

**Integritätsgefährdende
Prozesse in
internationalen
Sicherheitskonzepten
für die Wirtsgesteine in
Tonstein und Kristallin**

Integritätsgefährdende Prozesse in internationalen Sicherheitskonzepten für die Wirtsgesteine in Tonstein und Kristallin

Bericht zum Arbeitspaket 3

Weiterentwicklung des
internationalen Stands von
Wissenschaft und Technik zu
Methoden und Werkzeugen
für Betriebs- und Langzeit-
sicherheitsnachweise

Torben Weyand
Ingo Kock

September 2016

Anmerkung:

Das diesem Bericht zugrunde liegende FE-Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit unter dem Kennzeichen 3615103240 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:

Barrierewirksamkeit, Integrität, Kristallin, Sicherheitskonzept, Tonstein

Inhaltsverzeichnis

1	Zielsetzung.....	1
2	Sicherheitsanforderungen in Deutschland	3
2.1	Dilatanzkriterium.....	3
2.2	Minimalspannungs- bzw. Fluiddruckkriterium.....	4
2.3	Advektionskriterium	5
2.4	Temperaturkriterium	6
3	Internationale Sicherheitsanforderungen und Konzepte	9
3.1	Frankreich.....	9
3.2	Schweiz	10
3.3	Finnland.....	11
3.4	Schweden.....	13
4	Integritätsgefährdende Prozesse / Zustände (Salzgestein, national)	19
5	Integritätsgefährdende Prozesse / Zustände (Tonstein und Kristallin, international).....	25
5.1	Bergbauinduzierte Effekte (Auflockerungszone)	25
5.2	Gasbildung und -vorkommen.....	28
5.3	Wärmeeintrag	30
5.4	Erosionsprozesse	34
5.5	Neotektonische Aktivität.....	35
5.6	Seismische Aktivität (Erdbeben)	35
5.7	Vulkanismus	37
5.8	Glaziale Einflüsse	38
5.9	Geochemisches Milieu.....	39
5.10	Advektiver Grundwasserfluss.....	41
5.11	Mikrobielle Prozesse.....	42
5.12	Verkarstung	43

6	Diskussion	45
6.1	Integritätsbegriff Kristallin.....	45
6.2	Integritätsbegriff Tonstein	45
6.3	Vergleich integritätsgefährdender Prozesse zwischen Salz und Tonstein/Kristallin	47
7	Zusammenfassung	51
8	Ausblick	53
9	Literaturverzeichnis.....	55
	Abbildungsverzeichnis.....	71

1 Zielsetzung

Im Vorhaben „Weiterentwicklung des internationalen Stands von Wissenschaft und Technik zu Methoden und Werkzeugen für Betriebs- und Langzeitsicherheitsnachweise“ (Förderkennzeichen 3615I03240) soll der internationale Stand von Wissenschaft und Technik zur Integritätsanalyse für die Wirtsgesteine Salzgestein, Tonstein und Granit ermittelt werden. Es werden integritätsgefährdende Prozesse und Zustände für diese Wirtsgesteine identifiziert und das integritätsgefährdende Potential untersucht.

Der Begriff Integrität beschreibt den Erhalt der Eigenschaften des Einschlussvermögens des einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG) eines Endlagers /BMU 10/. Die Integrität eines Endlagers wird in Deutschland durch die Integritätskriterien nach /BMU 10/ überprüft. Bislang fanden diese Kriterien für das Wirtsgestein Salz Anwendung /KOC 12/, für das Wirtsgestein Tonstein werden diese aktuell überprüft /JOB 16/ und für das Wirtsgestein Kristallin ist eine Überprüfung offen /KOM 16/.

Integritätsgefährdende Prozesse und Zustände für das Wirtsgestein Salz wurden bereits in einer umfangreichen Studie zusammengefasst /HOT 10/. Diese werden im Folgenden kurz dargestellt und anhand aktueller Ergebnisse aus Fachtagungen überprüft und ggfls. aktualisiert.

Für die Wirtsgesteine Tonstein und Kristallin werden internationale Sicherheitskonzepte gesichtet und hinsichtlich integritätsgefährdender Prozesse und Zustände überprüft. Für das Wirtsgestein Tonstein werden die internationalen Studien der Schweiz und Frankreich gesichtet, für Kristallin die von Schweden und Finnland.

Abschließend werden die integritätsgefährdenden Prozesse und Zustände der internationalen Sicherheitskonzepte mit denen des Salzgesteins auf Basis von /HOT 10/ verglichen, um Parallelen und Unterschiede festzustellen. Soweit identifiziert und vorhanden werden internationale Integritätsnachweise benannt, um in zukünftigen Forschungsvorhaben zu prüfen inwieweit in Deutschland Integritätsnachweise für die Wirtsgesteine Tonstein und Kristallin durchgeführt werden können.

2 **Sicherheitsanforderungen in Deutschland**

In Deutschland sind grundlegende Anforderungen an eine Integritätsanalyse in den **Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle** /BMU 10/ festgeschrieben. Diese beziehen sich insbesondere auf das Fluiddruck- bzw. Minimalspannungskriterium (hydraulische Beanspruchung) und das Dilatanzkriterium (mechanische Beanspruchung). Die zu erwartenden Beanspruchungen dürfen nach /BMU 10/ die Dilatanzfestigkeiten der Gesteinsformationen des ewG, d. h. der Gebirgsfestigkeit, bei dessen Überschreitung Risse erweitert oder neu entstehen können, außerhalb der Auflockerungszone nicht überschreiten und der Fluiddruck darf die Fluiddruckbelastbarkeit nicht überschreiten, sodass kein erhöhter Zutritt von Grundwässern im ewG erfolgt /BMU 10/. Für Steinsalz wurden diese beiden Kriterien bereits angewandt /KOC 12/.

Für das Wirtsgestein Tonstein ist bislang nicht geklärt, inwiefern eine Integritätsanalyse nach den Sicherheitsanforderungen in Deutschland /BMU 10/ durchzuführen ist. Inwieweit Fluiddruck- und Dilatanzkriterium auf Tonstein übertragen werden kann und zusätzlich das Advektions- und Temperaturkriterium berücksichtigt werden muss ist Gegenstand des Forschungsvorhabens „Methodik und Anwendungsbezug eines **Sicherheitsnachweiskonzeptes** für ein HAW-Endlager im Tonstein“ (AnSicht, Förderkennzeichen 02E11061A) /JOB 16/, auf das auch im Folgenden eingegangen wird.

Da die Sicherheitsanforderungen nach /BMU 10/ in Hinblick auf Tonstein und Salz formuliert sind, ist nach Ansicht von /KOM 16/ zu überprüfen, ob ein Endlager im Kristallin durch die Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ vollständig abgedeckt ist. Hierzu gehören auch die Integritätskriterien und der Integritätsnachweis.

2.1 **Dilatanzkriterium**

Das Dilatanzkriterium beschreibt nach /BMU 10/, dass (mechanische) Beanspruchungen die Dilatanzfestigkeiten der Gesteinsformationen des ewG außerhalb der Auflockerungszone nicht überschritten werden dürfen. Dies dient dazu, die Auswirkung einer Schädigung des Gebirges infolge von mechanischen Beanspruchungen bewerten zu können. Für Salzgestein wurde u. a. von /CRI 98/, /HUN 03/ ein Dilatanzkonzept entwickelt, das in /KOC 12/ angewendet wurde.

Das Dilatanzkriterium gilt 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 die Volumenänderung eines Gesteinskörpers $\frac{d\varepsilon_{Vol}}{d\varepsilon_l}$ gleich null ist (oder negativ z. B. durch Kompaktion). Bei Verletzung des Dilatanzkriteriums können sekundäre Wasserwegsamkeiten z. B. durch Rissbildung entstehen (Sekundärpermeabilitäten).

$$\frac{d\varepsilon_{Vol}}{d\varepsilon_l} \leq 0 \quad (2.1)$$

Für Tonstein wurde bislang keine allgemeingültige und akzeptierte Formulierung der Dilatanzgrenze formuliert. In /JOB 16/ wird aktuell für numerische Modellberechnungen zur Integrität des ewG ein Ansatz für Tonstein abgeleitet, indem das Dilatanzkonzept von Salzgestein auf den Tonstein übertragen wird und Methoden zur experimentellen Bestimmung der Dilatanzfestigkeit/-grenze von Tonstein dargestellt werden. Aufbauend hierauf wird ein Ansatz für numerische Modellrechnungen ermittelt /JOB 16/. Es wird von /JOB 16/ vorgeschlagen, dass in Erweiterung zu den Sicherheitsanforderungen eine Schädigungsgrenze anstatt der Dilatanzfestigkeit als Grenzbedingung eingebracht wird.

2.2 Minimalspannungs- bzw. Fluiddruckkriterium

Das Minimalspannungs- bzw. Fluiddruckkriterium besagt, dass die zu erwartenden Fluiddrücke die Fluiddruckbelastbarkeiten der Gesteinsformationen des ewG nicht insofern überschritten werden dürfen, dass erhöht Grundwasser in den ewG zutreten /BMU 10/ kann. 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 angewendet und gilt als erfüllt, wenn die Summe aus der kleinsten Gebirgsdruckspannung zuzüglich einer zu überwindenden Zugfestigkeit kleiner ist als der Fluiddruck anstehender Fluide /KOC 12/.

Eine vereinfachte Beschreibung dieses Kriteriums ist das Laugendruckkriterium /HEU 11/. Nach diesem ist die Integrität des ewG gewährleistet, wenn die kleinste Hauptspannung nicht unter den Wert des in der entsprechenden Teufe anzunehmen-

den hydrostatischen Drucks fällt. Der hydrostatische Druck ergibt sich aus einer fiktiven bis zur Tagesoberfläche reichende Flüssigkeitssäule /SCH 02/. Dies bedeutet, dass eine mögliche zuzügliche Zugfestigkeit nicht betrachtet wird. Für einen Integritätsnachweis im Salzgestein wurde diese bislang vernachlässigt /KOC 12/.

Inwiefern das Minimalspannungs- bzw. Fluiddruckkriterium für Tonstein angewendet werden kann, wird in /JOB 16/ überprüft. Die effektiven Spannungen im ewG sollen nicht im Zugspannungsbereich liegen /JOB 16/. Für die Modellberechnungen zum Nachweis der Integrität sollen die folgenden Prozesse betrachtet werden, sofern ein signifikanter Einfluss auf das Rechenergebnis nicht durch vorlaufende Analysen ausgeschlossen werden kann /JOB 16/:

- Spannungsumlagerungen durch Auffahrung
- Wärmetransport
- Thermisch induzierte Ausdehnung des Fluids und des Gesteins
- Schrumpfen des Tonsteins
- Porendruckanstieg durch Gasentwicklung

2.3 Advektionskriterium

Die Ausbreitung von Schadstoffen durch die advektiven Transportprozesse sollen allenfalls vergleichbar mit der Ausbreitung durch diffusive Transportprozesse erfolgen /BMU 10/. Hieraus lässt sich ein Advektionskriterium ableiten, welches besagt, dass allein durch die Bewegung des Porenwassers keine gelösten Stoffe vom Einlagerungsbereich bis an den Rand des ewG transportiert werden dürfen /JOB 16/. Das im einschlusswirksamen Gebirgsbereich vorhandene Porenwasser darf demnach nicht am hydrogeologischen Kreislauf außerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs teilnehmen. Nach dem von /JOB 16/ abgeleiteten Advektionskriterium für Tonstein gilt es nachzuweisen, dass ein gelöster konservativer Tracer innerhalb des Nachweiszeitraumes nicht allein auf Grund der Bewegung des Porenwassers vom Einlagerungsbereich bis an den Rand des ewG transportiert werden kann. Hierfür werden numerische Modellrechnungen zum advektiven und dispersiven Transport empfohlen. Die wichtigsten zu berücksichtigen Ursachen des Transportes im Tonstein sind nach /JOB 16/:

- Natürlicher hydraulischer Gradient

- Wiederaufsättigung
- Gasproduktion und –transport
- Thermische Expansion und Kontraktion
- Konvergenz und Kompaktion

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/.

Für das Wirtsgestein Tonstein ist bislang nicht definiert, inwiefern die Barrierewirkung durch die Temperaturentwicklung unzulässig beeinflusst wird /JOB 16/. Thermisch induzierte für den Tonstein als Wirtsgestein integritätsgefährdende Prozesse wurden bis zu einer Temperatur von 150 °C betrachtet, da bei höheren Temperaturen nur unzureichend Daten vorhanden sind /JOB 16/. Folgende thermisch induzierte Prozesse wurden identifiziert und sind in /MEL 16/ detailliert dargestellt:

- Expansion und Kontraktion durch thermo-hydro-mechanische Effekte
- Dehydrierung quellfähiger Tonminerale
- Erzeugung eines hydraulischen Gradienten durch thermische Ausdehnung des Porenfluides
- Verdampfen von Wasser durch das Sieden von Gesteinsfluiden
- Erhöhung des Porendruckes und somit Widerstandes gegen das Eindringen von Gasen in den ewG
- Illitisierung von Smektiten / Smektitisierung von Illiten
- Zementierung durch Silica- und Illit-Neubildung
- Thermochemische Sulfatreduktion
- Kerogenumwandlung in Erdöl
- Mikrobielle Aktivitäten

Ein Temperaturanstieg im Tonstein wird positiv bewertet, wenn dadurch der Expansions-Kontraktions-Übergang überschritten wird, solange der Porendruck durch die thermische Expansion des Porenfluides nicht zu einer Rissbildung führt und das Fluidruckkriterium verletzt /JOB 16/. Zusätzlich begrenzt ein Temperaturanstieg die mikrobielle Aktivität, wodurch eine mögliche Gasproduktion verhindert und die Korrosionsrate eisenhaltiger Materialien gesenkt werden kann /JOB 16/.

3 Internationale Sicherheitsanforderungen und Konzepte

3.1 Frankreich

Die Entsorgung von radioaktiven Abfällen wird in Frankreich durch die Artikel L.541 und L.542 des Code de l'environnement /FRA 16/ geregelt. Hierbei werden keine grundlegenden Anforderungen an eine Integritätsanalyse festgelegt. In der Endlagerrichtlinie der Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN) werden geologische Standortanforderungen genannt /BOD 08/, die auf den Empfehlungen von /GOG 88/ basieren, die in /BOR 01/ zusammengefasst wurden, aus denen integritätsgefährdende Zustände und Prozesse abgeleitet werden können.

/AND 15/ geben einen Überblick über den aktuellen Kenntnisstand von Projekten bei der Suche eines Endlagers für radioaktive Abfälle. In Frankreich wurden als Wirtsgesteine ursprünglich Tonstein, Schiefer, Steinsalz und Kristallin untersucht. Inzwischen wird Tonstein favorisiert, genauer eine Tonformation aus dem Callovo-Oxfordium an der Grenze zwischen den Regionen Meuse und Haute-Marne. Im Untertagelabor Bure wird diese geologische Schicht in einer Tiefe von 400 m bis 600 m auf der Sohle 500 m untersucht, um die Eignung für ein Endlager für hoch radioaktive Abfälle zu überprüfen /AND 05a/. Hierzu hat die „French Waste Act of Parliament“ die **Agence Nationale pour la Gestion des Dechets Radioactifs (ANDRA)** mit dem Projekt „Cigéo“ beauftragt.

