, damit der Verschluss vollständig erodiert sei /POS 13/.

Das StandAG /STA 17/ fordert für ein Endlager mit der Mindestanforderung „minimale Teufe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs“, dass die Oberfläche des ewG mindestens 300 Meter unter der Geländeoberfläche liegen muss. Hiermit soll insbesondere eine eiszeitlich bedingte intensive Erosion ausgeschlossen werden, deren direkte oder indirekte Auswirkungen zur Beeinträchtigung der Integrität führen könnte.

Grundwasserströmung

Das Auftreten einer advektiv bedingten Grundwasserströmung ist ein unerwünschter Prozess, da hierdurch vermehrt Lösung zur Korrosion und als potentiell Transportmittel für Radionuklide zur Verfügung stehen. Um einen advektiven Grundwasserfluss im Kristallingestein zu vermeiden, soll das Wirtsgestein daher eine möglichst geringe

Anzahl an Großklüften /SKI 93/ besitzen und bevorzugt nur eine geringe Anzahl von kleineren lokal begrenzten Kluftzonen mit einer geringen Kluftdichte aufweisen /AND 00/.

In Schweden soll der hydraulische Durchlässigkeitsbeiwert des Grundgebirges im Einlagerungsbereich im Wesentlichen geringer als 10^{-8} m/s sein und die Transmissivität unter 10^{-5} m²/s liegen /AND 00/. Der Mindestabstand des Endlagers zu großen lokalen Kluftzonen soll 10 m, zu regionalen Kluftzonen 100 m betragen /SKB 94/. Im StandAG /STA 17/ wird über die Mindestanforderung „Gebirgsdurchlässigkeit“ für den ewG geregelt, dass die hydraulische Durchlässigkeit maximal 10^{-10} m/s betragen darf.

Kolloidbildende Prozesse

Die Bildung von Kolloiden, d. h. ein Abtrag von Partikeln, kann zum Masseverlust von tonhaltigen Endlagerbarrieren in einem entsprechenden Endlagerkonzept im Kristallinegestein und zu einem beschleunigten Transport von Radionukliden an den Kolloiden führen.

Der Einfluss eines Temperaturanstiegs von 4 °C bzw. 22 °C auf 70 °C auf die Stabilität der Montmorillonit-Kolloide hängt stark vom pH-Wert und – im naheneutralen pH-Bereich – von der Ionenstärke der Lösung ab: bei pH von 3 bis 8,3 wird die Stabilität erheblich reduziert (im naheneutralen pH-Bereich bei einer Ionenstärke von ca. $> 0,007$ M), während sie bei pH von 10 bis 11 erhöht wird /GAR 09/. Diese differenzierte Abhängigkeit vom pH-Wert und von der Ionenstärke der Lösung hängt damit zusammen, dass die Kolloid-Aggregation zwar durch die sich mit der Temperatur erhöhende Zusammenstoßhäufigkeit der Montmorillonit-Kolloide begünstigt wird, sie aber durch die sich mit der Temperatur ebenfalls erhöhenden Kolloidabstoßung unterdrückt wird.

Mikrobielle Prozesse

Mikrobielle Prozesse können zur Zersetzung von Organika (z. B. Zersetzung von Polyethylen /WOL 12/), Gasbildung, Korrosion und zur Mineralumwandlung beitragen. Daher wird angestrebt die Bildung und Population von Mikroorganismen soweit wie möglich und sicherheitstechnisch nötig einzuschränken bzw. zu verhindern. Mikroorganismen sind nur in einem spezifischen Temperaturbereich überlebensfähig bzw. aktiv. Daher könnten Temperaturen außerhalb des spezifischen Temperaturbereichs sicherheitstechnisch vorteilhaft in einem Endlager sein. Welche konkreten Mikroorganismen in einem

Endlager vorkommen und welche Auswirkungen die mikrobiellen Aktivitäten auf die Sicherheit eines Endlagers haben hängt sowohl von der Zusammensetzung der eingelagerten Abfälle als auch von den jeweiligen chemischen und physikalischen Randbedingungen des Endlagers ab.

Die Vielzahl an Mikroorganismen wird anhand ihrer unterschiedlichsten Lebensbedingungen unterschieden, insbesondere auf ihre Temperatur- und Salinitätsverträglichkeit /SPA 00/, /ORE 11/. Sogenannte thermotolerante Mikroorganismen besitzen eine optimale Wachstumsrate für Temperaturen von bis zu 50 °C, thermophile Mikroorganismen für über 50 °C. Das Wachstum von hyperthermophilen Mikroorganismen wird bis zu 90 °C begünstigt. Nach /BOW 11/ werden Mikroorganismen als halophil bezeichnet, wenn ihre optimale Wachstumsrate in über 1,7 M NaCl-Lösungen (> 10 % Gewichtsprozent, > 350 g/l) auftritt.

Der Einfluss von Mikroorganismen auf Prozesse wie Gasbildung, Korrosion, Abbau organischer Materialien usw. sollte in einem Endlager- und Sicherheitskonzept nach dem jeweiligen Kenntnisstand berücksichtigt werden, wenn Temperaturen von ca. 122 °C unterschritten werden /BRA 19/.

Die Verfügbarkeit des Porenraums ist für diese mikrobiellen Prozesse maßgeblich. Um diese in einem geplanten Endlager zu verringern, wurde beispielsweise von der für die Entsorgung der radioaktiven Abfälle in Kanada verantwortlichen Organisation (Nuclear Waste Management Organisation, NWMO) der Einsatz eines Bentonit-Sand-Gemisches als Referenz-Nahfeldbarriere zugunsten eines reinen Bentonits verworfen, da der Porenraum so deutlich reduziert werden kann /NUC 05/.

Im schwedischen Langzeitsicherheitsnachweis soll durch eine hohe Dichte des Bentonits als Buffer (1.950 und 2.050 kg/m³) das Vordringen von Mikroorganismen zum Behälter und somit eine mikrobiell induzierte beschleunigte Korrosion verhindert werden (Sicherheitsfunktion Buff2) /SKB 11b/. Wenn es vereinzelt zu übermäßigem Verlust von Bentonit kommt, kann eine verstärkte mikrobielle Aktivität von sulfatreduzierenden Bakterien mit einhergehender Korrosion der Behälteroberfläche nicht grundsätzlich vollständig ausgeschlossen werden /SKB 11d/.

Neotektonische Aktivität

Nach den schwedischen Anforderungen soll ein Standort für ein Endlager für hoch radioaktive Abfälle nicht in der Nähe von regionalen Scherzonen errichtet werden /AND 00/.

Es dürfen jedoch „tektonische Linsen“ in der Nähe von regionalen plastischen Abscherzonen existieren, in denen das Grundgebirge homogen und relativ unberührt ist /AND 00/. Die anfänglichen Gebirgsbeanspruchungen sowie Festigkeits- und Verformungseigenschaften sollen in der geplanten Endlagertiefe nicht von denen üblicherweise im schwedischen Grundgebirge vorkommenden Bedingungen abweichen /AND 00/.

Im Standortauswahlgesetz /STA 17/ ist dies durch das Ausschlusskriterium „aktive Störungszonen“ geregelt, das einen abdeckenden Sicherheitsabstand zwischen dem Endlagerbereich und geologisch aktiven Störungszonen sicherstellt.

Seismische Aktivität

Ein Standort für hoch radioaktive Abfälle sollte sich in einer geologisch stabilen Region befinden /AKE 02/. Hierzu gehört neben einer geringen tektonischen und vulkanischen Aktivität auch eine geringe seismische Aktivität. Das StandAG /STA 17/ fordert daher nach § 22 (4), dass ein Endlagerstandort als nicht geeignet gilt, wenn die örtliche seismische Gefährdung größer ist als in Regionen der Erdbebenzone 1 nach /DIN 11/.

Nach /SKB 09/ wird eine seismische Gefährdung des Endlagers ausgeschlossen, wenn Bohrlöcher nicht näher als 100 m zu einer Störungszone mit einer Länge von 3 km liegen. Dies ist mit infolge eines Erdbebens auftretenden Scherbewegungen begründet. Aufgrund des Designs der Behälter dürfen die Scherbewegungen 5 cm nicht übersteigen. Solche Scherbewegungen können nach /SKB 11c/ am Standort Forsmark durch Erdbeben nur an den über 3 km langen Störungszonen bei einer Unterschreitung des Sicherheitsabstandes von 100 m entstehen.

Im finnischen Langzeitsicherheitsnachweis /POS 13/ wird die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Erdbeben für den Nachweiszeitraum in Abhängigkeit ihrer Intensität nach /GUT 44/ auf Basis von historischen Erdbebenereignissen angegeben. /SAA 12/ haben eine solche Analyse für den Standort Olkiluoto durchgeführt und nach /POS 13/ übereinstimmende Ergebnisse zu vergleichbaren Studien erzielt /BÖD 06/, /LAP 99/, /HOR 05/, /FEN 06/, /SAA 00/.

Nach /SAA 00/ werden auf der Datenbasis von /AHJ 84/ keine Erdbeben im finnischen kristallinen Grundgebirge mit einer Magnitude größer als fünf erwartet. Aufgrund der im Vergleich zum Betrachtungszeitraum von 100.000 Jahre kurzen Aufzeichnungsdauer

historischer Erdbebenereignisse kann das Auftreten stärkerer Erdbeben allerdings nicht vollständig ausgeschlossen werden /POS 13/. Deformationen und Störungszonen in der Nähe des Standortes Olkiluoto zeigen, dass Erdbeben mit einer Magnitude von größer als sechs nicht aufgetreten sind /SAA 12/.

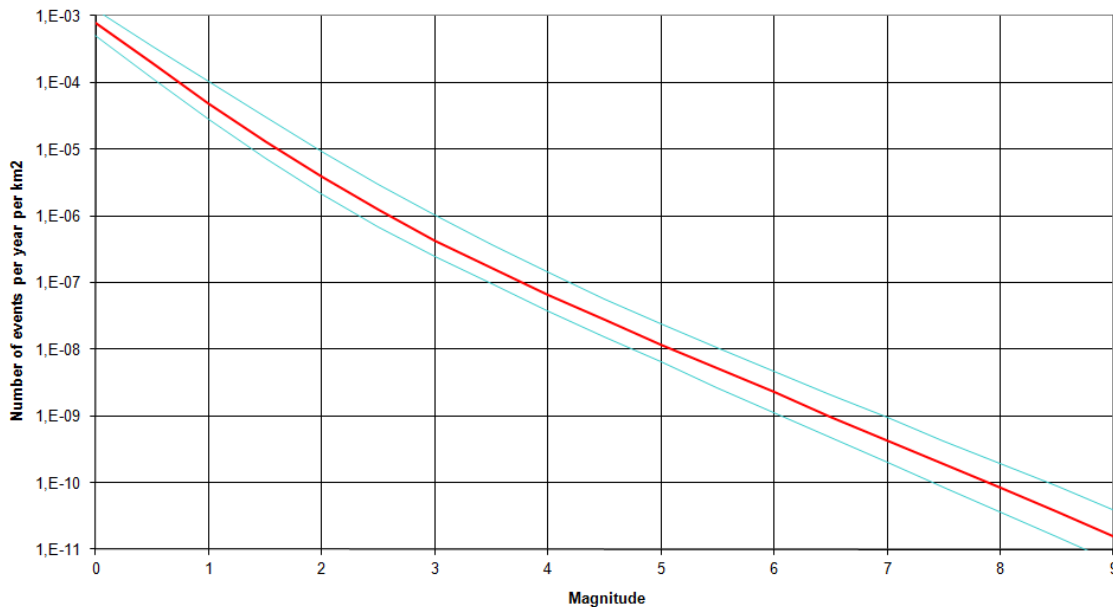


Abb. 3.7 Anzahl an Erdbeben pro Jahr am Standort Olkiluoto in Abhängigkeit ihrer Magnitude /SAA 12/

Thermisch induzierte Expansion und Rissbildung

Die Einlagerung von Behältern mit hoch radioaktiven Abfällen in ein Endlagerbergwerk führt aufgrund des radioaktiven Zerfalls zu einem Wärmeeintrag in das Endlager und somit auch zu einer Temperaturerhöhung des Wirtsgesteins und seiner geologischen Umgebung gegenüber der ursprünglichen Gebirgstemperatur. Die sich einstellende Temperatur in einem Endlager ist dabei u. a. abhängig von der Beladung der Behälter, der Wärmeleistung der Abfälle (nach Abbrand und Zwischenlagerung), der Lagerung, den thermischen Materialeigenschaften der geotechnischen Barrieren sowie des Wirtsgesteins und dem sich einstellenden Temperaturgradienten zur geologischen Umgebung. Hierdurch können thermisch induzierte Prozesse ablaufen, die sich auf die Behälterintegrität in einem Endlager für hoch radioaktive Abfälle im Kristallingestein auswirken und somit Sicherheitsfunktionen unzulässig beeinflussen können.

/SKB 11d/ berücksichtigt hierbei fünf unterschiedliche wesentliche Prozesse, welche die Behälterintegrität gefährden könnten:

- Thermisch induzierte Reaktivierung von Klüften im Nahfeld, einschließlich thermischer Expansion des Wirtsgesteines, welche die Sicherheitsfunktionen R3bc und R2ab (Mechanische Stabilität der Geosphäre gegenüber Scherbewegungen) beeinträchtigen kann.
- Thermisch induzierte Reaktivierung von Klüften im Fernfeld, welche die Transmissivität und infolgedessen die Transportgeschwindigkeit erhöhen können und zu einer Verletzung des Kriteriums R2a führen können.
- Reaktivierung von Klüften durch die Spreizung des Mittelozeanischen Rückens, welche die mechanische Stabilität der Bohrlöcher nach Kriterium R3bc beeinflussen kann.
- Klüftungen des Gesteins, welche einen Einfluss auf die geometrische Anordnung der Bohrlöcher haben (Kriterium Buff1) und eine Fluidmigration zwischen Buffer und Gestein haben kann (Kriterium R2a).
- Deformation infolge von Kriechprozessen, welche die Geometrie der Bohrlöcher beeinflussen und die Sicherheitskriterien Buff3 und Buff6 beeinflussen. Kriechen wird hier als Begriff auch in Fällen verwendet, in denen die mechanische Belastung nicht konstant ist über die Zeit, z. B. wenn Scherspannungen schrittweise zur Entlastung führen.

Im schwedischen Sicherheitskonzept werden Kupferbehälter mit hoch radioaktiven Abfällen in Bohrlöchern im Kristallingestein eingelagert und von einer Bentonitbarriere umgeben. Die Abstände zwischen den Bohrlöchern werden so gewählt, dass die Temperatur im Bentonit als Buffer 100 °C nicht übersteigt. Eine höhere Temperatur würde die mechanischen Eigenschaften des Bentonits verändern, die ab ca. 150 °C signifikant werden /SKB 11c/. Berechnungen des Temperaturfeldes zeigen, dass maximal Temperaturen von 95 °C an der Behälteraußenseite erreicht werden (Abb. 3.8) und die Gesteinstemperatur um maximal 28 °C nach 50 Jahren nach simultaner Einlagerung ansteigt /HÖK 10/ (Abb. 3.9).

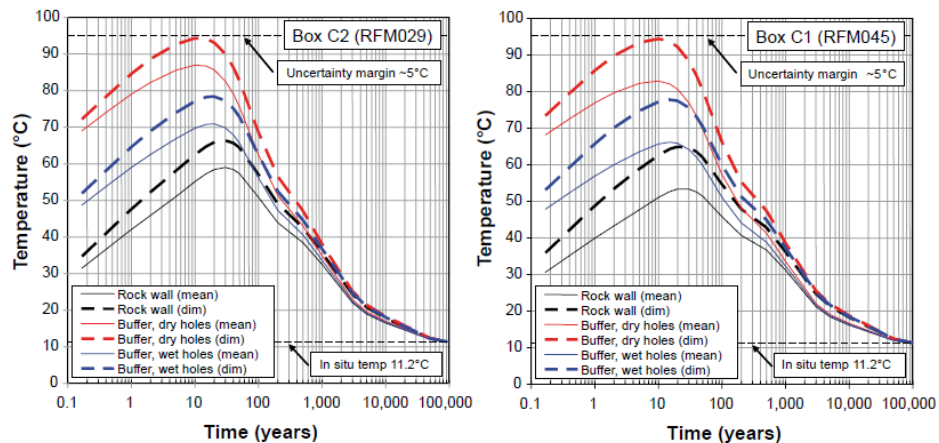


Abb. 3.8 Zeitlicher Verlauf der Temperatur an der Behälteraußenseite für zwei unterschiedliche Bohrlöcher für verschiedene Rechenfälle /HÖK 10/

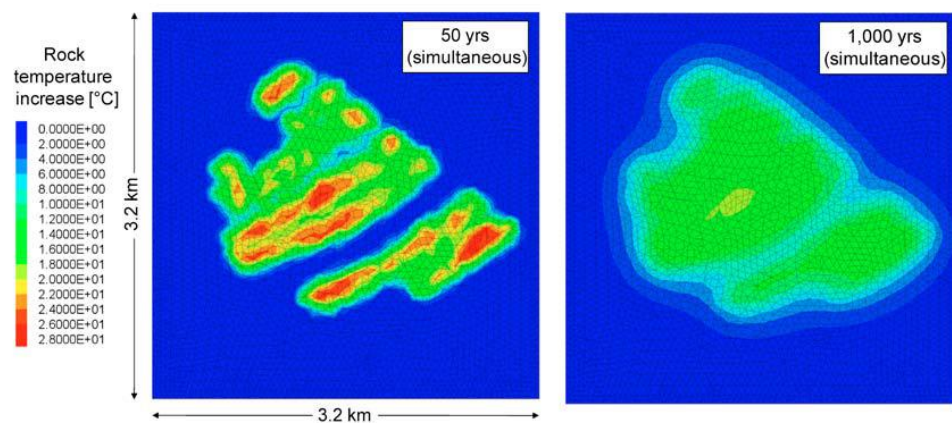


Abb. 3.9 Temperaturerhöhung des Wirtsgesteins am Standort Forsmark, 50 Jahre (links) und 1.000 Jahre nach simultaner Einlagerung der hoch radioaktiven Abfälle (rechts) /HÖK 10/

Der thermische Ausdehnungskoeffizient beschreibt die relative Volumenausdehnung eines Stoffes bei Temperaturänderung und ist eine materialspezifische Proportionalitätskonstante zwischen der Temperaturänderung und der relativen Längenänderung eines Festkörpers. Dies bedeutet, dass ein Feststoff mit einem hohen thermischen Ausdehnungskoeffizienten sich bei gleicher Abmessung und Temperaturdifferenz stärker ausdehnt als ein Feststoff mit einem niedrigen thermischen Ausdehnungskoeffizienten. Deswegen wird ein niedriger thermischer Ausdehnungskoeffizient als günstig angesehen, da geringere thermisch induzierte Spannungen im Gebirge auftreten. Nach /AND 00/ soll

dieser zwischen 10^{-6} bis 10^{-5} 1/K liegen und sich im Endlagerbereich nicht merklich unterscheiden.

Die Wärmeleitfähigkeit beschreibt die Wärmemenge, die pro Zeiteinheit durch einen definierten Querschnitt einer Platte bei einer bestimmten Temperaturdifferenz an beiden Enden übertragen werden kann. Eine hohe Wärmeleitfähigkeit begünstigt eine Ableitung des Wärmeeintrages durch die Einlagerung von wärmeentwickelnden radioaktiven Abfällen und reduziert dadurch eine Gebirgsaufheizung. Daher wird eine hohe Wärmeleitfähigkeit als Materialeigenschaft für das Wirtsgestein als günstig eingestuft. Die Wärmeleitfähigkeit sollte nach /AND 00/ im Kristallingestein größer sein als $2,5 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ und geothermische Anomalien sollen gemieden werden. Die geogene Temperatur des Grundgebirges in der Endlagertiefe sollte weniger als $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ betragen /AND 00/.

In /SKB 11c/ werden thermisch induzierte Abschalungen des Kristallingesteins an den Oberflächen der Einlagerungsbohrlöcher genannt, welche grundsätzlich Fließwege für Fluide darstellen und lokal (in Klüften, die ein Einlagerungsbohrloch schneiden) die Transmissivität um bis zu einer Größenordnung erhöhen können /HÖK 10/. Dieser Prozess gilt als wahrscheinlich, allerdings wirken diesem die Bentonit-Pellets zwischen Buffer und Felswand durch ihre hohe Quellfähigkeit entgegen und minimieren die Transmissivität der betroffenen Zone dadurch, dass die Abschalungen in ihrer Position gehalten werden oder Unterdrücken gar ganz das Auftreten von Abschalungen /SKB 11c/. Daher wird das Auftreten deutlich erhöhter Transmissivitäten infolge thermisch induzierter Abschalungen als weniger wahrscheinlich angesehen, ist allerdings dennoch in den Sicherheitsanalysen berücksichtigt /SKB 11c/.

Durch den Wärmeeintrag sind thermisch induzierte Rissbildungen, Klufreaktivierungen bzw. -neubildungen und Abschalungen im Wirtsgestein möglich. Da diese eine bevorzugte Fluidwegsamkeit darstellen können, sollten thermisch induzierte Prozesse in einer Integritätsbetrachtung sowohl für das Wirtsgestein als auch für geotechnische Barrieren mit einer wesentlichen Barrierenwirkung berücksichtigt werden. Die Temperaturentwicklung im Endlager sollte die Einschlusswirkung der geotechnischen Barrieren nicht erheblich beeinträchtigen.

Neben den hier skizzierten geomechanischen Prozessen sind auch insbesondere temperaturabhängige Mineralumwandlungen im tonhaltigen Buffern z. B. aus Bentonit in einer Integritätsbetrachtung zu berücksichtigen. Für die Auswirkungen des Wärme-

eintrages auf tonhaltige Barrieren wird auf die Berichte /MEL 16/, /BRA 19/ verwiesen. Falls die Eigenschaften von tonhaltigen Kluftverfüllungen eine sicherheitsrelevante Barrierefunktion (z. B. Sorption) in einem Endlagerkonzept besitzen, sollten diese ebenfalls in einer Integritätsbetrachtung berücksichtigt werden.

Fazit

Im Standortauswahlverfahren in Deutschland werden grundsätzlich Standorte ausgeschlossen, bei denen eine unzulässig hohe tektonische und vulkanische Aktivität zu erwarten ist, da Erdbeben mit einer hohen Magnitude oder vulkanische Aktivität grundsätzlich für ein Endlager, unabhängig vom Wirtsgestein, integritätsgefährdend sind.

Bergbauinduzierte Effekte, wie eine möglicherweise permeable Auflockerungszone durch das Auffahren eines Grubengebäudes für ein Endlager, werden in allen gesichteten internationalen Sicherheitskonzepten betrachtet. Im Kristallingestein werden Permeabilitätsmessungen der Auflockerungszone und die Reichweite dieser bestimmt, sodass ein möglicher Einfluss der Auflockerungszone auf die Langzeitsicherheit eines Endlagers beurteilt werden kann. Im Kristallingestein wurden besonders die Auswirkungen einer bergbauinduzierten seismischen Aktivität und die mögliche Reaktivierung von bestehenden Kluftsystemen ermittelt, die in den Beispielen allerdings keinen Einfluss auf die Barriernwirksamkeit zeigten. Insbesondere der Nachweis der Reichweite einer Auflockerungszone und deren spezifisches Kluftnetzwerk erscheinen für den Integritätserhalt relevant. Die Gewährleistung der Integrität kann nur unter Berücksichtigung der geomechanischen Eigenschaften des Wirtsgesteins, dem vorliegenden geomechanischen Spannungsfeld und der verwendeten Bergbautechnik standort- und sicherheitskonzeptspezifisch beurteilt werden.

Die Gasentwicklung bzw. -bildung in einem Endlager ist von einer Vielzahl an Komponenten wie dem Abfallinventar, den Behältern, den geotechnischen Barrieren, dem Wirtsgestein und dem geochemischen Milieu abhängig. Besonders die chemischen Reaktionen in Abhängigkeit des geochemischen Milieus und der Korrosionsbeständigkeit der Behälter und geotechnischen Barrieren im Nahfeld ist für eine mögliche Gasbildung von Relevanz. Durch Gasbildung können bei der Überschreitung eines spezifischen Druckes Wegsamkeiten für Fluide entstehen und als potentieller Migrationspfad für Radionuklide dienen. Daher werden z. B. im schwedischen Sicherheitskonzept Kriterien zur Korrosionsbeständigkeit der Behälter und ein maximal zulässiger Druckaufbau im Bentonit als geotechnische Barriere festgelegt.