Vorgesehen ist ausschließlich die Endlagerung von Abfällen, die bei der Wiederaufbereitung von Brennelementen anfallen, d. h. verglasten Abfällen in Behälter aus rostfreiem Stahl. Die Behälter sollen die Einschusswirksamkeit der Abfälle für einen Zeitraum von 1.000 Jahren gewährleisten. Aus einem Synthesebericht der ANDRA zur Eignungsüberprüfung des Standortes Meuse/Haute-Marne als Endlager für hoch radioaktive Abfälle /AND 05b/, /AND 05a/ werden für das Wirtsgestein Tonstein integritätsgefährdende Prozesse und Zustände abgeleitet. Diese basieren auch auf den im Sicherheitskonzept definierten Sicherheitsfunktionen (Abb. 3.1). Zu diesen gehören

- die Beschränkung des advektiven Grundwasserflusses und Grundwasserzirkulation zwischen Endlager und Aquiferen,
- die Limitierung der Freisetzung von giftigen Stoffen und die Immobilisierung innerhalb des Endlagers,

- die Verzögerung und Abschwächung der Migration von giftigen Stoffen in die Umwelt,
- und der Erhalt von günstigen Eigenschaften der Gesteinsformation.

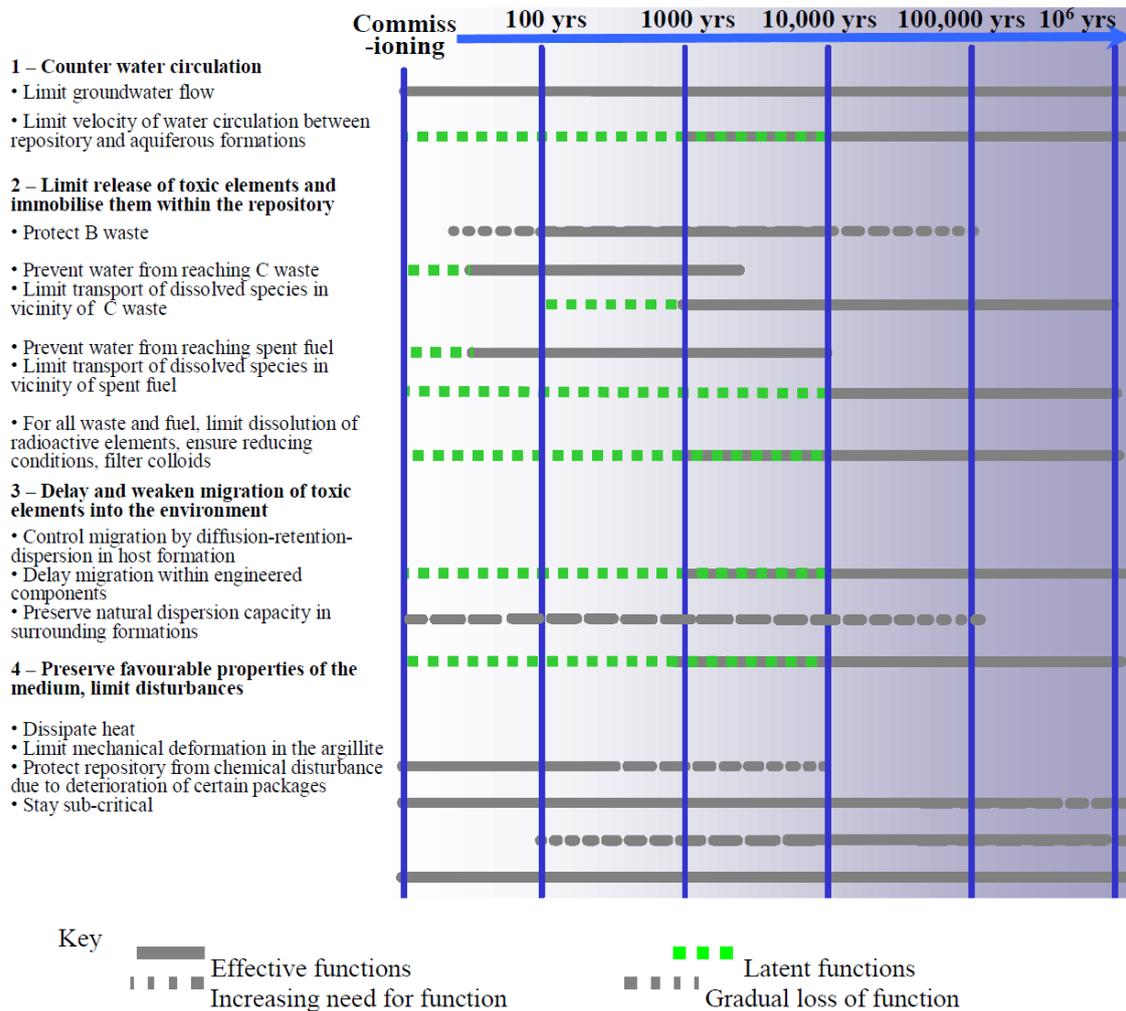


Abb. 3.1 Sicherheitsfunktionen im französischen Sicherheitskonzept mit Zeitskala /AND 05a/

3.2 Schweiz

Die Entsorgung von radioaktiven Abfällen wird in der Schweiz durch das **Kernenergiegesetz (KEG) /BSE 03/** und die **Kernenergieverordnung (KEV) /DSB 04/** geregelt. In der KEV werden in Artikel 5 keine grundlegenden Anforderungen an eine Integritätsanalyse gestellt, sondern der Bund legt in einem Sachplan die Ziele und Vorgaben für die Lagerung der radioaktiven Abfälle in geologischen Tiefenlagern verbindlich fest /DSB 04/. Ein Standort für ein geologisches Tiefenlager soll laut Artikel 11 /DSB 04/ günstige hydrogeologische Verhältnisse und eine geologische Langzeitstabilität besit-

zen. Gemäß den Vorgaben des KEG /BSE 03/ wurden spezifische Auslegungsgrundsätze für geologische Tiefenlager und Anforderungen an den Sicherheitsnachweis festgelegt /ENSI 09/. Auch hier wird der Begriff der Integrität nicht explizit genannt, allerdings soll die Wirkung und Robustheit der technischen und natürlichen Barrieren beschrieben und ein Nachweis für ihr Rückhaltevermögen durch Berechnungen aufgezeigt werden /ENSI 09/.

Für hochaktive Abfälle (HAA) wurde in der Schweiz ab 1985 zunächst die Option der Endlagerung im Wirtsgestein Kristallin verfolgt und das Felslabor Grimsel erbaut. Die guten felsmechanischen Eigenschaften von Kristallingesteinen sollten den Bau und Betrieb des Endlagers erleichtern und von den großräumigen ungestörten Gesteinsformationen im kristallinen Grundgebirge der Nordschweiz wurde eine geringe Wasserbewegung angenommen /BFE 08/.

Nach 1995 wurden auch Sedimentgesteine als potentielle Wirtsgesteine untersucht. Zu diesen gehörten zunächst das Rotliegende (Perm), Gipskeuper (Trias), Opalinuston (Jura), Effinger Schichten (Jura), Unter- und obere Süßwassermolasse (Tertiär). Ab 1996 wurde im Opalinuston das Felslabor Mont Terri errichtet und der Opalinuston als potentielles Wirtsgestein für hochaktive Abfälle in einer Endlagertiefe von 500 m bis 700 m ausgewählt, da dieser im Vergleich zu den anderen Sedimentgesteinen die besten sicherheitsgerichteten Vorteile erzielte /BFE 08/. Falls kein geeigneter Standort im Opalinuston gefunden wird, dient die **untere Süßwassermolasse (USM)** als Reserveoption. Durch die Beurteilung des Entsorgungsnachweises 2006 wurde gezeigt, dass sich der Opalinuston zur grundsätzlichen Machbarkeit eines geologischen Tiefenlagers in der Schweiz nach dem KEG eignet /BFE 08/. Als konkrete Standorte für ein Endlager für hochaktive Abfälle wurden die Gebiete Zürich Nordost, Jura-Ost und Nördlich Lägern vorgeschlagen, für die provisorische Sicherheitsanalysen /BFE 08/ durchgeführt wurden.

Diese provisorischen Sicherheitsanalysen sowie die Standortauswahlkriterien werden im verwendet um integritätsgefährdende Prozesse und Zustände zu identifizieren.

3.3 Finnland

Die regulatorischen Anforderungen für ein Endlager für hoch radioaktive Abfälle sind im finnischen Kernenergiegesetz geregelt /MTI 08/, auf dessen Basis die Sicherheitsan-

forderungen 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 Einschusswirksamkeit des Endlagersystems /STUK 14/. Daher wurde im Langzeitsicherheitsnachweis /POS 12a/ ein hinreichend zuverlässiger (*sufficient reliability*) Nachweis über 10.000 Jahre erbracht und darüber hinaus bis hin zu einer Million Jahre eine grundsätzliche Einhaltung der Sicherheitsfunktionen gezeigt /POS 12a/. Nach einer Million Jahre soll die Aktivität des hoch radioaktiven Abfalls die von natürlichem Uranerz entsprechen /POS 12a/

In Finnland stehen ausschließlich potentielle Standorte für ein Endlager für hoch radioaktive Abfälle für das Wirtsgestein Kristallin 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. Zu diesen gehören eine stabile tektonische Situation, eine gute Qualität des kristallinen Grundgebirges aus bergbautechnischer Sicht, reduzierende Bedingungen und günstige geochemische Eigenschaften des Grundwassers 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 und eine Beschädigung der Bentonitbarriere zu verhindern, werden die abgebrannten Brennelemente in den Kupferbehältern erst nach 20 bis 40 Jahren nach Entnahme aus den Reaktoren eingelagert.

Die integritätsgefährdende Prozesse und Zustände für das Wirtsgestein Kristallin und der in diesem Zusammenhang stehenden geotechnischen Barrieren werden auf Basis einer Sicherheitsanalyse von Posiva oy für den Standort Olkiluoto /POS 12a/, /POS 12b/, /POS 13/ identifiziert. Der Begriff der Integrität wird in den Sicherheitsanforderungen im Kontext der Behälterintegrität genannt /STUK 14/. Für die technischen Barrieren gelten folgende Sicherheitsfunktionen, die eingehalten werden sollen /STUK 14/:

- Immobilisierbarkeit der Radionuklide in der Abfallmatrix

- Korrosionsresistenz der Abfallmatrix
- Mechanische Belastbarkeit der Abfallmatrix
- Widerstand des Buffers gegenüber kleineren Gebirgsbewegungen

3.4 Schweden

Gesetzlich geregelt ist die Endlagerung radioaktiver Abfälle im „Swedish Radiation Safety Authority Regulatory Code“ /SSM 08b/, /SSM 08a/. 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 qualitativ bis eine Million Jahre mögliche externe Einflüsse wie Vergletscherung und Erdbeben auf die Barriernwirksamkeit aufgezeigt werden /SSM 08b/, /SSM 08a/. Die Sicherheitsanforderungen nach /SSM 08a/ schreiben vor, dass das Barriensystem allen *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 als Option zur Verfügung steht. 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) eingebettet werden. Das Wirtsgestein dient der mechanischen Stabilität des Endlagers, das keine Wasserdichtigkeit gewährleistet und soll nicht wesentlich zur Rückhaltung von Radionukliden beitragen /SKB 11a/. Daher wird der Begriff der Integrität in schwedischen Studien hauptsächlich für die Behälter verwendet. Insbesondere muss für die Kupferbehälter ein Nachweis hinsichtlich Druckbeständigkeit und Korrosion für 100.000 Jahre erbracht werden.

Die **Svensk Kärnbränslehantering AB** (SKB) führte für acht potentielle Standorte Machbarkeitsstudien durch, aus denen abschließend die Standorte Östhammar bei Forsmark und Oskarshamn in die nähere Auswahl gekommen sind. Ausgewählt wurde der Standort Forsmark, da das kristalline Wirtsgestein eine bessere Wärmeleitfähigkeit, eine höhere Dichte und einen geringeren Klüftungsgrad aufweist und somit am Stand-

ort Forsmark ein geringerer Wassereintrag als am Standort Oskarshamm erwartet wird. Für den Standort Forsmark wurde ein Langzeitsicherheitsnachweis /SKB 11a/ erstellt, der im Folgenden verwendet wird um integritätsgefährdende Prozesse und Zustände für das Wirtsgestein Kristallin und der in diesem Zusammenhang stehenden geotechnischen Barrieren zu identifizieren.

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 integritätsgefährdende Prozesse beschreiben /SKB 11b/:

- Korrosion der Kupferumantelung der Behälter (Can1)
- Isostatische Belastung der Behälter (Can2)
- Beanspruchungen durch Scherkräfte (Can3)

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 (Abb. 3.2). Der Bentonit in den Einlagerungslöchern soll

- einen hohen Quelldruck (> 1 MPa) erzeugen, sodass eine geringe hydraulische Leitfähigkeit ($10 - 12$ m/s) den advektiven Transport im Umfeld des Behälters begrenzt (Buff1),
- 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/m³ 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 die Rückhaltefunktion des Bentonits gefährden würden (Buff4),
- einen Quelldruck von mehr als $0,2$ MPa besitzen, sodass ein Absinken des Behälters ausgeschlossen wird (Buff5),

- und einen maximalen Quelldruck von 15 MPa aufweisen sowie keinen Temperaturen kleiner als -4 °C ausgesetzt sein, sodass keine unzureichenden Drücke auf den Behälter einwirken (Buff6).

Der Bentonit als Versatzmaterial in den Einlagerungsstrecken soll eine hohe Dichte besitzen, sodass die Sicherheitsfunktionen des Bentonits in den Einlagerungslöchern nicht unzulässig beeinflusst werden, d. h. seine sicherheitsrelevanten Eigenschaften verliert (BF1). Das umgebende Kristallin, d. h. die Geosphäre, soll chemisch günstige Bedingungen aufweisen (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 ist, sodass Korrosion und mikrobielle Aktivitäten minimiert werden (R1d),
- der pH-Wert kleiner 11 (R1e),
- und gleichzeitig größer als 4 ist und der Chloridgehalt kleiner 2 M ist, sodass eine chloridgesteuerte Korrosion der Behälter verhindert wird (R1f).

Der Radionuklidtransport im Kristallin soll minimiert werden, indem das Kluftnetzwerk eine Transportverzögerung bewirkt (R2a) und der Grundwasserfluss in Kontakt zwischen dem Bentonit in den Einlagerungslöchern und dem Kristallin möglichst gering ist (R2b). Eine günstige mechanische Stabilität des Kristallins 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 kleiner als 1 m/s sind (R3c). Die Gebirgstemperatur darf im Nachweiszeitraum nicht geringer als -4 °C sein, 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).