Für tonreiche geotechnische Barrieren (Bentonit) in Sicherheitskonzepten im Wirtsgestein Kristallingestein ist eine Begrenzung des Wärmeeintrages für die Integrität der Barriere von Relevanz. Hierdurch sollen thermisch induzierte Mineralumwandlungen und die Bildung von Wegsamkeiten für Fluide ausgeschlossen werden, welche die Integrität der Barriere gefährden und dazu beitragen können, dass Migrationspfade für Radionuklide entstehen. Durch eine Temperaturerhöhung können Wassermoleküle aus den Zwischenschichten der quellfähigen Tonminerale in den Porenraum migrieren und somit den sicherheitsrelevanten Quelldruck verringern und gleichzeitig den Porendruck erhöhen. Grundsätzlich kann sich ein erhöhter Wärmeeintrag im Bentonit allerdings auch positiv auswirken, da die Expansions-Kontraktionsgrenze überschritten werden kann und mikrobielle Aktivitäten eingeschränkt werden, die zu einer beschleunigten Korrosion und Gasbildung führen können.

Kristallingestein weist häufig ein ausgeprägtes und komplexes Kluftnetzwerk auf, sodass Advektion als Transportprozess nicht ausgeschlossen werden kann. Daher wird in Sicherheitskonzepten im Wirtsgestein Kristallingestein quellfähiger Bentonit verwendet, um den advektiven Fluss im Nahfeld der Behälter zu begrenzen und eine Korrosion der Behälter sowie eine Radionuklidmigration zu verhindern.

4 Konkretisierung von Integritätskriterien für Kristallingestein

Im Folgenden werden u. a. aus den in Kapitel 3.6 ausgeführten integritätsgefährdenden Prozessen Integritätskriterien abgeleitet.

Um die Voraussetzungen für einen Integritätsnachweis im Sinne von Kapitel 2 für das Wirtsgestein Kristallingestein zu schaffen, werden zunächst die Komponenten identifiziert, die im Rahmen des Integritätsnachweises betrachtet werden müssen. Diesen Komponenten sind konzeptspezifische Sicherheitsfunktionen zugeordnet. Der Erhalt einiger dieser Sicherheitsfunktionen muss durch den Integritätsnachweis gezeigt werden, da es sich entweder um wesentliche rückhaltende oder um integritätserhaltende Sicherheitsfunktionen handelt. Der Erhalt dieser Sicherheitsfunktionen ist über geeignete Integritätsindikatoren nachzuweisen.

Für das KBS-3-Konzept sind diesbezüglich bereits verschiedene Indikatoren formuliert worden. Um diese zu verwenden, werden die KBS-3-Sicherheitsfunktionen auf die Sicherheitsfunktionen der VerSi-II-Methode abgebildet.

4.1 Ableitung von Integritätskriterien

Einige potentiell integritätsgefährdende Prozesse werden bereits im Rahmen des Standortauswahlverfahrens durch die Anwendung der Ausschlusskriterien und Mindestanforderungen des StandAG betrachtet. Durch die Ausschlusskriterien (§ 22 StandAG) werden u. a. großräumige Vertikalbewegungen, aktive Störungszonen, seismische Aktivität und vulkanische Aktivität ausgeschlossen. Die Mindestanforderungen (§ 23 StandAG) schließen (auch für Sicherheitskonzepte ohne ewG) eine Integritätsgefährdung durch eiszeitlich bedingte intensive Erosion aus. Integritätskriterien, die im Rahmen des Langzeitsicherheitsnachweises oder vorläufiger Sicherheitsanalysen angewendet werden, müssen die genannten integritätsgefährdenden Ursachen also nicht zwingend einschließen, sofern sie bei der Standortauswahl bereits in ausreichendem Tiefgang berücksichtigt wurden.

Gruppiert man die in Kapitel 3.6 dargelegten Ursachen für Integritätsgefährdungen und schließt die im StandAG genannten potenziell integritätsgefährdende Prozesse aus, so lässt sich eine Gliederung in mechanische, hydraulische, chemische und thermische Kriterien vornehmen:

- **Mechanisches Kriterium:** Die Integrität der wesentlichen technischen und geotechnischen Barrieren darf nicht aufgrund geomechanischer Einflüsse bzw. Zustände im Endlagerbergwerk oder im Einlagerungsbereich gefährdet werden.
- **Hydraulisches Kriterium:** Das Einschlussvermögen der wesentlichen technischen und geotechnischen Barrieren darf durch hydromechanische Prozesse (z. B. Erosion oder auch Rissbildungen durch hohe Flüssigkeits- oder Gasdrücke) nicht unzulässig beeinträchtigt werden.
- **Chemisches Kriterium:** Das Einschlussvermögen der wesentlichen technischen und geotechnischen Barrieren darf in Hinblick auf Korrosion durch chemische Prozesse nicht unzulässig beeinträchtigt werden.
- **Thermisches Kriterium:** Die Wärmeeinwirkung infolge des radioaktiven Zerfalls darf das Einschlussvermögen der technischen und geotechnischen Barrieren nicht unzulässig beeinträchtigen.

Wenn Abfallbehälter und Buffer im Integritätsnachweis betrachtet werden, ist zu berücksichtigen, dass es zu einem frühzeitigen Ausfall weniger Abfallbehälter und Buffer kommen kann, z. B. aufgrund von Fabrikationsfehlern. Die Integritätskriterien beziehen sich also nicht auf einzelne Behälter oder Buffer, sondern auf Behälter- und Buffergruppen. Es sollte also erst dann von einer unzulässigen Beeinträchtigung von Barrieren gesprochen werden, wenn ein bestimmter Anteil an Abfallbehältern oder Buffern geschädigt wird. Anders gesprochen sollte die Integrität lediglich für einen bestimmten Anteil der Abfallbehälter und Buffer gezeigt werden müssen. Dieser Anteil ist konzeptspezifisch zu benennen und zu begründen. Im Fall der Behälter kann, z. B. die Zahl der zulässigen Behälterausfälle zur Quantifizierung im Integritätsnachweis herangezogen werden.

Die oben genannten Kriterien spezifizieren weder die Barrieren, noch deren Sicherheitsfunktionen, deren Erhalt im Rahmen des Integritätsnachweises zu zeigen ist. Da Barrieren über mehrere Sicherheitsfunktionen verfügen können, ist zu erwarten, dass die Einhaltung der genannten Integritätskriterien über mehrere Indikatoren zu überprüfen ist. Dies wird Gegenstand des folgenden Kapitels sein.

4.2 Identifikation der zu betrachtenden Endlagerkomponenten

Zur Identifikation und Konkretisierung von Integritätskriterien für das Wirtsgestein Kristallingestein ist zunächst zu klären, für welche Endlagerkomponenten Integrität nachzuweisen ist.

Wie in Kapitel 2 dargestellt, ist nach /ESK 19/ zwischen „wesentlichen“ und „weiteren“ Barrieren zu unterscheiden, wobei die wesentlichen Barrieren diejenigen sind, auf denen die Einschlusswirkung maßgeblich beruht. Der Integritätsnachweis muss die wesentlichen Barrieren notwendigerweise umfassen; dies sind bei KBS-3-ähnlichen Konzepten mindestens der Behälter und der Buffer. Die außerhalb des Buffers liegenden Komponenten können keine wesentliche rückhaltende Sicherheitsfunktion besitzen, da der Buffer in direktem Kontakt zu Klüften des Wirtsgesteins stehen kann. Sie zählen daher nicht zu den wesentlichen Komponenten.

Die Integrität der wesentlichen Barrieren kann darüber hinaus von weiteren Barrieren abhängen, die keine wesentlichen rückhaltenden Sicherheitsfunktionen, sondern nur integritätserhaltende Sicherheitsfunktionen besitzen. Sie sind nach /ESK 19/ im Integritätsnachweis einzubeziehen:

„Es ist außerdem nachzuweisen, dass die für den Erhalt der Integrität relevanten Eigenschaften der weiteren Barrieren des Endlagersystems mindestens über den Zeitraum erhalten bleiben, der für den sicheren Einschluss der radioaktiven Abfälle nach dem Sicherheitskonzept erforderlich ist.“ /ESK 19/

Welche Komponenten dies betrifft, ist nicht klar umrissen, da Komponenten auch eine indirekte integritätserhaltende Wirkung auf die wesentlichen Barrieren haben können, wie etwa ein Widerlager, das die Integrität eines Bentonitversatzes der Einlagerungstrecken gewährleistet, der wiederum die Integrität des abfallnahen Buffers sichert. Die Entscheidung, welche Komponenten im Integritätsnachweis zu berücksichtigen sind, hängt also davon ab, bis zu welchem Grad man indirekte Wirkungen auf die wesentlichen Barrieren berücksichtigen möchte.

Nach /ESK 19/ ist für den Integritätsnachweis zumindest auch der Bereich des Gebirges zu betrachten, der die Integrität der wesentlichen Barrieren gewährleisten soll. Dies ist insbesondere die Gesteinsschicht unmittelbar um die Einlagerungshohlräume, die den

Behälter und das Buffermaterial vor äußeren Einwirkungen schützt /ESK 19/, mithin der Einlagerungsbereich im Sinne von § 2 StandAG /STA 17/.

Betrachtet man die Komponenten des KBS-3V-Konzeptes, so wäre nach Ansicht der Autoren die Integrität zumindest folgender Komponenten über die ihnen zugeordneten Sicherheitsfunktionen zu betrachten (vergl. Abb. 3.3 bis Abb. 3.5).

- Komponenten mit rückhaltenden Sicherheitsfunktionen:
 - Abfallmatrix (F1-F3)
 - Abfallbehälter (Can4-5)
 - Abfallnahe Versatz (Buff1, Buff4-5, Buff7-9)
- Komponenten mit integritätserhaltenden Sicherheitsfunktionen:
 - Abfallbehälter (Can1-3)
 - Abfallnahe Versatz (Bentonit-Buffer, Buff1-Buff6)
 - Streckenversatz der Einlagerungsstrecken (Bentonit, BF1)
 - Geosphäre (R1-R4)

Es ist möglich, dass die Integrität der Abfallbehälter für den gesamten Nachweiszeitraum von 1 Millionen Jahren nicht gezeigt bzw. nicht plausibel belegt werden kann. Zudem wird in der Regel auch im Rahmen der wahrscheinlichen Entwicklungen des Endlagersystems ein Ausfall einiger weniger Abfallbehälter unterstellt. In all diesen Fällen muss der abfallnahe Versatz (Buffer) die Rückhaltung der Radionuklide nach dem Versagen der Abfallbehälter gewährleisten. Der abfallnahe Versatz wird dann von einer weiteren zu einer wesentlichen Barriere. Für die Abfallbehälter muss ein Zeitpunkt definiert werden, bis zu dem ihre Integrität zu zeigen ist; dieser Zeitpunkt ergibt sich aus dem potentiellen Versagen der Behälter. Entsprechend muss die Integrität des abfallnahen Versatzes ab diesem Zeitpunkt gegeben sein. Integritätskriterien zur Überprüfung der Sicherheitsfunktionen des abfallnahen Versatzes wären dann spätestens ab diesem Zeitpunkt anzuwenden.

4.3 Ableitung von Integritätsindikatoren

Nach der Identifikation der für den Integritätsnachweis relevanten Endlagerkomponenten (siehe Kapitel 4.1) müssen die zu den Komponenten gehörenden rückhaltenden und integritätserhaltenden Sicherheitsfunktionen benannt werden. Diesen Sicherheitsfunktionen können wiederum Integritätsindikatoren (im Sinne der Begriffsbestimmung in Kapitel 1) zugeordnet werden, die den Erhalt der jeweiligen Sicherheitsfunktion überprüfen. Zur Benennung der in Frage kommenden Sicherheitsfunktionen bietet sich die Sicherheitsfunktions-Klassifizierung des VerSi-II-Vorhabens /FIS 17/ an, die wegen ihrer Allgemeinheit eine hohe Flexibilität aufweist (siehe Kapitel 3.5).

Da Komponenten und Sicherheitsfunktionen konzeptspezifisch sind, müssen zwangsläufig auch die Integritätsindikatoren konzeptspezifisch ermittelt werden. In den folgenden Betrachtungen wird davon ausgegangen, dass zukünftige Endlagerkonzepte für das Wirtsgestein Kristallingestein dem KBS-3-Konzept (siehe Kapitel 3.4) ähneln. Die zu den Sicherheitsfunktionen des KBS-3-Konzeptes gehörenden Integritätsindikatoren werden im Folgenden genutzt, um konkrete Beispiele für Integritätsindikatoren zu erhalten und zu bewerten, wie ein Integritätskriterium verletzt werden kann.