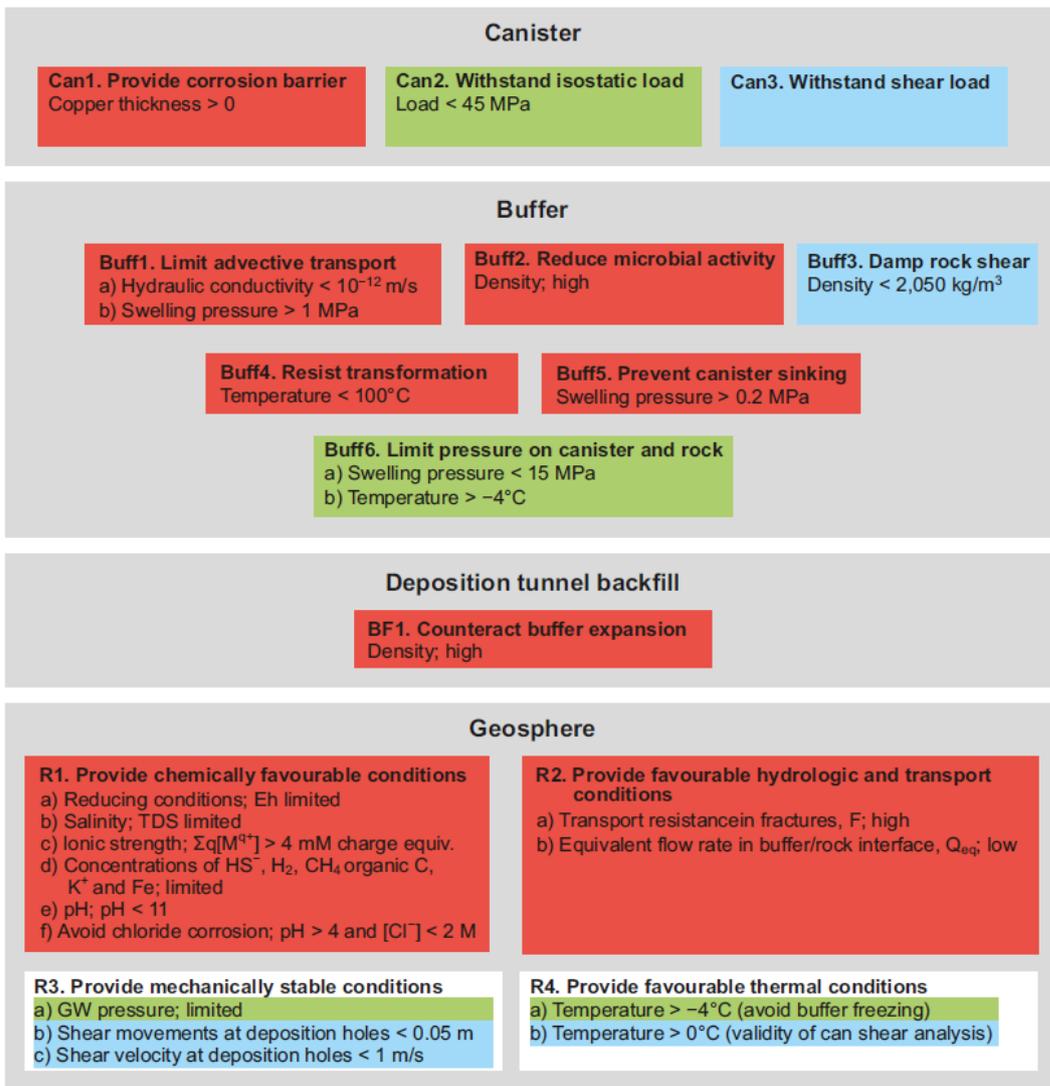


Abb. 3.2 Sicherheitsfunktionen zur Gewährleistung der Einschlußwirksamkeit /SKB 11b/

Als ein Kriterium wird in /SKB 11b/ auf der Basis von /MUN 06/ das sogenannte **Extended Full Perimeter Intersection Criterion (EFPC)** genutzt. Nach diesem darf es keine verbundenen Klüfte zwischen einem Bohrloch, in dem ein Behälter eingelagert ist, und der Einlagerungsstrecke geben sowie keine projizierten Klüfte auf Basis tatsächlicher wasserwegsamere Klüfte (Abb. 3.3). Des Weiteren dürfen die mit einem Bohrloch verbundenen Klüfte nicht mit vier oder mehr weiteren Bohrlöchern verbunden sein /SKB 11b/. Die effektive Transmissivität eines Bohrlochs 10^{-10} m²/s nicht übersteigen /SKB 09/.

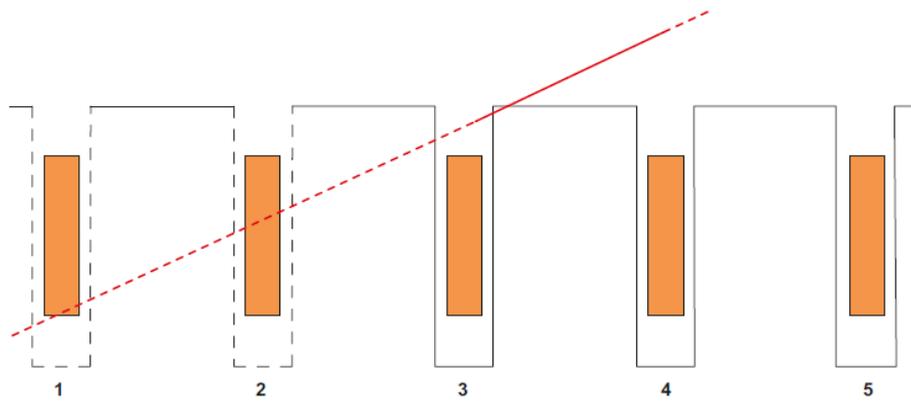


Abb. 3.3 Eine Kluft (durchgezogene rote Linie) verbindet die Einlagerungsstrecke mit Bohrloch 3 und verletzt somit das EFPC-Kriterium. Die Bohrlöcher 1 und 2 verletzen ebenfalls das EFPC-Kriterium, da eine Projektion der Kluft (rote gestrichelte Linie) diese ebenfalls mit der Einlagerungsstrecke verbindet

Einlagerungstunnel und -höhlräume für Behälter dürfen nicht durch größere Kluftzonen hindurchführen und zu nahe an ihnen liegen /AND 00/. Einlagerungshöhlräume dürfen auch kleinere identifizierte Kluftzonen nicht kreuzen.

4 Integritätsgefährdende Prozesse / Zustände (Salzgestein, national)

Die Behandlung der Integrität des Wirtsgesteins Salz in einem Langzeitsicherheitsnachweis und der damit im Zusammenhang stehenden potentiell integritätsgefährdenden Zustände, Ereignisse und Prozesse wurden in /HOT 10/ identifiziert. Diese wurden in /KOC 12/ für die Durchführung eines Integritätsnachweises für das Wirtsgestein Salz im Rahmen der Vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG) in Bezug auf die Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ betrachtet. Zu diesen gehören bergbauinduzierte Effekte, Gasbildung, die thermisch induzierte Volumenexpansion und kryogene Rissbildung, die thermische Zersetzung von Hydratsalzen, Subrosion, Epirogenese, Diapirismus, Seismizität, Vulkanismus und Impaktereignisse.

Bergbauinduzierte Effekte durch das Auffahren eines Grubengebäudes, aus denen eine erhöhte Sekundärporosität und –permeabilität in der Auflockerungszone entsteht und als Migrationspfad für Fluide dient. Deren Ausdehnung im Bereich weniger Meter stellt im Allgemeinen keine Gefährdung für die Integrität der geologischen Barriere dar, da diese eine Mächtigkeit von mehreren hundert Metern besitzt /HOT 10/.

Gasbildung wie durch Metallkorrosion, mikrobielle Zersetzung und Radiolyse können integritätsgefährdend wirken, sofern die Gasdrücke oberhalb des Gebirgsdrucks entstehen und die daraus resultierenden Spannungen im Gebirge höher sind als die minimale Hauptspannung /RSK 05/. Die Radiolyse wird als unbedeutend eingestuft, da diese nur in geringem Maße auftritt und bei 3,5 MPa eine Rückreaktion eintritt, die den Effekt der Radiolyse aufhebt /SCH 08b/. Bislang ist nicht hinreichend genau untersucht, ob bzw. mit welcher Intensität mikrobielle Prozesse im Steinsalz unter endlagerrelevanten Bedingungen einen Einfluss auf die Integrität besitzen, da Mikroorganismen bei hohen Temperaturen (vermutlich 80 °C – 100 °C) nicht überlebensfähig sind /BRA 14/ und somit die mikrobielle Zersetzung vernachlässigt werden könnte. Die Gasbildung in einem Endlager in Salzgestein resultiert vorrangig aus der Korrosion metallischer Bestandteile, die hauptsächlich zur Wasserstoffbildung führt /RÖH 02/.

Eine **thermisch induzierte Volumenexpansion** des Gesteins kann potentiell zu einer Verletzung des Fluiddruckkriteriums führen und somit die Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereich eines Endlagers im Steinsalz gefährden. Verstärkt werden kann dieser Effekt durch Fluideinschlüsse im Salzgestein, da diese höhere thermische Ausdehnungskoeffizienten als das Wirtsgestein besitzen. Bisherige Untersuchungen (am Beispiel des Salzstockes Gorleben) zeigten allerdings keine Integritätsgefährdung des

einschlusswirksamen Gebirgsbereiches auf. Dennoch sollte die Auswirkung einer thermisch induzierten Volumenexpansion standortspezifisch beurteilt werden, um eine Integritätsgefährdung auszuschließen.

Thermomechanische Spannungen können in Folge thermischer Expansion zu einer **thermisch induzierten Rissbildung** führen. Diese erfolgt entweder durch einen Temperaturgradienten oder durch unterschiedliches Wärmeausdehnungsverhalten von Materialinhomogenitäten /HOT 10/. In /KOC 12/ wurde die thermomechanische Beanspruchung infolge einer Kaltzeit am Beispiel des Salzstockes Gorleben untersucht. Insbesondere sollte ermittelt werden, ob die von der Abkühlung des Salzstockes induzierten Zugspannungen kryogene Risse erzeugen können. Eine potentielle Gefährdung durch kryogene Rissbildung konnte in diesem Beispiel nicht gezeigt werden und wurde daher vernachlässigt /KOC 12/. Die Bildung kryogener Risse sollte im Salzgestein allerdings nicht im Allgemeinen ausgeschlossen, sondern standortspezifisch berechnet und beurteilt werden.

Ein Wärmeeintrag bei Anwesenheit von Hydratsalzen (z. B. Polyhalit) im Wirtsgestein führt bei Erreichen einer mineralspezifischen und u. a. druckabhängigen Grenztemperatur zur **Zersetzung bzw. Umwandlung des Hydratsalzes** und setzt Kristallwasser frei. Freigesetztes Kristallwasser kann ein potentielles Transportmedium für Radionuklide sein und die Abnahme des Feststoffvolumens kann zu Wegsamkeiten für Fluide und somit zu einer Erhöhung der Permeabilität führen. Durch die Kristallwasserfreisetzung infolge der thermischen Zersetzung von Hydratsalzen kann der Fluiddruck ansteigen und zu einer Verletzung des Fluiddruckkriteriums beitragen. Daher werden in Sicherheitskonzepten ausreichende Abstände zu hydratsalzhaltigen Formationen gefordert, um die Temperatureinwirkung auf Hydratsalze so zu begrenzen, dass Zersetzungen bzw. Umwandlungen ausgeschlossen werden können.

Subrosion bezeichnet den unterirdischen Prozess, der zum Abtrag des Salzstockes durch die Auflösung von Salz durch den Kontakt mit ungesättigtem Grundwasser führt. Dies führt bei einem Salzstock zum Absinken des Salzspiegels und reduziert somit den Abstand zwischen Salzspiegel und Einlagerungsbereich. Die kann über sehr lange Zeiträume den Einlagerungsbereich unterirdisch freilegen und zum Verlust der Integrität der Salzbarriere führen /HOT 10/.

Langzeitige und großräumige vertikale Bewegungen der Erdkruste werden als **Epirogenese** bezeichnet, die in Verbindung mit dem Aufstieg des Salzes infolge seiner ge-

ringeren Dichte als umliegendes Gestein (**Diapirismus**), zu einer Freilegung des Einlagerungshorizontes innerhalb des Nachweiszeitraumes führen und somit die Integrität der Salzbarriere gefährden kann /HOT 10/. Daher wurden bereits in /AKE 02/ gefordert, dass eine Endlagerregion keine großräumigen Hebungen von mehr als einem Millimeter pro Jahr im Nachweiszeitraum aufweisen darf.

Um besonders gefährdete Erdbebengebiete als Endlagerregion auszuschließen, wird in /AKE 02/ gefordert, dass die **seismische Aktivität** in der Endlagerregion nicht größer sein darf als Erdbebenzone 1 nach DIN 4149 /DIN 05/. Darüber hinaus werden Erdbeben nicht näher im Integritätsnachweis betrachtet, auch weil Salzstöcke gegenüber Erdbeben durch ihre viskoelastisch-plastischen Eigenschaften relativ unempfindlich gegenüber seismischer Aktivität sind /HOT 10/ und bisher keine Auswirkungen ehemaliger Erdbeben auf Salzstöcke gefunden werden konnten /KEL 01/.

Um die Integrität der Salzbarriere durch einen Magmenzutritt nicht zu gefährden, darf in der Endlagerregion kein quartärer oder im Nachweiszeitraum zu erwartender **Vulkanismus** vorliegen /AKE 02/. Zusätzlich wird ein Sicherheitsabstand von mindestens 10 km empfohlen, damit auch Thermospannungen und Erdbeben infolge des Vulkanismus die Barriereintegrität nicht gefährden /HOT 10/.

Nach Einschätzung von /HOT 10/ können **Impaktereignisse** die Integrität einer Salzbarriere dann gefährden, wenn ein Meteorit mit einem Durchmesser von 100 Metern in einer Zone von 3 km² im Bereich des Endlagers einschlagen würde /HOT 10/. Der Impaktkrater wäre so groß, dass der Einlagerungsbereich freigelegt werden könnte. Für ein solches Szenario wurde eine Einschlagswahrscheinlichkeit von 10⁻⁵ berechnet, so dass dieser Fall in einem Integritätsnachweis nicht näher betrachtet werden sollte /HOT 10/. Nach /HER 13/ beträgt die Frequenz eines integritätsgefährdenden Impaktereignis bei 10⁻¹² pro Jahr. Auch ein Einschlag im Ozean mit einer daraus resultierenden Überschwemmung der Endlagerregion würde die Integrität nicht gefährden, da die Erosion durch eine Flutwelle (Erdbebenwoge, Tsunami) nur oberflächennah wirkt und die hydrogeologischen Verhältnisse im Einlagerungsbereich nicht verändert würden /HOT 10/.