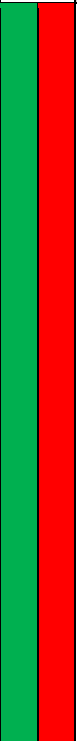
Tab. 4.1 zeigt das Ergebnis der beschriebenen Zuordnung. In der linken Spalte finden sich die Sicherheitsfunktionen nach VerSi-II /FIS 17/ für die in Kapitel 4.1 benannten Endlagerkomponenten. Die folgenden Spalte benennt die analoge Sicherheitsfunktion des KBS-3-Konzeptes, sofern sie dort ausgewiesen wurde. Die aufgeführten möglichen Indikatoren wurden unter Zuhilfenahme der Indikatoren für die Sicherheitsfunktionen des KBS-3-Konzeptes zusammengestellt. Sie sind zusammen mit dem Endlagerkonzept zu konkretisieren. Das nicht eingehaltene Integritätskriterium ist in der letzten Spalte aufgeführt. Die Zuordnungen der Tab. 4.1 wird im Folgenden für jede Komponente diskutiert.

Tab. 4.1 Übersicht über die Sicherheitsfunktionen des VerSi-II Konzepts und des KBS-3 Konzepts mit möglichen Bewertungsgrößen (Indikatoren), deren Überprüfung die Verletzung eines Integritätskriteriums zeigen kann

Grün markiert sind die weiteren, rot markiert die wesentlichen Barrieren. Eine konzeptspezifische Konkretisierung der Bewertungsgrößen ist notwendig, um die abgeleiteten Indikatoren im Nachweis anwenden zu können. Die Anwendung der abgeleiteten Indikatoren ist stark davon abhängig, wie gut die Bewertungsgrößen messtechnisch oder rechnerisch quantifiziert werden können und im Rahmen des gegebenen Endlagerkonzeptes aussagekräftig sind. Bei der Entwicklung weiterer Integritätsindikatoren ist dieser Aspekt immer zu berücksichtigen.

	Komponente	Wesentliche Sicherheitsfunktionen nach /FIS 17/ (Die Bezeichnungen finden sich im Text)	Beispiele nach KBS-3 /SKB 11a/	Mögliche Bewertungsgrößen (mit Beispielen aus dem KBS-3-Konzept)	Verletztes Integritätskriterium
56	Abfallmatrix	ISF_MS b) Aufnahme gerichteten Drucks		Festigkeitseigenschaften (Brennstäbe, Abfallmatrix)	Mechanisches Kriterium für den Abfallbehälter
		ISF_VU b) Verhinderung Rekritikalität	F3	Neutronenmultiplikationsfaktor (< 0.95)	Mechanisches Kriterium und Thermisches Kriterium für den Abfallbehälter
	Abfallbehälter	RSF_DW a) Behinderung Lösungszutritt		Festigkeitsüberschreitungen, Minimale Dicke der Behälterwandung, Korrosionsrate	Mechanisches oder Chemisches Kriterium für den Abfallbehälter
		RSF_AT a) Sorption	Can4	Sorptionskoeffizienten der Korrosionsprodukte	Chemisches Integritätskriterium
		RSF_AT c) Löslichkeitsbegrenzung		Löslichkeitsgrenzen	
		ISF_MS a) Aufnahme isostatischen Drucks	Can2	Festigkeiten (isostatische Belastung < 45 MPa)	Mechanisches Integritätskriterium
		ISF_MS b) Aufnahme gerichteten Drucks	Can3	Festigkeit bei Scherung (Geschwindigkeit < 1 m/s bei Bufferdichte von 2050 kg/m^3)	
		ISF_PS a) Schutz vor Degradation	Can1	Indikatoren des chemischen Milieus	Chemisches Integritätskriterium
		ISF_VT b) Ableitung Zerfallswärme		Temperatur in Behälternähe	Thermisches Kriterium für den Abfallbehälter und für den Versatz
		ISF_VU b) Verhinderung Rekritikalität	Can5	Neutronenmultiplikationsfaktor (< 0.95)	Mechanisches Kriterium und thermisches Kriterium für den Abfallbehälter und für den abfallnahen Versatz.

Tab. 4.1 Übersicht über die Sicherheitsfunktionen des VerSi-II Konzepts und des KBS-3 Konzepts mit möglichen Bewertungsgrößen (Indikatoren), deren Überprüfung die Verletzung eines Integritätskriteriums zeigen kann (Forts.)

	Komponente	Wesentliche Sicherheitsfunktionen nach /FIS 17/ (Die Bezeichnungen finden sich im Text)	Beispiele nach KBS-3 /SKB 11a/	Mögliche Bewertungsgrößen (mit Beispielen aus dem KBS-3-Konzept)	Verletztes Integritätskriterium
	Abfallnaher Versatz	RSF_AT b) Verhinderung Kolloidtransport	Buff7	Bentonitdichte ($> 1.650 \text{ kg/m}^3$), Porenradialverteilung, chemisches Milieu	Chemisches Kriterium, hydraulisches Kriterium
		RSF_AT a) Sorption	Buff8	Sorptions- und effektive Diffusionskoeffizienten	
		ISF_MS b) Aufnahme gerichteten Drucks	Buff5, Buff3	Quelldruck	Hydraulisches Kriterium, mechanisches Kriterium
		ISF_MS a) Aufnahme isostatischen Drucks	Buff6	Indikator für Kompaktionsverhalten; Quelldruck $< 15 \text{ MPa}$	Mechanisches Kriterium
		ISF_PS b) Schutz vor Subrosion und Erosion	Buff1	Strömungsgeschwindigkeiten	Hydraulisches Kriterium für den Versatz, Chemisches Kriterium für den Abfallbehälter; Mechanisches Kriterium für den Behälter
		ISF_PS c) Gewährleistung Quellvermögen		Quelldruck; Einspannung durch umgebende Komponenten; Salinitätsbedingungen	
		ISF_VG b) Schadlose Ableitung von Gasen	Buff9	Sättigungszustand, Gasmobilität, Gaseindringdruck	Mechanisches Kriterium
		ISF_VT b) Ableitung Zerfallswärme	Buff4	Temperatur ($< 100 \text{ °C}$)	Thermisches Kriterium
		Reduktion der mikrobiellen Aktivität (keine Entsprechung)	Buff2	Bentonitdichte, Temperaturfeld, Salinitätsbedingung	Chemisches Kriterium

Tab. 4.1 Übersicht über die Sicherheitsfunktionen des VerSi-II Konzepts und des KBS-3 Konzepts mit möglichen Bewertungsgrößen (Indikatoren), deren Überprüfung die Verletzung eines Integritätskriteriums zeigen kann (Forts.)

	Komponente	Wesentliche Sicherheitsfunktionen nach /FIS 17/ (Die Bezeichnungen finden sich im Text)	Beispiele nach KBS-3 /SKB 11a/	Mögliche Bewertungsgrößen (mit Beispielen aus dem KBS-3-Konzept)	Verletztes Integritätskriterium
58	Streckenversatz	ISF_PS c) Gewährleistung Quellvermögen	BF1	Hohe Dichte des Versatzes	Mechanisches Kriterium für den abfallnahen Versatz
		ISF_MS b) Aufnahme gerichteten Drucks	BF1	Dichte, Kompaktionsverhalten, Festigkeitsüberschreitungen	Mechanisches Kriterium für den abfallnahen Versatz
		ISF_PS b) Schutz vor Subrosion/ Erosion		Chemische Indikatoren der zutretenden Lösung; Maximale Strömungsgeschwindigkeit im Versatz	Chemisches Kriterium für den abfallnahen Versatz; Hydraulisches Kriterium für den Streckenversatz, in der Folge mechanisches Kriterium für den abfallnahen Versatz
	Geosphäre	ISF_PS b) Schutz vor Subrosion/ Erosion	R2	Kluftströmungsgeschwindigkeiten im angrenzenden Gebirge, Kluftnetzwerkcharakteristiken	Hydraulisches Kriterium des abfallnahen Versatzes
		ISF_MS a) Aufnahme gerichteten Drucks	R3	Festigkeitseigenschaften	Mechanisches Kriterium
		ISF_PS a) Schutz vor Degradation	R1	Günstige geochemische Bedingungen	Chemisches Kriterium des Buffers

4.3.1 Abfallmatrix

Im KBS-3-Konzept besitzen der Brennstoff bzw. die Abfallmatrix Sicherheitsfunktionen in Bezug auf die Rückhaltung, aber nicht in Bezug auf den Einschluss von Radionukliden.

Nach der Sicherheitsfunktion F3 des KBS-3-Konzeptes muss eine Rekritikalität im Endlager vermieden werden. Dies wird über eine quantitative Anforderung an den Neutronenmultiplikationsfaktor geregelt, der kleiner als 0,95 sein muss. In den Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ wird nach Kap. 7.2.4 ebenfalls der Ausschluss von Kritikalität gefordert. Daher ist zu erwarten, dass in den zu erstellenden Sicherheitsanforderungen nach § 26 StandAG eine ähnliche Anforderung gestellt werden wird. Dies deckt sich mit den Empfehlungen von /ESK 19/. Die Vermeidung einer Rekritikalität dient auch dem Erhalt der Behälterintegrität, entsprechend sind im KBS-3-Konzept auch Anforderungen an Behältermaterial und -auslegung wie nach Can5 definiert. Dem entspricht die Sicherheitsfunktion „ISF_VU b) Verhinderung von Rekritikalitätszuständen“ nach VerSi-II.

Auch die Sicherheitsfunktion „ISF_MS Widerlager: Aufnahme gerichteten Drucks“ ist beim Integritätsnachweis für die Abfallmatrix als weitere Barriere, die dem Erhalt des Abfallbehälters als wesentliche Barriere dient, zu betrachten. Die Abfallmatrix muss demnach durch geeignete Festigkeitseigenschaften die mechanische Stabilität des Behälters gewährleisten.

Die rückhaltenden Sicherheitsfunktionen des KBS-3-Konzeptes F1 und F2 sind nicht Teil der Integritätsbetrachtung, da diese nicht zum Erhalt der Behälterintegrität beitragen, sondern ein günstiges chemisches Milieu fordern, das bei einem Behälterausfall zur Rückhaltung von Radionukliden beitragen soll. Dies gilt auch für die Sicherheitsfunktionen „RSF_LT Günstige Freisetzungsscharakteristik“ und „ISF_PS Korrosionsschutz“ aus VerSi-II. Auch „ISF_VG Gasdruckbegrenzung“ muss im Integritätsnachweis nicht betrachtet werden, da es erst nach dem Ausfall des Behälters und nachfolgenden Lösungszutritt zu Gasbildung kommen kann.

4.3.2 Abfallbehälter

Solange der Behälter eine wesentliche Barriere im Konzept darstellt, muss seine Einschlusswirkung nachgewiesen und somit auch die Behälterintegrität gezeigt werden.

Mögliche quantitative Indikatoren zeigt das KBS-3-Konzept auf, das für den Behälter drei Sicherheitsfunktionen, bezogen auf den Einschluss der Radionuklide (Can1-Can3), vorsieht. Weiterhin besitzt im KBS-3-Konzept der Behälter mit den Funktionen Can4-5 im Falle eines Versagens rückhaltende Sicherheitsfunktionen.

Im KBS-3-Konzept wird mit der SF Can1 gefordert, dass aufgrund chemischer Korrosionsprozesse der Behälter nicht unzulässig degradiert wird. Dies entspricht der VerSi-II-Sicherheitsfunktion „ISF_PS Korrosionsschutz: Schutz vor Degradation“ und der Forderung im chemischen Integritätskriterium. Die Bildung von Korrosionsprodukten mit günstigen rückhaltenden (sorbierenden) Eigenschaften trägt zur Rückhaltung von Radionukliden bei. Dies wird im KBS-3-Konzept durch die Sicherheitsfunktion Can4 berücksichtigt und entspricht „RSF_AT Sorption“ in VerSi-II. Darüber hinaus wird in VerSi-II die Funktion „RSF_AT Löslichkeitsbegrenzung“ aufgeführt, die die Ausbreitung der Radionuklide aus dem Abfallbehälter begrenzt.

Das mechanische Kriterium kann durch Can2 und Can3 bzw. durch die VerSi-II Funktion „ISF_MS: Mechanische Stabilisierung“ beziffert werden, da diese beiden Kriterien die mechanische Integrität gegenüber isostatischer Auflast und Scherbewegungen zeigen. Bei der Ausformulierung eines Indikators für die mechanische Integrität des Behälters ist festzulegen, welche isostatische Belastung unter Endlagerbedingungen im Nachweiszeitraum zu erwarten ist. Für diese isostatische Belastung sind die Behälter mindestens auszulegen. Im KBS-3-Konzept wird eine isostatische Belastung von bis zu 45 MPa erwartet /SKB 11b/, ein tatsächliches Versagen des Behälters trat erst bei ca. 130 MPa ein /RAI 10/.

Eine weitere mechanische Belastung für Behälter tritt infolge von Scherbewegungen auf. Hierzu darf die Dichte des Buffers nicht zu groß sein, damit eine plastische Verformbarkeit des Buffers gegeben bleibt und keine Wasserwegsamkeiten im Buffer entstehen. Nach /SKB 11b/ wird daher die Dichte des Buffers auf 2.050 kg/m³ begrenzt. Dieser Wert berücksichtigt die standort- und konzeptspezifischen Gegebenheiten in Schweden und müsste für ein Konzept im Kristallingestein in Deutschland entsprechend modifiziert werden.

Scherbewegungen treten insbesondere infolge seismischer Aktivität auf, z. B. in Gebieten mit aktiven Störzonen oder mit vulkanischer Aktivität. Im Standortauswahlverfahren nach StandAG werden Standorte ausgeschlossen, an denen großräumige

Vertikalbewegungen (§ 22 Abs. 2 (1) StandAG) zu erwarten sind, aktive Störungszonen vorhanden sind (§ 22 Abs. 2 (2) StandAG) oder eine erhöhte seismische Gefährdung (§ 22 Abs. 2 (4) StandAG) bzw. vulkanische Aktivität vorliegt (§ 22 Abs. 2 (5) StandAG). Daher sind starke Scherbewegungen an einem möglichen Standort nicht zu erwarten. Dennoch sollten im Rahmen des Integritätsnachweises mögliche Scherbeanspruchungen abgeschätzt werden, für die der Behälter ausgelegt werden muss, sodass das mechanische Integritätskriterium erfüllt wird.

Die Ableitung der Zerfallswärme aus dem Abfallbehälter kann den abfallnahen Versatz unzulässig beeinträchtigen, dies ist durch die VerSi-II-Sicherheitsfunktion „ISF_VT Schadloose Ableitung der erzeugten Zerfallswärme“ abgedeckt. Ein möglicher Indikator ist hier die Wärmeleitfähigkeit des Versatzes zusammen mit der sich einstellenden Temperatur und der Dauer des Temperatureintrags.

Die Vermeidung einer Rekritikalität dient auch dem Erhalt der Behälterintegrität. Entsprechend sind im KBS-3-Konzept auch Anforderungen an Behältermaterial und -auslegung wie nach Can5 definiert. Dem entspricht die Sicherheitsfunktion „ISF_VU Verhinderung von Rekritikalitätszuständen“ nach VerSi-II. Die Kriterien aus den Sicherheitsanforderungen sind bereits bei der Abfallmatrix dargelegt worden, zusätzlich kann es bei Betrachtung des Abfallbehälters im Hinblick auf Rekritikalität bei Versagen des Behälters zu einer Verletzung des thermischen Kriteriums für den abfallnahen Versatz durch den hohen Wärmeeintrag kommen.

Die VerSi-II-Sicherheitsfunktion „RSF_DW Behinderung des Lösungszutritts“ zielt auf eine dauerhafte Verhinderung des Lösungszutritts zu den Abfällen ab. Mögliche Indikatoren sind die Korrosionsbeständigkeit der Behälter sowie deren Festigkeit und die Dicke der Behälterwandungen.

4.3.3 Abfallnaher Versatz

Insofern der Behälter keine wesentliche Barriere über den gesamten Nachweiszeitraum darstellt (s. Kap. 4.1), müssen geotechnische Barrieren die Einschlusswirkung gewährleisten. In diesem Fall ist für den abfallnahen Versatz wie z. B. ein Bentonitbuffer die Integrität zu zeigen, ansonsten übernimmt der abfallnahe Versatz die Funktion einer weiteren Barriere, welche zur Integrität der wesentlichen technischen Barriere (Behälter) beiträgt. In diesem Fall könnten wie im Folgenden exemplarisch erläutert quantitative Indikatoren wie nach Buff1 – Buff6 verwendet werden. Dies entspricht dem Vorgehen im

KBS-3-Konzept, nach dem der Buffer selbst keine einschlusswirksame Sicherheitsfunktion besitzt, sondern dem Erhalt der Einschchlusswirkung des Behälters bzw. dessen Sicherheitsfunktionen Can1 – Can3 dient. Im Falle eines Behälterausfalles kann der Buffer rückhaltende Sicherheitsfunktionen übernehmen (wie nach Buff7 – Buff9), die in einen Integritätsnachweis einfließen sollten, wenn die Behälterintegrität nicht über den gesamten Nachweiszeitraum nachgewiesen werden kann.

Nach dem in Kapitel 4.1 genannten hydraulischen Kriterium soll eine Erosion bzw. Subrosion des Buffers verhindert werden. Als quantitativer Indikator kann die advective Fließgeschwindigkeit dienen. Dies entspricht der Sicherheitsfunktion Buff1 im KBS-3-Konzept, die zusätzlich gewährleistet, dass kein unzulässig hoher Lösungszutritt in der Nähe der Behälter erfolgen kann und erhöhte Korrosionsraten ausgeschlossen werden, die ein Verletzen des chemischen Integritätskriteriums (bzw. Can1) zufolge haben können. Nach /SKB 11b/ wird durch eine Limitierung des hydraulischen Durchlässigkeitsbeiwertes des Buffers auf 10^{-12} m/s, unter Berücksichtigung der am schwedischen Standort zu erwartenden hydraulischen Gradienten, kein Lösungstransport durch Advektion stattfinden, sondern ausschließlich ein Transport infolge von Diffusion erfolgen. Dem entspricht in VerSi-II die Sicherheitsfunktion „ISF_PS Erosionsschutz: Schutz vor Subrosion und Erosion“.

Zudem wird die „Dichtwirkung“ des Buffers durch dessen Selbstabdichtung durch Quellen bei Aufsättigung mit Lösung erreicht (Im KBS-3 Konzept abgedeckt durch die Anforderung Buff1b). Somit soll ein Formschluss sowohl mit dem Behälter als auch mit dem umgebenden Wirtsgestein erreicht werden. Um dies zu gewährleisten, muss der Buffer einen Quelldruck von > 1 MPa entwickeln; im Rahmen von VerSi-II ist dies durch die Funktion „ISF_PS Gewährleistung des Quellvermögens“ abgedeckt. Mögliche Indikatoren sind auch die Einspannung durch umgebende Komponenten, sowie chemische Indikatoren der Lösung im Buffer /FIS 17/.

Die vorgenannten Punkte werden auch im StandAG thematisiert. Nach § 23 (5) Abs. 1 StandAG wird die hydraulische Durchlässigkeit an einem Standort mit einem einschlusswirksamen Gebirgsbereich begrenzt. Nach § 24 (4) muss dies für ein Endlagersystem im Kristallingestein, das im Wesentlichen auf technischen und geotechnischen Barrieren beruht, nicht gezeigt werden. Dafür muss der Nachweis geführt werden, dass die technischen und geotechnischen Barrieren den sicheren Einschluss der Radionuklide für

eine Million Jahre gewährleisten können. Hierzu gehört auch, dass sich in den Materialien der wesentlichen Barrieren keine wesentlichen Fluidwegsamkeiten bilden dürfen.

Um das in Kapitel 4.1 genannte chemische Integritätskriterium einzuhalten, darf keine mikrobielle Aktivität in der Nähe des Behälters vorliegen, die zu einer unzulässigen Korrosion führt. Hierzu ist eine Beschaffenheit des Buffers zu wählen (z. B. hohe Dichte), die ein ungünstiges Milieu für mikrobielle Aktivität erzeugt. Dies wird im KBS-3-Konzept durch die Sicherheitsfunktion Buff2 gewährleistet. Hierzu gehört auch eine Betrachtung z. B. der Temperaturen und der Salinitätsbedingungen, die maßgeblich die optimale Wachstumsrate von spezifischen Mikroorganismen beeinflussen. Eine entsprechende Sicherheitsfunktion ist im VerSi-II-Konzept nicht vorgesehen.

Wenn der abfallnahe Versatz eine wesentliche Barriere darstellt, muss zur Einhaltung des chemischen Integritätskriteriums abgedeckt sein, dass durch die Eigenschaften des Buffers, wie einer hohen Dichte, Kolloide zurückgehalten werden (wie Buff7, „RSF_AT Verhinderung des Kolloidtransports“ in VerSi-II) und Radionuklide im Bentonitbuffer sorbiert werden können (Buff8, „RSF_AT Sorption“ in VerSi-II). Konkret wird im KBS-3-Konzept nach Buff7 eine Mindestdichte von 1.650 kg/m^3 gefordert und möglichst hohe Sorptionskoeffizienten und geeignete Diffusionskoeffizienten nach Buff8.

Nach dem thermischen Integritätskriterium dürfen im Endlager keine Temperaturen auftreten, welche die Integrität der wesentlichen Barrieren gefährden. Für geotechnische Barrieren gilt dies insbesondere für Temperaturen, die zu Mineralumwandlungen führen (wie z. B. ausformuliert nach Buff4 im KBS-3-Konzept, „ISF_VT“ im VerSi-II-Konzept), welche die sicherheitstechnisch relevanten Eigenschaften eines abfallnahen Versatzes einschränken und somit zu einem Lösungszutritt zum Behälter führen oder ein ungünstiges geochemisches Milieu erzeugen, das eine Korrosion beschleunigt. Eine solche maximal zulässige Temperatur muss für ein konkretes Sicherheits- und Endlagerkonzept festgelegt werden und muss im Einklang mit § 27 (4) StandAG sowie möglichen Konkretisierungen in den zu erstellenden Verordnungen nach § 26 (3) und § 27 (6) StandAG stehen.

Der Buffer muss so beschaffen sein, dass dieser durch Erosion bzw. Subrosion nicht freigelegt wird und der Behälter nicht absinken kann. Hierzu ist ein ausreichend hoher Quelldruck im Buffer notwendig, der verhindert, dass der Behälter im Buffer absinkt und in Kontakt mit dem umgebenen Gebirge kommt. Das KBS-3-Konzept setzt mit Buff5

hierfür einen quantitativen Indikator fest: den Quelldruck, der mindestens 0,2 MPa betragen muss. Ein solcher mindestens einzuhaltender Quelldruck muss standort- und konzeptspezifisch festgelegt werden. Der quantitative Wert im KBS-3-Konzept kann hierfür einen Richtwert darstellen. Eine solche Betrachtung kann Teil des hydraulischen Integritätskriteriums sein. Im VerSi-II-Konzept kann dies durch die Sicherheitsfunktion „ISF_MS Aufnahme gerichteten Drucks“ abgedeckt werden.

Um die Behälterintegrität zu erhalten und das mechanische Integritätskriterium für den Behälter zu erfüllen, dürfen keine unzulässigen isostatischen Belastungen (wie z. B. nach Can2) oder unzulässige Belastungen durch Scherbewegungen (wie z. B. nach Can3) auftreten. Hierzu darf beispielsweise durch das Quellen eines Bentonitbuffer kein zu hoher Druck auf den Behälter ausgeübt werden. Dieser wird im KBS-3-Konzept durch die Sicherheitsfunktion Buff6 auf 15 MPa limitiert und entspricht der Sicherheitsfunktion „ISF_MS Aufnahme gerichteten Drucks“ aus VerSi-II. Dieser Wert ist konzeptspezifisch und muss in einem Sicherheitskonzept für einen konkreten Standort im Kristallingestein definiert werden. Weiterhin darf die Dichte des Buffers nicht zu hoch sein, da ansonsten (Buff3 bzw. „ISF_PS Gewährleistung des Quellvermögens“) die mechanische Stabilität des Abfallbehälters durch zu große Scherbelastung gefährdet sein kann. Als Indikator wird im KBS-3 Konzept eine Bufferdichte kleiner 2050 kg/m^3 angegeben.

Im Fall eines Behälterausfalls muss Gas aus dem Buffer entweichen dürfen, sodass keine Verletzung des mechanischen Integritätskriteriums infolge eines hohen Gasdruckes zu erwarten ist (Buff9 bzw. „ISF_VG Schadlose Ableitung von Gasen“).

4.3.4 Streckenversatz der Einlagerungsstrecken

Der Streckenversatz in den Einlagerungsstrecken stellt eine weitere Barriere dar. Daher besitzt dieser keine rückhaltende Sicherheitsfunktion, trägt aber zur mechanischen Integrität des Behälters und/oder Buffers bei. Der Streckenversatz muss eine ausreichend hohe Dichte aufweisen, um den Quelldruck des Buffers im Einlagerungsbohrloch aufrecht zu erhalten und um diesen in seiner Position zu halten. In VerSi-II ist diese Eigenschaft durch die Sicherheitsfunktionen „ISF_PS Gewährleistung des Quellvermögens“ und „ISF_MS Widerlager: Aufnahme gerichteten Drucks“ abgedeckt.