Entscheidend für den sicheren Einschluss in Salzformationen ist eine ausreichend mächtige geologische Barriere, die im unverritzten Zustand als grundsätzlich geologisch dicht charakterisiert wird /KOC 12/. Natürliche Analoga belegen, dass eine geologische Barriere aus Salzgestein die Anforderungen für den sicheren Einschluss erfül-

len kann /MIN 15a/, /MIN 15b/. Das Integritätsverhalten von unverritztem Salzgestein kann nach /MIN 10b/ nur durch induzierte Spannungs- und Verformungsfelder sowie hydraulische Belastungen beeinflusst werden. Zu diesen gehören geogene Vorgänge sowie bergbauinduzierte, thermomechanische und Fluiddruck-generierte Beanspruchungen. Die folgenden drei Prozesse sind nach /MIN 12b/, /MIN 10a/ entscheidend für den Integritätsverlust von Salinarbarrieren:

- Mechanische Beanspruchungen durch Überschreitung der Dilatanzgrenze, die überwiegend in der Auflockerungszone der anthropogen geschaffenen Hohlräume (EDZ) relevant sind und eine stark begrenzte Reichweite in die geologische Barriere hinein besitzen (Dezimeter- bis Meterbereich, d. h. im Nahfeld).
- Konvergenz- und thermomechanisch bedingte Spannungsumlagerungen, welche die Dilatanzgrenze überschreiten können und abhängig von der Größe des Einlagerungsfeldes und der damit verbundenen thermisch induzierten Beanspruchungen relevant für die geologische Barriere sind (Dekameter bis einige hundert Meter, d. h. Fernfeld).
- Fluiddruck-getriebene Generierung von hydraulischen Fließwegen entlang von Diskontinuitäten im mikro- und makroskopischen Maßstab im Salinargebirge (z. B. Korngrenzen, Schichtflächen) bei Überschreitung des Minimalspannungskriteriums /MIN 12a/.

Der Erhalt der Eigenschaften des Einschlussvermögens von Salzgestein gilt als rechnerisch nachgewiesen, wenn das Dilatanz- und das Fluiddruckkriterium /BMU 10/ in einem ausreichend mächtigen Bereich um das Endlagerbergwerk unverletzt bleiben und somit eine Bildung von Wegsamkeiten von wasserführenden Schichten bis in den Einlagerungsbereich aus geomechanischer Sicht ausgeschlossen werden kann /KOC 12/.

Für diesen Nachweis der Integrität von Salinarbarrieren werden numerische Modellierungen empfohlen /KOC 12/. Die Qualität und Aussagekraft der Ergebnisse ist abhängig von den vorliegenden Materialmodellen bzw. Stoffgesetzen. Hierzu wird der aktuelle Stand von Wissenschaft und Technik auf Salzmechanikkonferenzen vorgestellt /BER 12/, /IFG 15/, /LUX 07/, /RES 12/. Für eine Modellierung müssen nach /KOC 12/ möglichst detailliert die folgenden standortspezifischen Daten bekannt sein:

- Geologische Struktur des Salzstocks einschließlich Deck- und Nebengebirge

- Technisches Einlagerungskonzept einschließlich Einlagerungsgeometrie
- Gebirgstemperatur- und Gebirgsspannungszustand vor Beginn der Einlagerung
- Thermische und mechanische Materialeigenschaften des Gebirges

Eine Analyse von Versagensfällen von Salinarbarrieren im Kali- und Steinsalzbergbau /MIN 12b/, /MIN 10a/, /MIN 10b/ zeigt, dass relativ mächtige Salinarbarrieren unter statischen Beanspruchungen ohne durchgehende dilatante Schädigung undicht geworden sind. Verantwortlich hierfür war die fluiddruck-getriebene Generierung hydraulischer Fließwege, sobald der Wasserdruck größer als die minimale Hauptspannung bzw. Normalspannung entlang der Korngrenzen der Salzgesteine war /KOC 12/.

5 Integritätsgefährdende Prozesse / Zustände (Tonstein und Kristallin, international)

5.1 Bergbauinduzierte Effekte (Auflockerungszone)

Eine bergbaubedingte Auflockerungszone (häufig als EDZ abgekürzt, d. h. **Excavation Disturbed Zone**) kann wirtsgesteinsunabhängig als potentieller Migrationspfad für Fluide dienen. und somit, vor allem in Kombination mit anderen FEP (**Feature, Event, Process**) /HOT 10/, die Einschlusswirksamkeit eines Endlagers gefährden /AND 05a/.

Als günstig werden im Tonstein sehr kleine Auflockerungszonen mit einem hohen Selbstabdichtungspotential des Wirtsgesteins zur Wiederverschließung dieser angesehen /ZUI 08/. Durch die Auflockerungszone soll idealerweise keine durchgehende hydraulische Verbindung entlang der Einlagerungs- und Versiegelungsstrecken hergestellt und kein hydraulischer Kurzschluss zwischen hydraulisch wirksamen Störungszonen hergestellt werden /ZUI 08/. Als günstig bis bedingt günstig wird eine Auflockerungszone beschrieben, die wenig bis teilweise relevant, aber nicht dominierend für den Radionuklidtransport ist /ZUI 08/.

Im Tonstein (Callovo-Oxfordium-Formation) wurde die Auflockerungszone in eine innere geklüftete Zone und eine äußere Zone mit Mikrorissen unterteilt (Abb. 5.1) /AND 05a/.

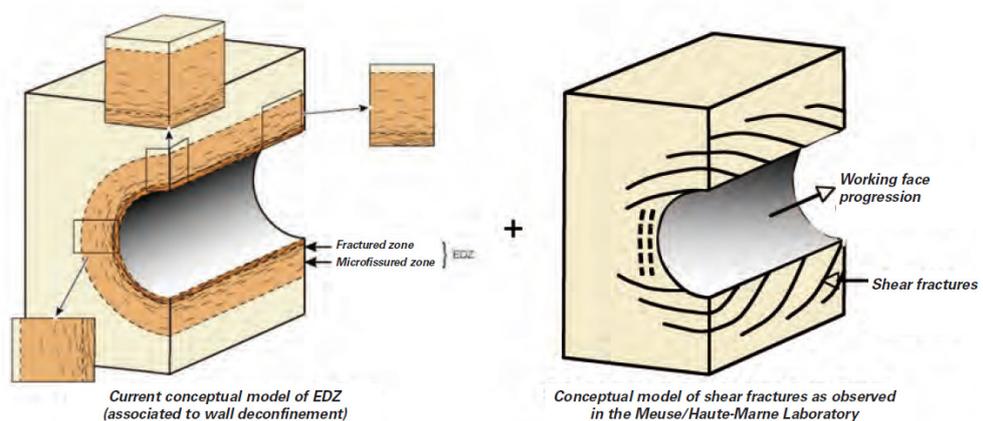


Abb. 5.1 Konzeptionelle Darstellung der Auflockerungszone (links) mit geklüfteten Zonen (links) und beobachteten Scherbewegungen im Gestein (rechts) am Beispiel des Meuse/Haute-Marne Untertagelabores /AND 05a/

Die innere geklüftete Zone ist räumlich stark begrenzt (bis zu ein Drittel des Strukturradius) und besitzt eine hydraulische Durchlässigkeit von bis zu $5 \cdot 10^{-9}$ m/s /AND 05a/. Wenn die Strukturen parallel zur maximalen Hauptspannung, idealerweise in einer geringeren Tiefe (z. B. 500 m) für eine geringerer Auflast, aufgefahren werden, reduziert sich die räumliche Begrenzung der geklüfteten Zone auf ein Zehntel des Strukturradius /AND 05a/.

Die äußere Zone mit Mikrorissen besitzt eine sehr geringe hydraulische Durchlässigkeit ($5 \cdot 10^{-11}$ m/s), da die Mikrorisse nicht durchgängig miteinander vernetzt sind /AND 05a/. Mikrorisse infolge von Scherspannungen konnten bis zu einer Entfernung von 2,5 m in das Wirtsgestein hinein beobachtet werden, die bei der maximalen Distanz zur Struktur eine hydraulische Durchlässigkeit von weniger als 10^{-12} m/s besitzen /AND 05a/.

Innerhalb des Einlagerungsbereiches dürfen sich um Strecken oder Einlagerungshohlräume herum keine großen Stabilitätsprobleme aufgrund der Festigkeit, Klüftung und Anfangsbeanspruchungen des Gebirges ergeben /AND 00/. Die Stabilität soll durch geomechanische Analysen überprüft werden. Hierbei werden die Tunnelgeometrie, die Festigkeits- und Verformungseigenschaften des intakten Gesteins, die Geometrie des Klufsystems sowie die anfänglichen Gesteinsbeanspruchungen untersucht /AND 00/. Infolge einer Schachtabsenkung können mechanische Störungen im Wirtsgestein entstehen, welche die Barrierewirksamkeit unzulässig beeinflussen können /AND 05a/. Um das Ausmaß festzustellen und zu quantifizieren wird ein Monitoring-Konzept empfohlen, das entlang des Schachtes installiert wird und Deformationen, Spannung, Permeabilität und Variationen in der seismischen Geschwindigkeit durch geophysikalische Methoden misst. Hierdurch entsteht eine detaillierte Charakterisierung des geomechanischen Verhaltens des Wirtsgesteins und der Auswirkung einer Schachtabsenkung auf die Integrität /AND 05a/.

Der thermische Einfluss wärmeentwickelnder Abfälle auf die Auflockerungszone im Tonstein wurde von /AND 05a/ untersucht. Unter Berücksichtigung einer maximalen Grenztemperatur von 100 °C stieg die Temperatur in der Auflockerungszone auf maximal 70 °C und eine Veränderung der mechanischen Eigenschaften wurde nicht festgestellt /AND 05a/.

Eine bergbaubedingte Auflockerungszone im Kristallingestein kann grundsätzlich die Langzeitsicherheit des Endlagers gefährden, da der Grundwasserzufluss infolge eines vernetzten Klufnetzwerkes im Umfeld der Behälter unzulässig erhöht und somit die

Transportverzögerung durch das Wirtsgestein verringert werden kann /POS 13/, /SKB 11b/. Die Auflockerungszone ist im Kristallingestein aufgrund seiner mechanischen Eigenschaften allerdings auf eine wenige Zentimeter mächtige konturnahe Zone beschränkt /SKB 11d/. Diese Aussage basiert auf Messungen in vertikalen, mit Einlagerungsbohrlöchern vergleichbaren, Bohrungen im Kristallingestein, die nach Ansicht von /MUS 10/, /SKB 11d/ kein durchgängig vernetztes Kluftnetzwerk erwarten lassen. In Abhängigkeit der aufzufahrenden Struktur (Schacht, Einlagerungsstrecke, Einlagerungsbohrloch) werden verschiedene Bohrverfahren eingesetzt, um das Ausmaß und die Konnektivität einer Auflockerungszone bzw. dessen Kluftnetzwerk zu minimieren /POS 13/. Am stärksten ausgeprägt ist die Auflockerungszone an dem First der Einlagerungsstrecken /POS 13/. Dort beträgt die Transmissivität bis zu 10^{-8} m²/s, in anderen Teilen lediglich 10^{-12} m²/s /MUS 10/. /HAR 10/, /KOS 09/ folgern aus der starken räumlichen Begrenzung (max. 30 cm Eindringtiefe) und der geringen Transmissivität der Auflockerungszone, dass deren Auswirkung auf den Grundwasserzufluss stark beschränkt ist. Selbst bei einer stark erhöhten Transmissivität wurde der Effekt der Auflockerungszone auf die Flussrate und die Transportverzögerung auf Basis von Modellergebnissen als nicht signifikant eingeschätzt /HAR 13/.

Mögliche Abschalungen im Kristallingestein können nur dann auftreten, wenn die Einlagerungslöcher in Richtung der maximalen horizontalen Hauptspannung verlaufen /SKB 11d/. Dies würde im schwedischen Sicherheitskonzept im ungünstigsten Fall ca. 100 – 200 von 6.000 Einlagerungsbohrlöchern betreffen /BEU 16/. Diese werden als vernachlässigbar angesehen, da die Dicke der Abschalungen lediglich ca. 5 cm beträgt und einfach detektierbar sind /SKB 11d/.

Sicherheitsrelevante bergbauinduzierte Erdbeben durch die Reaktivierung von Klüften während der Auffahrung werden ausgeschlossen, da hierdurch die in den schwedischen Sicherheitsfunktionen der Behälter vorgeschriebene maximale Magnitude von fünf nicht erreicht werden kann /SKB 11d/. Dies gilt als nachvollziehbar /BEU 16/. Im Rahmen des finnischen Sicherheitskonzeptes wurden Messungen der Seismizität infolge einer Auffahrung von Einlagerungsbohrlöchern im Wirtsgestein Kristallin 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/.

5.2 Gasbildung und -vorkommen

Durch die Korrosion von Metallen bzw. organischen Materialien in radioaktiven Abfällen oder auch durch Radiolyse können Gase wie z. B. Wasserstoffgas gebildet werden /ENSI 10/. Eine Gasbildung kann durch die Volumenexpansion und den Druckaufbau im Tonstein zu einer mechanischen Schädigung des Wirtsgesteins und somit zur Bildung von neuen Wasserwegsamkeiten für Radionuklide im Wirtsgestein führen. Dies wird im schweizerischen Standortauswahlverfahren unter dem Kriterium „Verhalten des Wirtsgesteins bezüglich Gas“ behandelt. Um die Gasbildung bzw. ihre Auswirkungen in Endlagern für hochradioaktive Abfälle zu minimieren, wird das Behältermaterial so gewählt, dass eine mögliche Korrosion minimiert wird und der Einschluss im Behälter über einen möglichst langen Zeitraum gewährleistet wird /SCH 08a/. Eine kontrollierte Ableitung von Gasen über Versiegelungsstrecken bzw. Speicherung in untertägigen Speicherräumen ist denkbar, um die Barriewirksamkeit des Wirtsgesteins nicht zu beeinträchtigen /ZUI 08/. Für das Kriterium „Lagerbedingte Einflüsse“ wird es als sehr günstig beschrieben, wenn Gase (ohne Radionuklide) durch das Wirtsgestein entweichen können, sodass kein erhöhter Druckaufbau entsteht und keine Klüfte gebildet werden /ZUI 08/.