Relevant ist auch die VerSi-II-Funktion „ISF_PS: Korrosionsschutz: Schutz vor Degradation“; diese soll den abfallnahen Versatz durch geeignete geochemische Bedingungen schützen. Ebenso ist die Sicherheitsfunktion „ISF_PS Erosionsschutz: Schutz vor

Subrosion und Erosion“ zu betrachten. Ein mögliches Versagen dieser Sicherheitsfunktion durch zu hohe Strömungsgeschwindigkeiten im Streckenversatz, kann zu einer Verletzung des hydraulischen Kriteriums im Streckenversatz und damit zu einer Verletzung des mechanischen Kriteriums im abfallnahen Versatz führen.

Sollten Radionuklide infolge eines Behälterausfalls austreten und weder in der Abfallmatrix noch im Buffer zurückgehalten werden, kann das Versatzmaterial in Einlagerungstrecken auch rückhaltende Funktionen übernehmen (wie z. B. BF2-BF3). Dies dient allerdings nicht der Integrität der wesentlichen Barrieren und wird daher für einen Integritätsnachweis nicht betrachtet.

4.3.5 Geosphäre

Die Geosphäre besitzt in einem Konzept, das auf wesentlichen technischen und geotechnischen Barrieren beruht, keine wesentliche rückhaltende Sicherheitsfunktion, kann aber zur Integrität der technischen und geotechnischen Barrieren beitragen, also eine integritätserhaltende Sicherheitsfunktion besitzen. Denn nach § 2 Abs. 10 StandAG umfasst der Einlagerungsbereich für ein Endlagersystem, dessen Einschlussvermögen wesentlich auf technischen und geotechnischen Barrieren beruht, auch den räumlichen Teil des Wirtsgesteins, der die Funktionstüchtigkeit und den Erhalt dieser Barrieren gewährleistet. Daher sollte für diesen Teil des Gebirges Integrität in Bezug auf seine integritätserhaltende Sicherheitsfunktion nachgewiesen werden.

Das Gebirge kann dazu beitragen, dass der Lösungszutritt in die Nähe der technischen Barrieren eingeschränkt wird, sodass keine erhöhte Korrosion oder Erosion stattfinden. Hierzu sind geringe hydraulische Durchlässigkeitsbeiwerte sowie ein geringer hydraulischer Druckgradient günstig. Im KBS-3-Konzept wird der hydraulische Druckgradient durch die Sicherheitsfunktion R2 im Wirtsgestein limitiert. In VerSi-II ist dies durch die Funktion „ISF_PS Schutz vor Subrosion/ Erosion“ abgedeckt. Das StandAG sieht nach Anlage 2 zu § 24 (3) zur Bewertung der Konfiguration des Gesteinskörpers vor, dass keine Grundwasserleiter in unmittelbarer Umgebung existieren sollten. Somit bleiben hier der hydraulische Druckgradient und die durch ihn initiierte Grundwasserbewegung gering.

Das Gebirge soll auch ausreichende Festigkeitseigenschaften besitzen um die Aufnahme gerichteten Drucks zu gewährleisten. Dies ist in VerSi-II durch die

Sicherheitsfunktion „ISF_MS Aufnahme gerichteten Drucks“ gewährleistet. Im KBS-3-Konzept entspricht dies der Sicherheitsfunktion R3.

Das Gebirge kann ebenfalls einen Beitrag zur Erfüllung des chemischen Integritätskriteriums leisten, indem aufgrund des geochemischen Milieus bei einem möglichen Lösungszutritt unerwünschte Mineralumwandlungen im Buffer/Versatz unterbleiben und die Korrosion der Behälter gehemmt wird. Hierzu definiert das KBS-3-Konzept quantitative Indikatoren in der Sicherheitsfunktion R1, in VerSi-II deckt die Sicherheitsfunktion „ISF_PS Korrosionsschutz: Schutz vor Degradation“ diesen Aspekt ab. Nach § 24 StandAG wird in Deutschland ebenfalls ein Standort für ein Endlager gesucht, das ein günstiges chemisches Milieu im einschlusswirksamen Gebirgsbereich bzw. im Einlagerungsbereich besitzt. Die Anlage 10 zu § 24 (5) StandAG führt das Abwägungskriterium zur Bewertung der hydrochemischen Verhältnisse am Standort auf.

Zusätzlich soll im KBS-3-Konzept (Sicherheitsfunktion R4a) verhindert werden, dass unzulässige Spannungsverhältnisse durch Gefrieren auf Endlagerniveau auftreten. Durch Vorgaben zur Teufenlage im Standortauswahlverfahren nach § 23 (5) Abs. 3 wird eine Unterschreitung der Gebirgstemperatur in großen Teufen aufgrund von Frosteffekten in Deutschland nicht erwartet. Dieser Aspekt wurde hier daher nicht aufgenommen.

Im Falle einer Freisetzung von Radionukliden kann die Geosphäre zur Rückhaltung beitragen. Hierfür ist ein chemisches Milieu günstig, das z. B. Mineralausfällungen mit Radionukliden begünstigt bzw. vorteilhaft für eine Sorption der Radionuklide ist. Hierzu ist auch die Art und Zusammensetzung von Kluftverfüllungen entscheidend. Weiterhin bewirkt ein niedriger hydraulischer Durchlässigkeitsbeiwert (unter Vorliegen eines geringen hydraulischen Druckgradienten) eine Hemmung des Radionuklidtransportes. Dies dient allerdings nicht der Integrität der wesentlichen Barrieren und wird daher im Integritätsnachweis nicht betrachtet.

5 Zusammenfassende Schlussfolgerungen

Im vorliegenden Bericht wurden vor dem Hintergrund der Suche nach einem Endlager für hochradioaktive Abfälle, die nach StandAG auch im Wirtsgestein Kristallingestein stattfindet, Integritätskriterien für ein auf technischen und geotechnischen Barrieren beruhendes Sicherheitskonzept abgeleitet. Basis der vorliegenden Betrachtungen ist hierbei das Verständnis des Integritätsnachweises der Stellungnahme der ESK /ESK 19/.

Danach bezeichnet der Integritätsnachweis den Nachweis des Erhalts der Sicherheitsfunktionen der wesentlichen Barrieren und der weiteren Barrieren, die den Erhalt der Funktionalität der wesentlichen Barrieren sicherstellen, über den Nachweiszeitraum. Diesem Verständnis folgend muss für den Integritätsnachweis zunächst bestimmt werden, welche die zu betrachtenden wesentlichen und weiteren Barrieren sind. Ist dies erfolgt, müssen die Sicherheitsfunktionen dieser Barrieren benannt werden, deren Erhalt es im Integritätsnachweis mit Hilfe geeigneter Indikatoren zu überprüfen gilt. Grundsätzlich erfolgt die Identifikation konkreter Integritätsindikatoren also mit Blick auf wesentliche rückhaltende und wesentliche integritätserhaltende Sicherheitsfunktionen von Endlagerkomponenten. Im Falle des Versagens einer Sicherheitsfunktion, kann abgeleitet werden, welches Integritätskriterium in der Folge nicht mehr erfüllt ist. Zu beachten ist, dass eine Barriere über den Nachweiszeitraum von einer wesentlichen zu einer weiteren Barriere und umgekehrt werden kann.

Sicherheits- und Endlagerkonzepte für das Wirtsgestein Kristallingestein, wie etwa das KBS-3-Konzept, weisen aufgrund der meist vorhandenen Klüftigkeit kristalliner Gesteine in der Regel keinen ewG aus. Die Abwesenheit eines ewG und die wesentliche Bedeutung der Barrieren der (geo-)technischen Komponenten im Sicherheitskonzept markieren den wesentlichen Unterschied zwischen Sicherheitskonzepten für Kristallingestein und anderen Wirtsgesteinen. Wie oben aufgezeigt, hat dieser Unterschied zur Folge, dass im Integritätsnachweis Integritätskriterien für andere und insbesondere eine größere Anzahl von Endlagerkomponenten gefunden werden müssen (bei ewG-basierten Sicherheitskonzepten nur für den ewG und technische und geotechnische Barrieren innerhalb des ewG). Mit der größeren Anzahl an Endlagerkomponenten geht einher, dass eine größere Anzahl an Sicherheitsfunktionen zu betrachten ist mit einer entsprechend größeren Anzahl von Bewertungsgrößen bzw. Indikatoren.

Die Entscheidung, welche Komponenten und Sicherheitsfunktionen zu betrachten sind, hängt vom Sicherheits- und Endlagerkonzept ab. Da in Deutschland noch keine Festlegung auf ein Sicherheits- und Endlagerkonzept für Kristallingestein erfolgt ist, konnte in der vorliegenden Arbeit nur eine vorläufige Bewertung anhand des schwedisch-finnischen KBS-3-Konzeptes vorgenommen werden. Dabei wurde berücksichtigt, dass der Nachweiszeitraum mit 1 Million Jahren, entsprechend den deutschen Regularien, länger anzusetzen ist, als in Schweden oder Finnland.

Die Betrachtung integritätsgefährdender Prozesse zeigte vielfältige Ursachen möglicher Integritätsgefährdungen. Die Ursachen bleiben auch dann vielfältig, wenn die im StandAG genannten potenziell integritätsgefährdenden Prozesse aus der Betrachtung ausgeschlossen werden, weil evtl. davon ausgegangen wird, dass deren Existenz bereits bei der Standortauswahl ausgeschlossen wurde. Die Ursachen möglicher Integritätsgefährdungen sind mechanischer, hydraulischer, chemischer und thermischer Natur. Entsprechend bietet sich bei der Ableitung von Integritätskriterien eine Gliederung in ein mechanisches, hydraulisches, chemisches und thermisches Kriterium an.

Betrachtet man das KBS-3-Konzept, so wird, wie bereits erwähnt, deutlich, dass der Integritätsnachweis im Vergleich zu ewG-basierten Endlagerkonzepten eine größere Anzahl an Endlagerkomponenten betrachten muss. Grund ist, dass es bei ewG-basierten Konzepten keine technische Komponente gibt, welche die Integrität der wesentlichen rückhaltenden Barriere (also den ewG) schützt. Im Gegensatz dazu wird bei typischen Konzepten für Kristallingestein die Integrität der wesentlichen rückhaltenden Barrieren (Behälter und Buffer) von weiteren technischen Barrieren gewährleistet, deren integritäts Erhaltende Sicherheitsfunktionen bei einem Integritätsnachweis ebenfalls betrachtet werden müssen. Die Wahl der im Integritätsnachweis zu betrachtenden Komponenten ist jedoch nicht klar umrissen. Komponenten können nämlich auch eine indirekte integritäts Erhaltende Wirkung auf die wesentlichen Barrieren haben. Beispielsweise kann ein Widerlager die Integrität eines Bentonitversatzes der Einlagerungstrecken gewährleisten, der wiederum die Integrität des abfallnahen Buffers sichert. Die Entscheidung, welche Komponenten im Integritätsnachweis zu berücksichtigen sind, hängt davon ab, bis zu welchem Grad indirekte Wirkungen auf die wesentlichen Barrieren berücksichtigt werden sollen.

Für die in Kapitel 4.1 aufgeführten Endlagerkomponenten müssen im folgenden Schritt die wesentlichen rückhaltenden und die integritätswahrenden Sicherheitsfunktionen

benannt werden. Hierzu wurden aufgrund ihrer Allgemeinheit die im Vorhaben VerSi-II /FIS 17/ beschriebenen Sicherheitsfunktionen genutzt. Zu jeder Sicherheitsfunktion sind aussagekräftige Bewertungsgrößen bzw. Indikatoren zu finden, anhand derer der Erhalt der Sicherheitsfunktion über den betreffenden Zeitraum geprüft werden kann. Im vorliegenden Bericht wurden Beispiele für mögliche Bewertungsgrößen aufgezeigt, für die teilweise weiterer quantitativer Konkretisierungsbedarf besteht. Entscheidend für einen Indikator ist, dass dieser im Integritätsnachweis belastbar und gleichzeitig praktikabel ist, d. h. entweder messbar oder im Rahmen geeigneter Simulationen quantifizierbar ist, und unter Berücksichtigung quantifizierbarer Ungewissheiten, auch von den Indikator beeinflussenden Systemgrößen, genutzt werden kann. Letztendlich müssen Integritätsindikatoren bzw. Bewertungsgrößen, die den Erhalt einer Sicherheitsfunktion und in der Folge den Erhalt eines Integritätskriteriums belegen, jedoch anhand eines konkreten Endlagerkonzeptes ausgewählt und konkretisiert werden.