Neben der Gasbildung wird im schweizerischen Standortauswahlverfahren auch das Kriterium „Natürliche Gasführung im Wirtsgestein“ und deren Auswirkung auf die Barriewirksamkeit behandelt. Gasvorkommen in der Nähe des Endlagerbereiches sollen vermieden werden, auch damit keine natürlichen Gase in das Endlager eindringen und den Gasdruck im Endlager erhöhen können. Das Vorkommen von natürlichen Gasvorkommen wird von der schweizerischen Unfallversicherungsanstalt in Gefahrenstufen eingeordnet (Abb. 5.2) /SUVA 02/. Im schweizerischen Standortauswahlverfahren ist festgelegt, dass keine natürlichen Gasvorkommen der Gefahrenstufe 4 in der Nähe des Endlagers existieren dürfen, um einen erhöhten Gaszutritt in das Endlager zu verhindern /ZUI 08/.

Gefahrenstufe	Möglichkeit eines Gasvorkommens	Möglichkeit einer Überflutungsgefahr	zu erwartendes Ausgasverhalten
0	nicht gegeben	–	–
1	Gasvorkommen möglich oder sicher	keine Überflutungsgefahr	Ausgasen während kurzer Zeit
2			Ausgasen während langer Zeit
3		mit Überflutungsgefahr	Ausgasen während kurzer Zeit
4			Ausgasen während langer Zeit

Abb. 5.2 Gasgefahrenstufen bei der Erstellung von Untertagebauten /SUVA 02/

In Gefahrenstufe 4 sind Gasvorkommen in der zu untersuchenden Gesteinsformation möglich oder sind bereits gesichert nachgewiesen („möglich oder sicher“) und besitzen eine Überflutungsgefahr mit Ausgasung aus der Gesteinsformation in die Grubenbaue über einen langen Zeitraum. Als Überflutungsgefahr wird das Austreten von Gas in großen Mengen pro Zeiteinheit aus dem Gestein, aus Klüften oder anderen Hohlräumen verstanden, das bei einer Bewetterung mit einer Lüftungsgeschwindigkeit von 0,5 m/s dennoch zu einer Überschreitung des Grenzwertes von 1,5 Vol-% Methan führt /SUVA 02/.

Als sehr günstige Eigenschaft für das Kriterium „Lagerbedingte Einflüsse“ wird die Gefahrenstufe 0 empfohlen /ZUI 08/, d. h. die Möglichkeit eines Gasvorkommens ist nicht gegeben /SUVA 02/. Falls Gasvorkommen im Wirtsgestein möglich sind, sollte eine Überflutungsgefahr ausgeschlossen werden und ein Ausgasen nur während kurzer Zeit erfolgen /ZUI 08/. Diese Forderung entspricht den Gefahrenstufen 2 bzw. 3 (Abb. 5.2).

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 der Kupferbehälter gewährleistet werden /SKB 11d/. Als korrosionsbeschleunigend gilt die Präsenz von Lösungen bei niedrigen pH-Werten, sodass Wasserstoffgas entstehen kann /SZA 07/. Die Anwesenheit von Wasserstoffgas im Nahfeld der Kupferbehälter besitzt einen Einfluss auf die Korrosionsrate von Kupfer, die genaue Auswirkung ist derzeit Bestandteil von Forschungsar-

beiten /BEC 11/, /POS 13/. 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/.

Eine Gasfreisetzung 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 kann, sodass das 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 als Diffusion möglich /SKB 11d/.

5.3 Wärmeeintrag

Durch die Einlagerung von hoch radioaktiven Abfällen wird die Temperatur in den technischen Barrieren bzw. des Wirtsgesteins erhöht. Hierdurch können sicherheitstechnische Eigenschaften (z. B. Quellfähigkeit des Bentonits, Anstieg des Porenwasserdrucks) der technischen und geologischen Barrieren beeinträchtigt werden /SCH 08a/. Die Wärmeentwicklung in einem Endlager darf daher nicht zu Temperaturen führen, welche die sicherheitsrelevanten Eigenschaften der technischen und geologischen Barrieren signifikant beeinträchtigen /ENSI 10/. Durch standortspezifische Labor- und In-Situ-Versuche sowie gekoppelte Modellierungen soll der thermische Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften des Wirtsgesteins sowie eine mögliche Veränderung seiner Mineralphasen untersucht werden /GOG 88/. Hierzu kann die Betrachtung von thermo-hydro-mechanischen Effekten wie dem Expansions-Kontraktionsübergang des Tonsteins und chemisch-biologisch-mineralogische Effekte wie der Wechselwirkung mit Wasserdampf und eine H₂-induzierte Pyritreduktion gehören, welche die Barrierewirkung von Tonstein nach /JOB 15b/, /JOB 16/ beeinträchtigen können.

Im Sicherheitskonzept von Frankreich wurde für die Behälteroberfläche eine maximale Grenztemperatur von 100 °C, im Wirtsgestein von 90 °C festgelegt /AND 05a/. Ferner darf eine Grenztemperatur von 70 °C im Wirtsgestein nicht länger als 1.000 Jahre überschritten werden, um irreversible Mineralveränderungen zu verhindern /AND 05a/. Weiterer Forschungsbedarf besteht zur Verbesserung des Verständnisses der thermisch-hydraulisch-mechanischen (THM) Eigenschaften der Bentonitverfüllungen, insbesondere für das Verhalten des Bentonits bei Temperaturen deutlich über 100 °C

/ENSI 10/. Langjährige Forschungsprojekte hierfür wurden bereits initiiert /NAG 08/ und von /ENSI 12/ näher beurteilt. In zweidimensionalen Modellrechnungen im Sicherheitskonzept der Schweiz wurde die Wärmeausbreitung berechnet und gezeigt, dass das Temperaturfeld um 20 °C bis maximal 50°C erhöht wird. Thermisch induzierte Zugspannungen und somit die Bildung von Rissen und neuen Wasserwegsamkeiten im Opalinuston konnten nicht aufgezeigt werden /HUF 05/. In Sicherheitsanalysen der NAGRA konnte nicht ausgeschlossen werden, dass durch den Wärmeeintrag der bestrahlten Brennelemente und verglasten Abfällen der innerste Teil der Bentonit-Barriere beeinträchtigt wird, aber eine bedeutende Auswirkung auf das Barrierenverhalten des Gesamtsystems wurde ausgeschlossen /JOH 02a/, /JOH 02b/.

Der Wärmeeintrag führt zu einer thermisch induzierten Expansion des Wirtsgesteins, die Spannungen erzeugt und zu einer Deformation des Wirtsgesteins führen kann. Lokale Gesteinsschädigungen infolge mechanischer Spannungen sollen minimiert werden. Ferner sollen die Entstehung bzw. die Reaktivierung von Störungen durch einen Wärmeeintrag vermieden werden. Da die radioaktiven Abfälle Spaltprodukte enthalten, soll eine Kritikalität durch eine Begrenzung des Wärmeeintrages ausgeschlossen werden /AND 05a/.

Als thermisch induzierte Prozesse, die sich auf die Behälterintegrität in einem Endlager für hoch radioaktive Abfälle im Kristallingestein auswirken und somit die Sicherheitsfunktionen (s. Abb. 3.2) unzulässig beeinflussen können, werden in /SKB 11c/ fünf verschiedene genannt:

- 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.

- Klüftung des Gesteins, welches einen Einfluss auf die geometrische Anordnung der Bohrlöcher haben und (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 gen 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 11d/. Berechnungen des Temperaturfeldes zeigen, dass maximal Temperaturen von 95 °C an der Behälteraußenseite erreicht werden (Abb. 5.3) und die Gesteinstemperatur um maximal 28 °C nach 50 Jahren nach simultaner Einlagerung ansteigt /HÖK 10/ (Abb. 5.4).

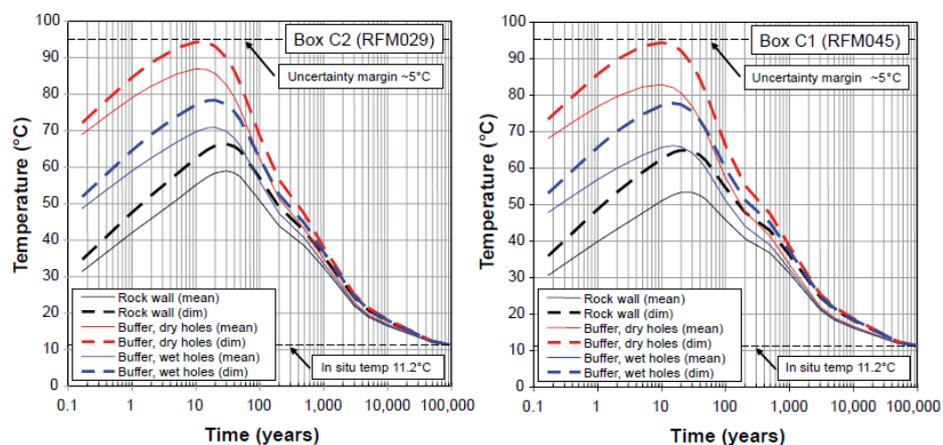


Abb. 5.3 Zeitlicher Verlauf der Temperatur an der Behälteraußenseite für zwei unterschiedliche Bohrlöcher für verschiedenen Rechenfälle /HÖK 10/

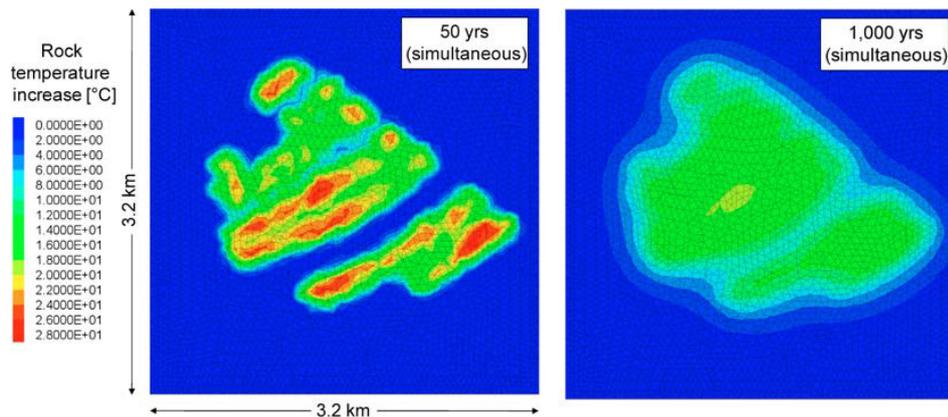


Abb. 5.4 Temperaturerhöhung des Wirtsgesteins am Standort Forsmark, 50 Jahre (links) und 1.000 Jahre nach simultaner Einlagerung der hoch radioaktiven Abfälle (rechts) /HÖK 10/

Der Wärmeausdehnungskoeffizient sollte vorzugsweise normale Werte des schwedischen Grundgebirges aufweisen, d. h. innerhalb von 10^{-6} bis 10^{-5} 1/K liegen und sich im Endlagerbereich nicht merklich unterscheiden /AND 00/. Die Wärmeleitfähigkeit soll größer sein als 2,5 W/(m·K) und geothermische Anomalien sollen gemieden werden /AND 00/. Die geogene Temperatur des Grundgebirges in der Endlagertiefe sollte weniger als 25 °C betragen /AND 00/.

In /SKB 11d/ 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 11d/. Daher wird das Auftreten deutlich erhöhter Transmissivitäten infolge thermisch induzierter Abschalungen als weniger wahrscheinlich angesehen, ist allerdings dennoch in den Sicherheitsanalysen berücksichtigt /SKB 11d/.

5.4 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 Einschusswirkung der geologischen Barriere sichergestellt ist /GOG 88/. Ausgehend vom geforderten Betrachtungszeitraum und der Hebungsrate am spezifischen Standort wird die Tiefenlage bestimmt, sodass das Endlager in einer tiefen geologischen Formation im Betrachtungszeitraum nicht an die Erdoberfläche gelangt /ENSI 10/. Für Tonstein muss die nach der Erosion verbleibende Deckgebirgsmächtigkeit ausreichen, um eine Beeinträchtigung der Integrität des ewG durch Dekompaktion auszuschließen /AKE 02/. Hierfür wird in den französischen Sicherheitsanforderungen eine Mächtigkeit des Deckgebirges von mindestens 200 m vorausgesetzt /BOD 08/.

Zusätzlich muss in den französischen Sicherheitsanforderungen der Abstand innerhalb des Wirtsgesteins zwischen Einlagerungsbereich und über- bzw. unterliegenden geologischen Schichten mindestens 50 m betragen /AND 05a/. Dieser Abstand zu weiteren geologischen Schichten (bzw. zum Deckgebirge) dient als Pufferzone. Am Beispiel der Callovo-Oxfordium-Formation besitzt diese am untersuchten Standort („Meuse/Haute-Marne site“) eine Mächtigkeit von 130 m, d. h. es stehen abzüglich der beiden Pufferzonen vertikal eine Mächtigkeit von 30 m für den Einlagerungsbereich zur Verfügung /AND 05a/.

In den schweizerischen Sicherheitsanforderungen wird die großräumige Erosion durch eine maximal erlaubte Hebungsrate von 0,4 mm/a /BFE 08/ und durch eine Mindesttiefe von 400 m /ZUI 08/ beschränkt. Hierdurch soll die Auswirkung von Hebungs- und Erosionsprozessen minimiert werden, sodass die Überdeckung des Einlagerungsbereiches und Dekompaktionseffekte nicht zu einer Erhöhung der hydraulischen Durchlässigkeit führen /ENSI 10/. Bei einer ausgeprägten großräumigen Topographie am Standort wird auch die lokale Erosion betrachtet /ZUI 08/, z. B. werden hierdurch die Großräume Alpen und Faltenjura vorab ausgeschlossen. Die maximal angesetzte Hebungsrate von 0,4 mm/a entspricht ca. der aktuellen Hebung am Alpenrand /ENSI 10/. Die Erosionsrate durch linienhafte Erosion entlang der großen Flüsse in der Nordschweiz beträgt 0,08 – 0,14 mm/a /MÜL 02/, die sich mit geodätisch gemessenen Hebungsraten decken /SCH 07/ und aus geodynamischer Sicht in den nächsten Millionen Jahren konstant bleiben oder nur geringfügig zunehmen werden /ENSI 10/.

5.5 Neotektonische Aktivität

Die Stabilität der Wirtsgesteinsformation muss infolge geodynamischer Einwirkungen durch neotektonische Bewegungen gewährleistet sein und sollte für einen Zeitraum von wenigstens 10.000 Jahren in einem Langzeitsicherheitsnachweis nachgewiesen werden /BOD 08/. Hierzu gehört auch, dass gebirgsmechanische Bewegungen während der Betriebsphase zu keinem Ereignis führen dürfen, die eine Sanierung des Endlagers erforderlich macht /GOG 88/. Gebiete mit einer hohen tektonischen Aktivität bzw. absehbaren langfristigen geologischen Instabilität (wie die Alpen) werden im schweizerischen Standortauswahlverfahren vorab als nicht geeignet eingestuft /BFE 08/.