Literaturverzeichnis

- /AHJ 84/ Ahjos, T., Saari, J., Penttilä, E., Korhonen, H.: Earthquakes and seismic hazard in Finland. Engineering Geology, Bd. 20, S. 1–12, DOI 10.1016/0013-7952(84)90038-3, 1984.
- /AKE 02/ Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) (Hrsg.): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte, Empfehlungen des AkEnd, Abschlussbericht. Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd), 260 S.: Köln, Dezember 2002.
- /AND 00/ Andersson, J., Ström, A., Svemar, C., Almén, K.-E., Ericsson, L. O.: What requirements does the KBS-3 repository make on the host rock?, Geoscientific suitability indicators and criteria for siting and site evaluation. Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), SKB Technical Report, TR-00-12, 148 S.: Stockholm, Sweden, April 2000.
- /AND 05/ Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs (ANDRA): Dossier 2005 Argile, Synthesis: Evaluation of the feasibility of a geological repository in an argillaceous formation, Meuse/Haute-Marne site. Collection les Rapports, Bd. 268, 241 S., ISBN 2-916162-00-3: Châtenay-Malabry, France, 2005.
- /BEC 11/ Becker, R., Hermansson, H.-P.: Evolution of hydrogen by copper in ultrapure water without dissolved oxygen. Swedish Radiation Safety Authority (SSM, Strål Säkerhets Myndigheten), SSM Research, 2011:34, 27 S.: Stockholm, Sweden, 2011.
- /BEU 16/ Beuth, T., Faß, T., Fischer-Appelt, K., Hartwig-Thurat, E., Larue, P.-J.: Stellungnahme zu radiologischen Auswirkungen des geplanten Endlagers in Forsmark (Schweden). Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, 188 S.: Köln, März 2016.
- /BMU 10/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle. 22 S.: Bonn, 30. September 2010.

- /BOD 08/ Bodenez, P., Rieu, J., Niel, J. C.: Guide de sûreté relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde. Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN), 32 S., 12. Februar 2008.
- /BÖD 06/ Bödvarsson, R., Lund, B., Roberts, R., Slunga, R.: Earthquake activity in Sweden, Study in connection with a proposed nuclear waste repository in Forsmark or Oskarshamn. Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), SKB Rapport, R-06-67, 40 S.: Stockholm, Sweden, Februar 2006.
- /BOL 12/ Bollingerfehr, W., Filbert, W., Dörr, S., Herold, P., Lerch, C., Burgwinkel, P., Charlier, F., Thomauske, B., Bracke, G., Kilger, R.: Endlagerauslegung und -optimierung, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, Bericht zum Arbeitspaket 6. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-281, 285 S.: Köln, 2012.
- /BOW 11/ Bowers, K. J., Wiegel, J.: Temperature and pH optima of extremely halophilic archaea, A mini-review. *Extremophiles*, Bd. 15, Nr. 2, S. 119–128, DOI 10.1007/s00792-010-0347-y, 2011.
- /BRA 19/ Bracke, G., Hartwig-Thurat, E., Larue, J., Meleshyn, A., Weyand, T.: Untersuchungen zu den "maximalen physikalisch möglichen Temperaturen" gemäß § 27 StandAG im Hinblick auf die Grenztemperatur an der Außenfläche von Abfallbehältern. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, GRS-A-3948, 321 S.: Köln, Januar 2019.
- /BRÄ 94/ Bräuer, V., Reh, M., Schulz, P., Schuster, P., Sprado, K.-H.: Endlagerung stark wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands, Untersuchung und Bewertung von Regionen in nichtsalinaren Formationen. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Archiv-Nr.: 112642 Hannover; 2025039 Berlin; Tgb.-Nr.: 12437/91, 147 S.: Hannover, November 1994.
- /CRI 98/ Cristescu, N. D., Hunsche, U.: Time Effects in Rock Mechanics. Wiley Series in Materials, Modelling and Computation, 342 S., ISBN 0471955175, Wiley & Sons; John Wiley & Sons: Chichester, West Sussex, 1998.

- /DIN 11/ Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN): DIN EN 1998-1/NA:2011-01.2011-01, Beuth Verlag: Berlin, 2011.
- /ENSI 10/ Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI): Sicherheitstechnisches Gutachten zum Vorschlag geologischer Standortgebiete, Sachplan geologische Tiefenlager, Etappe 1. ENSI, 33/070, 196 S.: Brugg, Januar 2010.
- /ESK 16/ Entsorgungskommission (ESK): Endlagerforschung in Deutschland: Anmerkungen zu Forschungsinhalten und Forschungssteuerung. Stellungnahme der Entsorgungskommission, 61 S.: Bonn, 12. Mai 2016.
- /ESK 19/ Entsorgungskommission (ESK): Sicherheitskonzeptionelle Anforderungen an das Barrierensystem eines Endlagers für hoch radioaktive Abfälle und deren Umsetzbarkeit. Stellungnahme der Entsorgungskommission, 33 S.: Bonn, 21. Februar 2019.
- /FEN 06/ Fenton, C. H., Adams, J., Halchuk, S.: Seismic Hazards Assessment for Radioactive Waste Disposal Sites in Regions of Low Seismic Activity. Geotechnical and Geological Engineering, Bd. 24, Nr. 3, S. 579–592, DOI 10.1007/s10706-005-1148-4, 2006.
- /FIS 10/ Fischer-Appelt, K., Baltes, B.: Abwägungsmethodik für den Vergleich von Endlagersystemen in unterschiedlichen Wirtsgesteinsformationen - Anleitung zur Anwendung der Abwägungsmethodik, Abschlussbericht zum Vorhaben 3607R02589 VerSi „Evaluierung der Vorgehensweise“. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-A-3536: Köln, 1. Dezember 2010.
- /FIS 17/ Fischer-Appelt, K., Frieling, G., Kock, I., Navarro, M., Beuth, T., Bracke, G., Faß, T., Larue, P.-J., Mayer, K.-M., Seher, H., Hartwig-Thurat, E.: Weiterentwicklung einer Methode zum Vergleich von Endlagerstandorten in unterschiedlichen Wirtsgesteinsformationen. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, GRS-478, ISBN 978-3-946607-61-8: Köln, Oktober 2017.

- /GAR 09/ García-García, S., Wold, S., Jonsson, M.: Effects of temperature on the stability of colloidal montmorillonite particles at different pH and ionic strength. *Applied Clay Science*, Bd. 43, Nr. 1, S. 21–26, DOI 10.1016/j.clay.2008.07.011, 2009.
- /GOG 88/ Goguel, J.: Mini-Dossier, Le Rapport Goguel Stockage Des Dechets Radioactifs En Formations Geologiques, Criteres Techniques Du Choix De Site. *Supplement Au Bulletin Mensuel*, Nr. 64, 27 S.: Saint Paullez Durance Cedex, France, September 1988.
- /GUT 44/ Gutenberg, B., Richter, C. F.: Frequency of Earthquakes in California. *Bulletin of Seismological Society of America*, Bd. 34, Nr. 4, S. 185–188, 1944.
- /HAM 02/ Hammah, R. (Hrsg.): Mining and tunnelling innovation and opportunity, proceedings of the 5th North American Rock Mechanics Symposium and the 17th Tunnelling Association of Canada Conference. Narms-Tac 2002, Toronto, 7. - 10. Juli 2002, *Proc. NARMS-TAC Conference*, Bd. 1, 9 S., University of Toronto: Toronto, Canada, 2002.
- /HAR 03/ Harrington, J. F., Horseman, S. T.: Gas migration in KBS-3 buffer bentonite, Sensitivity of test parameters to experimental boundary conditions. Hrsg.: Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), SKB Technical Report, TR-03-02, 57 S.: Stockholm, Sweden, Januar 2003.
- /HOE 80/ Hoek, E., Brown, E. T.: Empirical strength criterion for rock masses. *J. Geotech. Engng Div.*, Nr. 106, S. 1013–1035, 1980.
- /HOE 88/ Hoek, E., Brown, E. T.: The Hoek-Brown failure Criterion - a 1988 Update. *Proc. 15th Canadian Rock Mech. Symp.*, 31-38: Toronto, Canada, 1988.
- /HOE 97/ Hoek, E., Brown, E.: Practical estimates of rock mass strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Bd. 34, Nr. 8, S. 1165–1186, 1997.
- /HOE 07a/ Hoek, E.: *Practical Rock Engineering*. 341 S.: Canada, 2007.

- /HOE 07b/ Hoek, E., Marinos, P.: A brief history of the development of the Hoek-Brown failure criterion. *Soils and Rocks*, Bd. 2, S. 1–13, 2007.
- /HÖK 10/ Hökmark, H., Lönnqvist, M., Fälth, B.: THM-issues in repository rock, Thermal, mechanical, thermo-mechanical and hydro-mechanical evolution of the rock at the Forsmark and Laxemar sites. Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), SKB Technical Report, TR-10-23, 276 S.: Stockholm, Sweden, Mai 2010.
- /HOR 05/ Hora, S., Jensen, M.: Expert Panel Elicitation of Seismicity Following Glaciation in Sweden. Swedish Radiation Safety Authority (SSM, Strålsäkerhets Myndigheten), SSI Rapport, 2005:20, 119 S.: Stockholm, Sweden, Dezember 2005.
- /HOT 10/ Hotzel, S.: Behandlung der Integrität im Langzeitsicherheitsnachweis für ein Endlager im Salinar, 3605R02548: Verfolgung und Bewertung der Fortentwicklung des Standes von Wissenschaft und Technik beim Nachweis der Langzeitsicherheit von Endlagern. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-A-3447, 50 S.: Köln, Mai 2010.
- /HUN 03/ Hunsche, U., Schulze, O., Walter, F., Plischke, I.: Projekt Gorleben, Thermomechanisches Verhalten von Salzgestein, Abschlussbericht. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Arbeitspaket 9G 213 811: Hannover, 1. Januar 2003.
- /JOB 16/ Jobmann, M., Becker, D.-A., Hammer, J., Jahn, S., Lommerzheim, A., Müller-Hoeppe, N., Noseck, U., Krone, J., Weber, J. R., Weitkamp, A., Wolf, J.: Projekt CHRISTA: Machbarkeitsuntersuchung zur Entwicklung einer Sicherheits- und Nachweismethodik für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle im Kristallingestein in Deutschland. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC), TEC-20-2016-AB: Peine, 20. Oktober 2016.

- /KOC 12/ Kock, I., Eickemeier, R., Frieling, G., Heusermann, S., Knauth, M., Minkley, W., Navarro, M., Nipp, H.-K., Vogel, P.: Integritätsanalyse der geologischen Barriere, Bericht zum Arbeitspaket 9.1, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-286, 301 S., ISBN 978-3-939355-62-5: Köln, 2012.
- /KOC 18/ Kock, I., Faß, T., Fischer-Appelt, K., Frieling, G., Larue, J., Wartenberg, W.: Messmethoden für überträgige Erkundungsprogramme gemäß StandAG (MessEr). Präsentation, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, 1. Statuskonferenz Endlagerung von hochradioaktiven Abfällen, Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit (BfE): Berlin, 8. November 2018.
- /KOM 16/ Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe: Abschlussbericht der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, Ein faires und transparentes Verfahren für die Auswahl eines nationalen Endlagerstandortes. K-Drs., Nr. 268, 684 S., 2016.
- /LAP 99/ LaPointe, P. R., Cladouhos, T., Follin, S.: Calculation of displacements on fractures intersecting canisters induced by earthquakes, Aberg, Berg and Ceberg examples. Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), SKB Technical Report, TR-99-03, 103 S.: Stockholm, Sweden, Januar 1999.
- /MEL 16/ Meleshyn, A., Weyand, T., Bracke, G., Kull, H., Wieczorek, K.: Wärmeentwicklung / Gesteinsverträglichkeit. Hrsg.: Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, K-MAT 64, 172 S., DOI 10.13140/RG.2.1.1882.8406, Mai 2016.
- /MÖN 12/ Mönig, J., Buhmann, D., Rübel, A., Wolf, J., Baltes, B., Fischer-Appelt, K.: Sicherheits- und Nachweiskonzept, Bericht zum Arbeitspaket 4, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-277, 79 S., ISBN 978-3-939355-53-3, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Braunschweig, 2012.