Der Einlagerungsbereich sollte möglichst weit von tektonisch aktiven Zonen (z. B. Rheingraben / Alpen) entfernt sein, sodass die Auswirkungen tektonischer Aktivität am Standort minimiert werden /AND 05a/. Als Indikatoren für eine tektonische Aktivität werden in den französischen Anforderungen die seismische Aktivität, die Verschiebungsrates der Erdkruste und Änderungen der Orientierung der mechanischen Spannungen verwendet /AND 05a/. Ferner sollen keine quartär entstandenen Klüfte in der Nähe des Untersuchungsgebietes liegen /AND 05a/.

Nach den schwedischen Anforderungen soll ein Standort für ein Endlager für hoch radioaktive Abfälle nicht in der Nähe von regionalen Abscherzonen 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/.

5.6 Seismische Aktivität (Erdbeben)

Ein Endlager für hoch radioaktive Abfälle sollte in Regionen mit geringer seismischer Aktivität liegen /SKI 93/. Ein Nachweis zur Stabilität der Wirtsgesteinsformation infolge geodynamischer Einwirkungen durch Erdbeben muss in den französischen Sicherheitsanforderungen gewährleistet werden /BOD 08/. Diese sollte für einen Zeitraum von wenigstens 10.000 Jahren in einem Langzeitsicherheitsnachweis nachgewiesen

werden /BOD 08/. Hierzu gehört der Nachweis eines gewissen Grades der Konsolidierung des Wirtsgesteins /GOG 88/. Ein Nachweis hierfür ist standortspezifisch qualitativ und quantitativ zu erbringen, sodass die Einschlusswirkung infolge der Auswirkungen eines Erdbebens nicht gefährdet ist /GOG 88/.

Zur Beurteilung der Beständigkeit der Standort- und Gesteinseigenschaften bzw. der Stabilität des Wirtsgesteins wird im schweizerischen Standortauswahlverfahren der Indikator „Seismizität der Großräume“ genutzt. Die Beurteilung erfolgt anhand einer Karte mit historischen und instrumentell erfassten Erdbeben sowie konzeptionellen Überlegungen (Abgrenzung von Zonen, d. h. Herdregionen). Als sehr günstig wird ein Standort eingestuft, der keine erhöhte seismische Aktivität aufweist. Bedingt günstig ist eine leicht erhöhte Seismizität (z. B. Teile des Alpennordrandes und Graubündes), ungünstig eine deutlich erhöhte Seismizität (z. B. Teile des Wallis in der Region Basel) /ZUI 08/.

Nach /CAD 92/ muss ein Standort für ein Endlager ein hohes Maß an Stabilität gegenüber seismischer Aktivität aufweisen, größere tektonische Bewegungen sollten nicht vor 10.000 Jahren erwartet werden. Eine Erdbebengefährdung sollte möglichst gering sein, d. h. unter dem Wert von sieben auf der Richterskala und die Intensität unterhalb von neun bis zehn auf der modifizierten MSK-Skala liegen /CAD 92/.

Nach /SKB 09/ dürfen Bohrlöcher nicht näher als 100 m zu einer Störungszone mit einer Länge von 3 km liegen, um eine seismische Gefährdung auszuschließen. Die Bohrlöcher sollten so platziert werden, dass das EFPC-Kriterium (s. Kap. 3.4) nicht gefährdet wird. Aufgrund des Designs der Behälter dürfen die Scherbewegungen 5 cm nicht übersteigen. Solche Scherbewegungen können nach /SKB 11d/ 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/, /FEN 06/, /HOR 05/, /LAP 99/, /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 Störungsgzonen in der Nähe des Standortes Olkiluoto zeigen, dass Erdbeben mit einer Magnitude von größer als sechs nicht aufgetreten sind /SAA 12/.

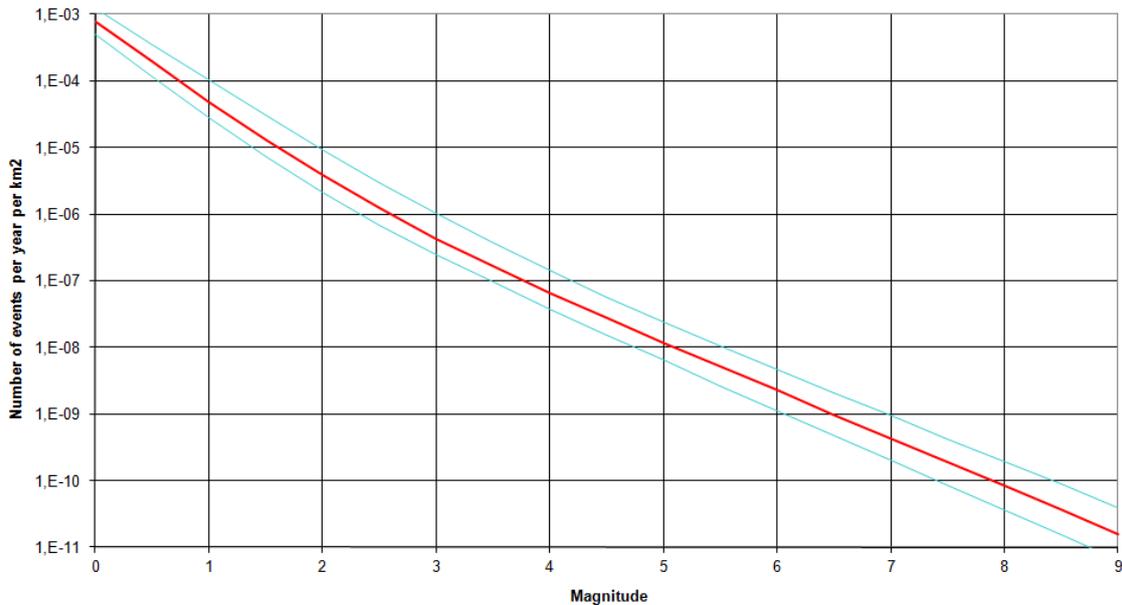


Abb. 5.5 Anzahl an Erdbeben pro Jahr am Standort Olkiluoto in Abhängigkeit ihrer Magnitude /SAA 12/

5.7 Vulkanismus

Standorte werden im schweizerischen Standortauswahlverfahren ausgeschlossen, die innerhalb des Betrachtungszeitraumes von einer Million Jahre vulkanische Aktivität erwarten lassen /BFE 08/. Die vulkanische Aktivität Mitteleuropas beschränkt sich auf Intraplattenvulkanismus, der sich nicht durch Gebiete episodischer vulkanischer Aktivität auszeichnet, sondern durch lokale Vorkommen mit kurzzeitiger Aktivität und ohne Wiederaufnahme der vulkanischen Aktivität nach längeren Pausen /ENSI 10/. Vulkanische Erscheinungen sollten einige Duzend Kilometer entfernt sein /CAD 92/.

5.8 Glaziale Einflüsse

Die Stabilität der Wirtsgesteinsformation muss infolge geodynamischer Einwirkungen durch Eiszeiten hinsichtlich der Integrität eines Endlagers zulässig bleiben /BOD 08/. Diese sollte für einen Zeitraum von wenigstens 10.000 Jahren in einem Langzeitsicherheitsnachweis nachgewiesen werden /BOD 08/. Die Einschlusswirkung der geologischen Barriere darf infolge der Auswirkungen einer Eiszeit nicht gefährdet werden /GOG 88/. Dies gilt insbesondere für Prozesse wie Erosion, welche die Einschlusswirkung der geologischen Barriere nicht verändern darf /GOG 88/.

Als notwendige Tiefenlage unter Oberfläche Fels im Hinblick auf glaziale Erosion wird mindestens 400 m vorgeschrieben, 500 m im Bereich übertiefer Felsrinnen. Der Mindestabstand der Lagerebene zu Top und Basis des Opalinustones muss mindestens 20 m betragen /ZUI 08/.

Glaziale Tiefenerosion kann in wenigen zehntausend Jahren im Rahmen einer Vorlandvergletscherung erfolgen /MÜL 02/. Die erosive Kraft ist an weichem und leicht erodierbarem Untergrund am größten, sodass z. B. Rinnen von über 200 m Tiefe möglich sind /ENSI 10/. Gletschervorstöße orientieren sich an bereits bestehenden Talfurchen, wodurch Rinnenverfüllungen besonders rasch erodiert werden könnten /HAE 04/. Daher sollte sich ein Indikator zur glazialen Tiefenerosion auf die Felsoberfläche beziehen /ENSI 10/.

Glaziale Tiefenerosion kann die Barrierenwirksamkeit eines geologischen Tiefenlagers potentiell gefährden /ENSI 10/. Hierbei dringt unter der Eisauflast unter Druck stehendes Schmelzwasser in den Untergrund ein und erhöht den hydrostatischen Druck, der maßgeblich von der Eisauflast beeinflusst wird. Die Erosion konzentriert sich entlang von Rinnen mit weicherem Material, die in einer Warmzeit typischerweise mit See- oder Flussablagerungen verfüllt werden. In einer erneuten Eiszeit werden diese Rinnen bevorzugt durch ihre weiche Verfüllung abgetragen und vertieft. Im Schweizer Mittelland kann eine für die Barrierenwirksamkeit bedeutende Gefährdung nur erfolgen, wenn das Gletschereis sehr weit vorstößt und entsprechend mächtig ist /ENSI 10/.

Das Auftreten von Permafrost und glazialen Bedingungen wird in Schweden im Betrachtungszeitraum von 100.000 Jahren als wahrscheinlich angesehen /SKB 11c/. Daher wurden im schwedischen Langzeitsicherheitsnachweis verschiedene klimatische Entwicklungen berücksichtigt und thermische Rechnungen durchgeführt, um die glazia-

len 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 11c/. 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 11c/. Diese beiden Isothermen liegen deutlich oberhalb des geplanten Einlagerungsbereiches (457 m bis 470 m Teufe), sodass eine Verletzung der Behälterintegrität infolge einer Abkühlung unter Berücksichtigung einer Unsicherheitsanalyse ausgeschlossen wird /SKB 11c/. 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 11c/.

Durch die zusätzliche Eisauflast während einer Eiszeit erhöht sich die isostatische Belastung der Behälter, sodass der Grenzwert von 45 MPa überschritten werden kann /SKB 11c/. Nach Berechnungen von /SKB 11c/ wird die Barriereintegrität 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 11c/.

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/.

5.9 Geochemisches Milieu

Reduzierende Bedingungen sind für die Langzeitstabilität der Endlagerbehälter, der Brennstoffmatrix und für die Rückhaltung der redoxsensitiven Radionuklide im Wirtsgestein im schweizerischen Standortauswahlverfahren vorteilhaft. Durch gesättigte hydrologische Verhältnisse, geringe hydraulische Durchlässigkeiten und diffusionskontrollierte Transportmechanismen können Sauerstoff oder andere Oxidationsmittel nur wenig in die Umgebung des Endlagers eindringen. Bei Anwesenheit von Pyrit oder Siderit

können reduzierende Bedingungen wiederhergestellt werden. Es darf lediglich kein O₂-haltiges Wasser in ein geologisches Tiefenlager infiltrieren /ENSI 10/.

Der Mineralbestand des Wirtsgesteins sollte mindestens idealerweise über 40 % Tonminerale, Glimmer oder Zeolithe bei neutral bis basischen pH-Werten (max. 9) enthalten. Reduzierende Bedingungen gepuffert durch Minerale wie Pyrit oder Siderit gelten als sehr günstig, ungünstig hingegen ungesättigte, oxidierende Bedingungen. Die Ionenstärke sollte möglichst gering, allerdings nicht unter 0,005 mol/l betragen. Der Nitratgehalt sollte nicht über 1 g/l betragen /ZUI 08/.

Nach dem schwedischen Sicherheitskonzept 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 (DOC < 20 mg) ist wie eine niedrige Ammonium-, Radon- und Radiumkonzentration und ein gewisser Gehalt an freien Ca²⁺- und Mg²⁺-Ionen (> 4 mg/l) vorteilhaft /AND 00/. Insgesamt darf die Summe der gelösten Feststoffe in der Endlagertiefe 100 g/l nicht überschreiten /AND 00/.

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

Nach dem Kriterium R1e im schwedischen Sicherheitskonzept (s. Kap. 3.4) dürfen keine extremen alkalischen Bedingungen (pH > 11) vorliegen, um den Korrosionsschutz der Behälter zu gewährleisten. Eine Verletzung des Kriteriums R1e infolge eines Zutrittes von glazialen Schmelzwasser wird ausgeschlossen /SKB 11c/. 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 11c/.

Nach dem Kriterium R1f im schwedischen Sicherheitskonzept (s. Kap. 3.4) dürfen für die Korrosionsbeständigkeit der Behälter keine sauren Verhältnisse (pH < 4) vorliegen

und die Chloridkonzentration nicht größer als 2 mol/l sein /SKB 11c/. Eine Absenkung des pH-Wertes bis hin zu sauren Verhältnissen durch den Zutritt von Schmelzwasser wird wie eine solche Erhöhung der Chloridkonzentration ausgeschlossen /SKB 11c/.

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/.

5.10 Advektiver Grundwasserfluss

Die hydraulische Durchlässigkeit soll im schweizerischen Standortauswahlverfahren unter Berücksichtigung der zu erwartenden hydraulischen Gradienten und dem vorherrschenden Transportprozess /ZUI 08/ kleiner sein als 10^{-10} m/s /BFE 08/. Als sehr günstig werden hydraulische Durchlässigkeiten von weniger als 10^{-12} m/s genannt /ZUI 08/.

Falls keine Erfahrungswerte zur hydraulischen Durchlässigkeit bzw. Transmissivität im Tonstein vorliegen, kann im schweizerischen Standortauswahlverfahren der Gehalt an Tonmineralen in Gewichtsprozent als alternatives Beurteilungskriterium verwendet werden /ZUI 08/, da hohe Tongehalte grundsätzlich mit einer niedrigen hydraulischen Durchlässigkeit und einem guten Selbstabdichtungsvermögen zusammenhängen. Ausnahmen können metamorph überprägte Tonsteine bilden /ENSI 10/. Als Mindestanforderung wird ein Grenzwert von 25 %-Tongehalt genannt /NAG 10/, da die hydraulische Durchlässigkeit und Transmissivität zwischen 0 % und 15 % stark abnehmen. Ab einem Tongehalt von 20 % nehmen diese nur noch wenig ab /NAG 10/. /ENSI 10/ weist daraufhin, dass die Bestimmung des Indikators „Tongehalt“ durch reine Kartierungen ggfls. mit großen Ungewissenhaften belegt sein kann.

Die Grundwasserzirkulation soll möglichst gering sein, sodass eine möglichst geringe Menge an Lösungen in einem Endlager zutreten kann /POS 99/. Hierfür ist ein kleiner

hydraulischer Gradient und eine niedrige hydraulische Leitfähigkeit notwendig /POS 99/. Im schwedischen Langzeitsicherheitsnachweis soll der hydraulische Gradient in der Endlagertiefe niedriger als 1 % sein /AND 00/. Ein noch kleinerer hydraulischer Gradient soll keinen wesentlichen zusätzlichen Vorteil liefern /AND 00/.

Um einen advektiven Grundwasserfluss grundsätzlich im Kristallingestein zu verhindern, soll das Wirtsgestein eine geringe Anzahl an Großklüften /SKI 93/ besitzen und bevorzugt nur eine geringe Anzahl von kleineren lokal begrenzten Klüftzonen mit einer geringen Klüftdichte aufweisen /AND 00/. Der hydraulische Durchlässigkeitsbeiwert des Grundgebirges soll im Einlagerungsbereich im Wesentlichen gering als 10^{-8} m/s sein und die Transmissivität unter 10^{-5} m²/s liegen /AND 00/. Der Mindestabstand des Endlagers zu großen lokalen Klüftzonen soll 10 m, zu regionalen Klüftzonen 100 m betragen /SKB 94/.

5.11 Mikrobielle Prozesse

Mikroorganismen sind sowohl im Tongestein als auch in einzubringenden Tonmaterialien heimisch und können auch anthropogen, z. B. durch die Bewetterung, in ein Endlager gelangen und bei günstigen Bedingungen aktiv werden /MEL 11/, /MEL 14/. Im Tonstein treten vor allem Eisen(III)-reduzierende, Sulfat-reduzierende, Methanproduzierende und fermentative Mikroorganismen auf, welche die Entwicklung der mikrobiellen Aktivität im Endlager und im angrenzenden Wirtsgestein bestimmen und zu einer Erhöhung der Korrosionsrate der Behälter und zur Gasbildung führen können /MEL 11/.

Mikrobiologische Aktivität sollte daher nach den schweizerischen Standortauswahlkriterien in einem Endlager nicht stattfinden. Es sollen ungünstige Bedingungen herrschen, d. h. die Poren sollten möglichst klein (idealerweise wesentlich kleiner als 1 mm) sein, die Klüfte verfüllt und ein knappes Nährstoffangebot ohne Elektronenakzeptor (z. B. Sulfat) vorliegen /ZUI 08/.

Im schwedischen Langzeitsicherheitsnachweis soll durch eine hohe Dichte des Bentonits als Buffer (1.950 und 2.050 kg/m³) das Eindringen von Mikroorganismen an den Behälter und somit eine mikrobiell induzierte beschleunigte Korrosion verhindert werden (Sicherheitsfunktion Buff2) /SKB 11b/. Vereinzelt kann es zu übermäßigem Verlust von Bentonit kommen, sodass eine verstärkte mikrobielle Aktivität von sulfatreduzie-

renden Bakterien mit einhergehender Korrosion der Behälteroberfläche nicht grundsätzlich vollständig ausgeschlossen werden kann /SKB 11c/.

5.12 Verkarstung

Als potentiell für die Barriewirksamkeit gefährdender Prozess wird in den schweizerischen Standortauswahlkriterien die Verkarstung genannt. In der Bewertung der Langzeitstabilität von Wirtsgesteinen, näher der Beständigkeit der Gesteinseigenschaften über lange Zeiträume, wird darauf hingewiesen, dass bei nennenswerten Kalkeinschlüssen eine Verkarstung neue Wasserwegsamkeiten bilden kann /ZUI 14/. Unter Berücksichtigung der Tiefenlage und der Topographie soll es keine Bereiche mit erheblichem Potential zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten im Wirtsgestein durch Verkarstungsprozesse geben /ZUI 08/.

Verkarstungsfähige Gesteine mit hohem Calcit und geringerem Gehalt an anderen Mineralen neigen insbesondere unter Einfluss von Oberflächenwässern zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten mit teils hoher Transmissivität /ENSI 10/. Beobachtungen zum Verkarstungspotential direkt an der Oberfläche sind allerdings nur bedingt auf die Verhältnisse in größerer Tiefe zu übertragen /LAW 07/. Grundsätzlich ist das Verkarstungspotential nicht nur vom Karbonatgehalt abhängig, sondern auch von der lokalen hydrogeologischen und tektonischen Situation sowie von dem Verkarstungspotential der umliegenden Gesteine. Standortspezifisch sollte die initiale und über den Betrachtungszeitraum entstehende Klüftung im Wirtsgestein berücksichtigt werden /ENSI 10/.

Der Indikator „Potential zur Bildung neuer Wasserwegsamkeiten (Verkarstung)“ wird im schweizerischen Standortauswahlverfahren für den Opalinuston als sehr günstig eingestuft, da dieser keine nennenswerten Kalkeinschlüsse aufweist /ZUI 14/.

6 Diskussion

6.1 Integritätsbegriff Kristallin

Bereits /HOT 10/ stellte fest, dass der Begriff der Integrität in der Literatur nicht einheitlich verwendet wird. In den gesichteten Unterlagen zu internationalen Sicherheitsanforderungen, Standortauswahlkriterien und Sicherheitsanalysen der Länder Frankreich, Schweiz, Finnland und Schweden wird der Integritätsbegriff in Bezug auf das Wirtsgestein nicht explizit erwähnt, sondern allenfalls umschrieben bzw. Kriterien genannt, welche die Einschlusswirksamkeit der geologischen Barriere gewährleisten sollen. Nach dem schwedisch-finnischen Verständnis im KBS-3-Konzept wird der Begriff der Integrität für die Einschlusswirksamkeit der Kupferbehälter verwendet und gesondert gewürdigt, da diese die Hauptkomponente im Sicherheitsnachweis darstellen. Sämtliche Sicherheitsfunktionen beziehen sich darauf, dass die Behälterintegrität gewährleistet wird.

Betrachtet man die Integritätskriterien in den deutschen Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder Abfälle /BMU 10/ wird besonders das Advektionskriterium für das Wirtsgestein Kristallin bedeutsam, da dieses häufig durch seine Klüftung permeabel und als alleinige Barriere nicht einschlusswirksam ist. Daher nimmt im KBS-3 Konzept vor allem der Kupferbehälter die einschließende und rückhaltende Funktion ein, welche durch die geotechnischen Barrieren (insbesondere Bentonit) und die Geosphäre unterstützt und gewährleistet wird. Neben der expliziten Darstellung der Behälterintegrität, werden auch Sicherheitsnachweise für den Bentonit geführt /SKB 11c/, die einem Integritätsnachweis in Deutschland für geotechnische Barrieren /MÜL 12/ ähneln. Inwiefern die Nachweismethodik des Integritätsnachweises nach /BMU 10/ für das Wirtsgestein Kristallin anwendbar ist und die Integritätskriterien abdeckend sind, sollte in zukünftigen Vorhaben näher untersucht werden. Hierfür wird empfohlen besonders die Nachweismethodik des KBS-3-Konzeptes näher zu betrachten.

6.2 Integritätsbegriff Tonstein

Für das Wirtsgestein Tonstein existiert national derzeit ein Vorhaben (AnSichT – Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein), in dem auch Integritätskriterien betrachtet werden /JOB 16/. Neben den für Salzgestein entscheidenden Integritätskriterien Dilatanz- und

Fluiddruckkriterium sind für Tonstein auch die anderen Integritätskriterien von Relevanz (z. B. Temperaturkriterium). In internationalen Sicherheitsanalysen, Sicherheitsanforderungen und Standortauswahlkriterien der Länder Frankreich und Schweiz wird der Begriff der Integrität allerdings nicht so wie in /BMU 10/ verwendet. Stattdessen wird der Begriff des Erhalts der Barrierenwirksamkeit und Kriterien wie eine Beschränkung des Wärmeeintrages und der maximalen Grenztemperatur (im Wirtsgestein bzw. an der Behälteroberfläche) oder des hydraulischen Gradienten bzw. advektiven Grundwasserflusses in der Endlagertiefe genannt, damit die Barrierenwirksamkeit der geologischen Barriere nicht unzulässig beeinträchtigt wird. Dies entspricht dem Wesen nach dem Integritätsverständnis in den deutschen Sicherheitsanforderungen /BMU 10/, allerdings werden keine Integritätskriterien explizit in den Sicherheitsanforderungen der Schweiz und Frankreich genannt.

Für Tonstein wurden im Rahmen der französischen und schweizerischen Sicherheitsanalysen Stoff- oder Materialgesetze genannt oder entwickelt /AMA 15a/, /AMA 15b/, /MAR 14/, welche u. a. die geomechanische Stabilität eines Endlagers beschreiben. Diese sind grundsätzlich auch auf tonreiche geotechnische Barrieren wie Bentonit übertragbar, sodass Stoff- und Materialgesetze von Tonstein auch in Sicherheitskonzepten für Kristallin Anwendung finden /GUN 06/, /JOH 06/, /KAR 09/, /KET 04/, /PUS 01/.

Inwiefern diese Stoff- und Materialgesetze die geomechanischen Integritätskriterien von /BMU 10/ abbilden können, ist offen und sollte weiter untersucht werden. Beispielsweise wird im Stoffgesetz für den Opalinuston in der Schweiz /MAR 14/ festgestellt, dass das Kriechverhalten von Tonstein bislang nicht abgebildet werden kann. Von besonderer Relevanz in Hinblick auf das Fluiddruck- und Dilatanzkriterium ist das Deformationsverhalten von Tonstein, insbesondere der Übergang zwischen Expansion und Kontraktion, dessen Grenze vom lokalen Spannungsfeld und der Temperatur abhängig ist /FAU 03/, /FRA 09/, /HUE 09/, /SUL 02/. Ab einer spezifischen Grenztemperatur kann die negative Auswirkung einer thermischen Expansion und einer möglicherweise einhergehenden Rissbildung durch eine Konsolidierung im Tonstein kompensiert werden. Hierbei muss allerdings auch die Wärmeausdehnung des Porenfluids berücksichtigt werden, die bei Überschreitung eines gewissen Fluiddruckes zur Rissbildung im Tonstein führen kann.

Für das Temperaturkriterium und die einhergehende maximale Grenztemperatur im Wirtsgestein bzw. in den geotechnischen Barrieren und an der Behälteroberfläche

werden in internationalen Sicherheitskonzepten unterschiedliche Werte genannt. In Frankreich ist eine maximale Temperatur von 90 °C im Wirtsgestein und 100 °C an der Behälteroberfläche erlaubt und soll ferner nach 10.000 Jahren nicht höher als 70 °C im Wirtsgestein betragen /AND 05a/. In der Schweiz werden auch höhere Grenztemperaturen betrachtet, im Bentonit als Buffer sollen Temperaturen von 125 °C nicht überschritten werden /JOH 02b/. An der Behälteroberfläche werden 140 °C bis 160 °C erwartet und an der Grenze zwischen Buffer und Wirtsgestein sind 70 °C bis 95 °C zulässig /JOH 02b/. Hinsichtlich des Bentonits als Buffer in Sicherheitskonzepten im Kristallin wird im schwedischen Einlagerungskonzept eine maximale Grenztemperatur im Bentonit von 100 °C festgelegt /SKB 06/. Im finnischen Sicherheitsnachweis wird die maximale Grenztemperatur im Bentonit als Buffer in Abhängigkeit des Feuchtegehaltes bestimmt, im trockenen Bentonit sollen Temperaturen von 95 °C und im gesättigten 75 °C nicht überschritten werden /POS 13/.

Aus den unterschiedlichen Angaben in den internationalen Sicherheitskonzepten wird ersichtlich, dass eine grundsätzliche Festlegung einer maximalen Grenztemperatur für Tonstein nur standort-, gesteins- und sicherheitskonzeptspezifisch an bestimmten Lokationen (z. B. Behälteroberfläche) festgelegt werden kann. Inwiefern bei unterschiedlichen Temperaturen integritätsgefährdende thermisch induzierte Prozesse stattfinden und das Temperaturkriterium im Tonstein ausgelegt werden soll, ist offen und auch Bestandteil aktueller Forschungs- und Entwicklungsvorhaben /LOM 15/, /JOB 15a/, /JOB 16/. Die Ableitung eines Temperaturkriteriums aus den Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ mit Übertragung auf die deutschen geologischen Verhältnisse ist bislang nicht erfolgt und bedarf weiterer Untersuchungen.

6.3 Vergleich integritätsgefährdender Prozesse zwischen Salz und Tonstein/Kristallin

Ein Vergleich zwischen national identifizierten integritätsgefährdenden Prozessen im Salzgestein (Kap. 4) und international genannten im Tonstein und Kristallin (Kap. 5) zeigt grundsätzlich Ähnlichkeiten und weist viele Parallelen auf. Eine Übertragung der integritätsgefährdenden Prozesse und Zustände im Salzgestein auf die Wirtsgesteine Tonstein und Kristallin ist grundsätzlich möglich, allerdings werden diese wirtsgesteins- und sicherheitskonzeptspezifisch in einem unterschiedlichen Tiefgang behandelt.

Einige integritätsgefährdende Prozesse werden wirtsgesteinsunspezifisch betrachtet. In Sicherheitsanforderungen oder Standortauswahlkriterien werden grundsätzlich Standorte ausgeschlossen, bei denen eine unzulässig hohe tektonische und vulkanische Aktivität zu erwarten ist, da Erdbeben mit einer hohen Magnitude oder vulkanische Ereignisse ausgelöst werden könnten und grundsätzlich für ein Endlager unabhängig vom Wirtsgestein integritätsgefährdend sind. Aufgrund des zufallsbedingten Einschlagsortes eines unwahrscheinlichen Impaktereignisses mit einem ausreichenden Durchmesser, werden Impakte in Sicherheitsanforderungen und Standortauswahlkriterien nicht verwendet, allerdings grundsätzlich in Sicherheitsstudien berücksichtigt und untersucht.

Bergbauinduzierte Effekte wie eine möglicherweise permeable Auflockerungszone durch das Auffahren eines Grubengebäudes für ein Endlager werden in allen gesichteten internationalen Sicherheitskonzepten betrachtet. Sowohl im Wirtsgestein Tonstein, als auch im Kristallin werden Permeabilitätsmessungen der Auflockerungszone und die Reichweite dieser bestimmt, sodass ein möglicher Einfluss der Auflockerungszone auf die Langzeitsicherheit eines Endlagers beurteilt werden kann. Im Kristallin wurden besonders die Auswirkungen einer bergbauinduzierten seismischen Aktivität und die mögliche Reaktivierung von bestehenden Kluftsystemen ermittelt, die allerdings keinen Einfluss auf die Barriernwirksamkeit zeigten. Insbesondere der Nachweis der Reichweite einer Auflockerungszone und dessen 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.