- /MUS 10/ Mustonen, S., Norokallio, J., Mellanen, S., Lehtimäki, T., Heikkinen, E.: EDZ09 Project and Related EDZ Studies in ONKALO 2008-2010. Posiva Oy, Posiva Working Report, 2010-27, 404 S.: Eurajoki, Finland, Dezember 2010.
- /NAV 19/ Navarro, M., Frieling, G., Weyand, T.: Integritätskriterien für einen einschlusswirksamen Gebirgsbereich im Tongestein. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, GRS-522, ISBN 978-3-947685-07-3: Köln, Januar 2019.
- /NEA 08/ Nuclear Energy Act (NEA) in der Fassung von 1987, zuletzt geändert 28. April 2008.
- /NUC 05/ Nuclear Waste Management Organization (NWMO): Choosing a Way Forward The Future Management of Canada's Used Nuclear Fuel. Toronto, Ontario, Kanada, 2005.
- /ORE 11/ Oren, A.: Thermodynamic limits to microbial life at high salt concentrations. Environmental Microbiology, Bd. 13, Nr. 8, S. 1908–1923, DOI 10.1111/j.1462-2920.2010.02365.x, 2011.
- /PAS 10/ Pastina, B., Hellä, P.: Models and Data report 2010. POSIVA 2010-01, 478 S., ISBN 978-951-652-172-8, Posiva Oy: Olkiluoto, Finland, 2010.
- /POS 99/ Posiva Oy: The final disposal facility for spent nuclear fuel, Environmental impact assessment report. 232 S.: Helsinki, Finland, 1999.
- /POS 12a/ Posiva Oy: Safety case for the disposal of spent nuclear fuel at Olkiluoto, Synthesis 2012. Posiva Report, 2012-12, 277 S., ISBN 978-951-652-193-3: Eurajoki, Finland, Dezember 2012.
- /POS 12b/ Posiva Oy: Safety Case for the disposal of spent nuclear fuel at Olkiluoto, Description of the Disposal System 2012. POSIVA, 2012-05, 166 S., ISBN 978-951-652-186-5: Eurajoki, Finland, Dezember 2012.

- /POS 13/ Posiva Oy: Safety case for the disposal of spent nuclear fuel at Olkiluoto, Performance Assessment 2012. POSIVA, 2012-04, 520 S., ISBN 978-951-652-185-8, Eurajoki, Finland: Olkiluoto, Februar 2013.
- /RAI 10/ Raiko, H., Sandström, R., Rydén, H., Johansson, M.: Design analysis report for the canister. Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), SKB Technical Report, TR-10-28, 80 S.: Stockholm, Sweden, April 2010.
- /ROH 11/ Rohrmüller, J., Mielke, H.-G., Gebauer, D.: Tektonik. Bayrisches Geologisches Landesamt, Kapitel 7, 8 S., 2011.
- /RÖH 99/ Röhlig, K.-J., Baltes, B., Becker, A., Bogorinsky, P., Fischer, H., Fischer-Appelt, K., Javeri, V., Lambers, L., Martens, K.-H., Morlock, G., Pörtl, B.: Sicherheit in der Nachbetriebsphase von Endlagern für radioaktive Abfälle, Abschlußbericht. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-A-2656, 155 S.: Köln, 1. Januar 1999.
- /SAA 00/ Saari, J.: Seismic activity parameters of the Finnish potential repository sites. Posiva Oy, POSIVA 2000-13, 31 S.: Helsinki, Finland, Oktober 2000.
- /SAA 08/ Saari, J., Lakio, A.: Local Seismic Network at the Olkiluoto Site, Annual Report for 2007. Hrsg.: Posiva Oy, Working Report, 2008-39, 38 S.: Eurajoki, Finland, Mai 2008.
- /SAA 11/ Saari, J., Malm, M.: Local Seismic Network at the Olkiluoto Site, Annual Report for 2010. Hrsg.: Posiva Oy, Working Report, 2011-73, 37 S.: Eurajoki, Finland, November 2011.
- /SAA 12/ Saari, J., Malm, M.: Local Seismic Network at the Olkiluoto Site, Annual Report for 2011. Posiva Oy, Working Report, 2012-29, 37 S.: Olkiluoto, Finland, Juni 2012.
- /SKB 94/ Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB): Treatment and final disposal of nuclear waste, Supplement to the 1992 programme in response to the government decision of december 16, 1993. RD&D-Programme 92 Supplement, 105 S.: Stockholm, Sweden, August 1994.

- /SKB 09/ Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB): Design premises for a KBS-3V repository based on results from the safety assessment SR-Can and some subsequent analyses. SKB Technical Report, TR-09-22, 44 S.: Stockholm, Sweden, 2009.
- /SKB 10/ Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB): Corrosion calculations report for the safety assessment SR-Site. SKB Technical Report, TR-10-66, 52 S.: Stockholm, Sweden, Dezember 2010.
- /SKB 11a/ Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB): Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark, Main report of the SR-Site project. SKB Technical Report, TR-11-01, 893 S.: Stockholm, Sweden, März 2011.
- /SKB 11b/ Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB): Volume I. In: Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB): Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark, Main report of the SR-Site project. SKB Technical Report, TR-11-01, S. 1–276: Stockholm, Sweden, März 2011.
- /SKB 11c/ Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB): Volume III. In: Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB): Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark, Main report of the SR-Site project. SKB Technical Report, TR-11-01, S. 555–893: Stockholm, Sweden, März 2011.
- /SKB 11d/ Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB): Volume II. In: Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB): Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark, Main report of the SR-Site project. SKB Technical Report, TR-11-01, S. 279–552: Stockholm, Sweden, März 2011.
- /SKI 93/ The Radiation Protection and Nuclear Safety Authorities in Denmark, Finland, Iceland, Norway and Sweden: Disposal of High Level Radioactive Waste, Consideration of Some Basic Criteria.

- /SPA 00/ Spark, I., Patey, I., Duncan, B., Hamilton, A., Devine, C., McGovern-Traa, C.: The effects of indigenous and introduced microbes on deeply buried hydrocarbon reservoirs, North Sea. Clay Minerals, Bd. 35, Nr. 1, S. 5, DOI 10.1180/000985500546693, 2000.
- /SSM 08a/ Swedish Radiation Safety Authority (SSM, Strål Säkerhets Myndigheten): SSMFS 2008:21 The Swedish Radiation Safety Authority Regulatory Code, The Swedish Radiation Safety Authority's regulations and general advice concerning safety in connection with the disposal of nuclear material and nuclear waste. Hrsg.: Yngvesson, U., SSMFS 2008:21, 8 S.: Stockholm, Sweden, 19. Dezember 2008.
- /SSM 08b/ Swedish Radiation Safety Authority (SSM, Strål Säkerhets Myndigheten): Swedish Radiation Safety Authority Regulatory Code, The Swedish Radiation Safety Authority's Regulations concerning Safety in Nuclear Facilities, The Swedish Radiation Safety Authority's general advice on the application of the regulations (SSMFS 2008:1) concerning safety in nuclear facilities. Hrsg.: Yngvesson, U., SSMFS 2008:1, 34 S., 3. Oktober 2008.
- /STA 17/ Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz – StandAG) in der Fassung vom 5. Mai 2017 (BGBl. I 2017, Nr. 26, S. 1074-1100), zuletzt geändert 20. Juli 2017 (BGBl. I 2017, Nr. 52, S. 2808–2838).
- /STR 19/ Strömberg, B., Sonnerfelt, L., Öberg, H.: Assessment of canister degradation processes in the regulatory review of SKB's licence application for the construction and operation of a spent nuclear fuel repository in Sweden. Geophysical Research Abstracts, Bd. 21, EGU2019-16566, April 2019.
- /STUK 14/ Radiation and Nuclear Safety Authority (STUK): GUIDE YVL D.5, Disposal of Nuclear Waste. YVL, D.5, 20 S., ISBN 978-952-309-128-3: Helsinki, 2014.

- /SZA 07/ Szakálos, P., Hultquist, G., Wikmark, G.: Corrosion of Copper by Water. Electrochemical and Solid-State Letters, Bd. 10, Nr. 11, S. C63-C67, DOI 10.1149/1.2772085, 2007.
- /WEY 16/ Weyand, T., Kock, I.: Integritätsgefährdende Prozesse in internationalen Sicherheitskonzepten für die Wirtsgesteine Tonstein und Kristallin, Bericht zum Arbeitspaket 3, Weiterentwicklung des internationalen Stands von Wissenschaft und Technik zu Methoden und Werkzeugen für Betriebs- und Langzeitsicherheitsnachweise. GRS-428, 71 S., ISBN 978-3-946607-10-6, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Köln, September 2016.
- /WOL 12/ Wolf, J., Behlau, J., Beuth, T., Bracke, G., Bube, C., Buhmann, D., Dresbach, C., Hammer, J., Keller, S., Kienzler, B., Klinge, H., Krone, J., Lommerzheim, A., Metz, V., et al.: FEP-Katalog für die VSG, Dokumentation, Bericht zum Arbeitspaket 7 - Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-283, 864 S., 2012.
- /WOL 19/ Wolf, J., Rübel, A.: Sicherheit in der Nachbetriebsphase, Teil 2. Präsentation, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Workshop zur Phase 1 der ÜsiKo, Bundesgesellschaft für Endlagerung mbH (BGE): Braunschweig, 23. Januar 2019.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 3.1	Darstellung zweier benachbarter ewG (ewG-Typ „multipler ewG“) nach /JOB 16/.....	10
Abb. 3.2	Das Verschlusskonzept des KBS-3-Konzeptes /SKB 11b/.....	18
Abb. 3.3	Sicherheitsfunktionen des KBS-3-Konzeptes bezogen auf den Einschluss der Radionuklide /SKB 11b/.....	21
Abb. 3.4	Sicherheitsfunktionen des KBS-3-Konzeptes bezogen auf die Rückhaltung der Radionuklide /SKB 11b/.....	25
Abb. 3.5	Schematische Darstellung des schwedischen KBS-3-Konzeptes durch lokations- und funktionsbezogenen Komponenten nach /FIS 17/.....	28
Abb. 3.6	Kategorisierung der Sicherheitsfunktionen im Vorhaben VerSi-II.....	29
Abb. 3.7	Anzahl an Erdbeben pro Jahr am Standort Olkiluoto in Abhängigkeit ihrer Magnitude /SAA 12/.....	44
Abb. 3.8	Zeitlicher Verlauf der Temperatur an der Behälteraußenseite für zwei unterschiedliche Bohrlöcher für verschiedene Rechenfälle /HÖK 10/.....	46
Abb. 3.9	Temperaturerhöhung des Wirtsgesteins am Standort Forsmark, 50 Jahre (links) und 1.000 Jahre nach simultaner Einlagerung der hoch radioaktiven Abfälle (rechts) /HÖK 10/.....	46

Tabellenverzeichnis

Tab. 3.1	Erläuterung der Verschlusskomponenten und deren Schutzfunktion	30
Tab. 3.2	Komponentenspezifische rückhaltende Sicherheitsfunktionen (RSF) für Kristallingestein (KBS-3-Konzept) nach /FIS 17/.....	31
Tab. 3.3	Komponentenspezifische integritätserhaltende Sicherheitsfunktionen (ISF) für Kristallingestein (KBS-3-Konzept) nach /FIS 17/	33
Tab. 4.1	Übersicht über die Sicherheitsfunktionen des VerSi-II Konzepts und des KBS-3 Konzepts mit möglichen Bewertungsgrößen (Indikatoren), deren Überprüfung die Verletzung eines Integritätskriteriums zeigen kann.....	56

Abkürzungsverzeichnis

BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
CHRISTA	Vorhaben „Machbarkeitsuntersuchung zur Entwicklung einer Sicherheits- und Nachweismethodik für ein Endlager im Kristallingestein“
EDZ	Excavation Disturbed Zone
ESK	Entsorgungskommission
FEP	Features, events and processes
ewG	einschlusswirksamer Gebirgsbereich
F&E	Forschung und Entwicklung
ISF	Integritätserhaltende Sicherheitsfunktion
KBS	Kärnbränslesäkerhet
NWMO	Nuclear Waste Management Organisation
RSF	Rückhaltende Sicherheitsfunktion
SF	Sicherheitsfunktion
StandAG	Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle
THMCB	Thermisch-hydraulisch-mechanisch-chemisch-biologisch
VerSi	Vorhaben „Vergleichenden Sicherheitsanalysen“
VSG	Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben

**Gesellschaft für Anlagen-
und Reaktorsicherheit
(GRS) gGmbH**

Schwertnergasse 1
50667 Köln

Telefon +49 221 2068-0

Telefax +49 221 2068-888

Boltzmannstraße 14

85748 Garching b. München

Telefon +49 89 32004-0

Telefax +49 89 32004-300

Kurfürstendamm 200

10719 Berlin

Telefon +49 30 88589-0

Telefax +49 30 88589-111

Theodor-Heuss-Straße 4

38122 Braunschweig

Telefon +49 531 8012-0

Telefax +49 531 8012-200

www.grs.de

ISBN 978-3-947685-08-0