Der Wärmeeintrag in das Wirtsgestein durch die Einlagerung von wärmeentwickelnden Abfällen wird wirtsgesteinsspezifisch mit unterschiedlichem Tiefgang betrachtet. Salzgestein (bzw. nahezu kristallwasserfreier Halit) besitzt günstige thermische Materialeigenschaften, sodass die Auslegungstemperatur eher von den Eigenschaften des Behälters abhängig ist. Unter Berücksichtigung eines ausreichenden Sicherheitsstandes zu hydratsalzführenden Schichten und einem Integritätsnachweis d. h. der Gewährleistung des Fluiddruck- und Dilatanzkriteriums infolge einer thermisch induzierten Volumenexpansion besitzt ein Wärmeeintrag positive sicherheitsrelevante Auswirkungen wie ein beschleunigtes Kriechen des Salzes und einer Zunahme der Kompaktionsrate von Salzgrus. Thermisch induzierte Effekte im Salzgestein und deren Auswirkungen auf die Integrität eines Endlagers sind national weitestgehend detailliert untersucht worden und bekannt. Für Tonstein und tonreiche geotechnische Barrieren in Sicherheitskonzepten im Wirtsgestein Kristallin (Bentonit) erscheint eine Begrenzung der maximal zulässigen Grenztemperatur für die Gewährleistung der Integrität eines Endlagers sehr relevant (Kap. 6.2). Hierdurch sollen thermisch induzierte Mineralumwandlungen und die Bildung von Wegsamkeiten für Fluide ausgeschlossen werden, welche die Integrität eines Endlagers gefährden und Migrationspfade für Radionuklide entstehen können. 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 Tonstein 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.

Ein advektiver Grundwasserfluss wird im Sicherheitskonzept im Salzgestein ausgeschlossen, da Salzgestein als impermeabel gegenüber Fluiden gilt solange das Fluidruckkriterium eingehalten wird und keine ungesättigten Lösungen in Bezug auf die anstehenden Mineralphasen in das Endlager eindringen. Solange dies gewährleistet ist, ist der Transport durch Diffusion entscheidend für die Radionuklidmigration. Insbesondere der Kristallin weist häufig ein ausgeprägtes und komplexes Klufnetzwerk auf, sodass Advektion als Transportprozess nicht ausgeschlossen werden kann. Daher wird in Sicherheitskonzepten im Wirtsgestein Kristallin quellfähiger Bentonit verwendet, um den advektiven Fluss im Nahfeld der Behälter einzuschränken und eine Korrosion der Behälter sowie eine Radionuklidmigration zu verhindern. Zusätzlich werden an die Geosphäre bzgl. des Klufnetzwerkes (z. B. Transmissivität, Klüftungsgrad und Vernet-

zung) und den im Zusammenhang stehenden hydraulischen Gradienten besondere Sicherheitsanforderungen gestellt. Für Tonstein werden ebenfalls maximale hydraulische Durchlässigkeiten gefordert und eine Begrenzung des hydraulischen Gradienten angegeben.

Der Einfluss von flächenhafter Erosion und glazialer Tiefenerosion werden im Tonstein und Kristallin behandelt. Kristallin gilt grundsätzlich als resistenter gegenüber Erosion und es werden geringe Erosionsraten genannt. In Sicherheitskonzepten im Tonstein wird detaillierter auf Hebungsraten eingegangen und Standorte mit unzulässig zu erwartenden Hebungen und Erosionsraten ausgeschlossen. Auch in Hinblick auf Eiszeiten und glazialer Tiefenerosion werden Mindestteufen gefordert, um eine Freilegung des Endlagers und eine Gefährdung der Barrierewirksamkeit der geologischen Barriere zu verhindern. In Sicherheitskonzepten im Kristallin werden durch den potentiellen Eintrag von Schmelzwässern über Wasserwegsamkeiten auch die Veränderungen des geochemischen Milieus untersucht. Dieses ist insbesondere für die Korrosionsbeständigkeit der Behälter von Relevanz, für die eine Vielzahl an verschiedenen Sicherheitsfunktionen ausgewiesen wird um die Behälterintegrität zu gewährleisten.

Darüber hinaus wird in den schweizerischen Sicherheitsanalysen der Prozess der Verkarstung genannt. Durch Karbonateinschlüsse können im Tonstein auch im Untergrund Verkarstungsprozesse ausgelöst werden und neue Wegsamkeiten für Fluide potentiell gebildet werden. Im tatsächlichen Standortauswahlverfahren wurde eine Gefährdung der Barriewirksamkeit allerdings ausgeschlossen und das gewählte Wirtsgestein (Opalinus Ton) weist keine Karbonateinschlüsse und somit günstige Eigenschaften bzgl. einer potentiellen Verkarstung auf.

7 Zusammenfassung

Zusammenfassend zeigt sich, dass im internationalen Kontext der Begriff der Integrität nicht einheitlich und nicht übereinstimmend mit dem Integritätsbegriff nach /BMU 10/ verwendet wird. Dennoch lässt sich aus der Betrachtung integritätsgefährdender Prozesse in internationalen Sicherheitsanforderungen und –konzepten ein Integritätsverständnis für die Wirtsgesteine Tonstein und Kristallin ableiten, das in zukünftigen Forschungs- und Entwicklungsvorhaben weiterentwickelt werden kann um schließlich einen quantitativen Integritätsnachweis führen zu können.

Für das Wirtsgestein Salz wurden bereits national Integritätskriterien (Fluiddruck- und Dilatanzkriterium) ermittelt und ein Integritätsnachweis durchgeführt. Für die Wirtsgesteine Tonstein und Kristallin sind die Integritätskriterien nach /BMU 10/ bislang nicht gesondert betrachtet worden. Hierfür erscheint besonders das Temperaturkriterium für Tonstein und tonreiche geotechnische Barrieren im Kristallingestein (Bentonit) relevant, da thermisch induzierte Prozesse wie Mineralumwandlungen die mechanischen Eigenschaften von Tonstein bzw. Bentonit verändern können. Auch das Advektionskriterium ist für Tonstein und Kristallin von Bedeutung, da besonders im Kristallin häufig Kluftnetzwerke existieren und ein advektiver Fluss in internationalen Sicherheitskonzepten erst durch zusätzliche Kriterien eingeschränkt wird.

Darüber hinaus gewährleisten im Kristallin nicht das Wirtsgestein, sondern der Behälter und die im Zusammenhang stehenden geotechnischen Barrieren die Integrität. Daher werden im KBS-3 Konzept von Schweden und Finnland der Begriff der Behälterintegrität verwendet, deren Erhalt durch primäre Sicherheitsfunktionen bzgl. Korrosionsbeständigkeit und dem Widerstand gegenüber isostatischem Druck und Scherbewegungen gewährleistet wird. Diese primären Sicherheitsfunktionen werden durch Anforderungen an den Bentonit als Buffer und Versatzmaterial sowie die Geosphäre unterstützt.

Die national identifizierten integritätsgefährdenden Prozesse und Zustände für das Wirtsgestein Salz werden grundsätzlich überwiegend auch in den internationalen Sicherheitsanforderungen und –konzepten der Länder Frankreich, Schweiz, Finnland und Schweden verwendet und teilweise direkt übertragbar. Allerdings müssen wirtsgesteins- und sicherheitskonzeptspezifisch bestimmte integritätsgefährdenden Prozesse und Zustände in einem unterschiedlichen Detaillierungsgrad im Kontext betrachtet werden. Dies resultiert auch aus dem unterschiedlichen Tiefgang der betrachteten Pro-

zesse in internationalen Sicherheitskonzepten, die in zukünftigen Forschungs- und Entwicklungsvorhaben näher betrachtet werden sollten.

8 **Ausblick**

Das Wirtsgestein Steinsalz stand in Deutschland lange Zeit im Fokus der Endlagerforschung. In Deutschland wurde bisher kein potentieller Standort mit den Wirtsgesteinen Ton/Tonstein oder Kristallin detailliert untersucht. Erstmals durchgeführt wurde eine vollständige Integritätsanalyse nach den bis heute geltenden Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ im Rahmen des Vorhabens „Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben“ mit Steinsalz als Wirtsgestein. Sowohl für die Integrität der geologischen als auch der geotechnischen Barrieren /MÜL 12/ wurde eine dem Nachweis entsprechende Analyse durchgeführt. Für das Wirtsgestein Steinsalz kann dies heute als Stand von Wissenschaft und Technik angesehen werden. Für Tonstein und Kristallin sind ähnliche Untersuchungen noch nicht durchgeführt worden. /WEY 16/ erweitert die Betrachtungen von /HOT 10/ und liefert damit eine weitere Grundlage, die Kriterien für eine Integritätsanalyse aus /BMU 10/ auf diese beiden Wirtsgesteinsarten zu übertragen.

Für das Wirtsgestein Ton/Tonstein sollte zunächst ein detailliertes Verständnis über dessen Langzeitverhalten in Bezug auf Vorkommen in Deutschland erarbeitet werden. Hierzu gehören eine weitergehende Analyse der integritätsgefährdenden Prozesse und die Entwicklung eines Konzepts zur Umsetzung der „Langzeitaussage zur Integrität des ewG“ nach den Sicherheitsanforderungen /BMU 10/. Neben der Entwicklung eines Verfahrens- und Ablaufkonzeptes sollten die Integritätskriterien hinsichtlich der zu erfolgenden Prüfung anhand des Material- und Transportverhaltens von Ton/Tonstein konkretisiert werden.

Für das Wirtsgestein Kristallin sollte untersucht werden, inwieweit die in den Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ formulierten Integritätskriterien in Hinblick auf das Wirtsgestein Kristallin zu interpretieren und anzuwenden sind. Eine Überprüfung, ob ein Endlager im Wirtsgestein Kristallin durch die Sicherheitsanforderungen vollständig abgedeckt ist, wird auch von /KOM 16/ empfohlen. Es sollte aufbauend auf den Ergebnissen dieses Vorhabens ein umfassendes Verständnis der integritätsgefährdenden Prozesse in Kristallinkonzepten in Bezug auf die deutschen Sicherheitsanforderungen entwickelt werden, die mechanisch, thermisch, mikrobiell, hydrogeologisch und insbesondere geo- bzw. hydrochemisch induziert sind. Hierzu gehört auch die Prüfung und Bewertung der Übertragbarkeit des finnischen und schwedischen Integritätsnachweises im Kristallin auf ein Endlager in Kristallinformationen in Deutschland. Es sollen Vorschläge für einen Integritätsnachweis in einem deutschen Endlager im Kristallin in Hinblick auf die Sicherheitsanforderungen entwickelt werden.

9 Literaturverzeichnis

- /AHJ 84/ Ahjos, T., Saari, J., Penttilä, E., Korhonen, H.: Earthquakes and seismic hazard in Finland, *Engineering Geology*, Bd. 20, 1-2, S. 1–12, DOI 10.1016/0013-7952(84)90038-3, 1984.
- /AKE 02/ Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte. Empfehlungen des AkEnd - Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte. Abschlussbericht, 260 S.: Köln, Dezember 2002.
- /AMA 15a/ Amann, F., Löw, S., Perras, M.: Assessment of Geomechanical Properties, Maximum Depth below Ground Surface and EDZ Impact on Long Term Safety. Etappe 2, Sachplan geologische Tiefenlager, ENSI, 33/460, 76 S., November 2015.
- /AMA 15b/ Amann, F., Vogelhuber, M.: Assessment of Geomechanical Properties of Intact Opalinus Clay. Sachplan Geologische Tiefenlager, Etappe 2, ENSI, 33/461, 69 S., Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI), November 2015.
- /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, Technical Report, Hrsg.: Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), TR-00-12, 144 S.: Stockholm, Sweden, April 2000.
- /AND 05a/ Agence Nationale pour la Gestion des Dechets Radioactifs: 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.
- /AND 05b/ Agence Nationale pour la Gestion des Dechets Radioactifs: Dossier 2005 Argile. Les recherches de l' Andra sur le stockage géologique des déchets radioactifs a haute activité et á vie longue. Résultats et perspectives, Col-

lection les Rapports, 36 S., ISBN 2-9510108-7-7: Châtenay-Malabry Cedex, France, 2005.

- /AND 15/ Agence Nationale pour la Gestion des Dechets Radioactifs (ANDRA), Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN): Radioactive waste management programmes in OECD/NEA member countries. France 2015. Nuclear Energy & Radioactive Waste Management, 22 S., 14. April 2015.
- /BEC 11/ Becker, R., Hermansson, H.-P.: Evolution of hydrogen by copper in ultrapure water without dissolved oxygen, Research, Hrsg.: Swedish Radiation Safety Authority (SSM, Strål Säkerhets Myndigheten), SSM 2011:34, 27 S., Studsvik Nuclear AB: Stockholm, Sweden, 2011.
- /BER 12/ Berest, W., Ghoreychi, M., Hadj-Hassen, F., Tijani, M. (Hrsg.): Mechanical Behaviour of Salt VII, ISBN 9780415621229, Taylor & Francis: Paris, 2012.
- /BEU 16/ Beuth, T., Faß, T., Fischer-Appelt, K., Hartwig-Thurat, E., Larue, J.: Stellungnahme zu radiologischen Auswirkungen des geplanten Endlagers in Forsmark (Schweden), 189 S., Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, März 2016.
- /BFE 08/ Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK), Bundesamt für Energie, Abteilung Recht und Sicherheit (BFE): Sachplan geologische Tiefenlager. Konzeptteil, 92 S.: Bern, Schweiz, 2. April 2008.
- /BMU 10/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle, 21 S.: Bonn, 30. September 2010.
- /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, SKB Rapport, Hrsg.: Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), R-06-67, 40 S., Uppsala University: Stockholm, Sweden, Februar 2006.

- /BOD 08/ Bodenez, P., Rieu, J., Niel, J.C.: Guide de sûreté relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde, Hrsg.: Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN), 32 S., 12. Februar 2008, erreichbar unter <http://professionnels.asn.fr/Installations-nucleaires/Guides-de-l-ASN-domaine-des-dechets-radioactifs-et-du-demantelement/Guide-de-l-ASN-n-1-Stockage-definitif-des-dechets-radioactifs-en-formation-geologique-profonde>.
- /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, GRS-281, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, 285 S.: Köln, 2012.
- /BOR 01/ Bork, M., Kindt, A., Nierste, G., Walterscheidt, K.H.: Zusammenstellung internationaler Kriterien zur Bewertung und Auswahl von Standorten für die Endlagerung von radioaktiven Abfällen in tiefen geologischen Formationen, GRS-A-2834, 135 S., Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, Januar 2001.
- /BRA 14/ Brassler, T., Fahrenholz, C., Kull, H., Meleshyn, A., Mönig, H., Noseck, U., Schönwiese, D., Wolf, J.: Natürliche Analoga im Wirtsgestein Salz. Teil1: Generelle Studie (2011) ; Teil 2: Detailstudien (2012 - 2013). BMWi-Vorhaben FKZ 02E10719, GRS-365, 243 S., ISBN 9783944161464, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH: Braunschweig, Dezember 2014.
- /BSE 03/ Kernenergiegesetz (KEG). in der Fassung vom 1. Januar 2009, 21.03.2003.
- /CAD 92/ Cadelli, N., Orłowski, S.: Endlagerung radioaktiver Abfälle: Empfohlene Kriterien für die Standortwahl eines Endlagers. Ein Leitfaden für Kriterien zur Standortwahl, ausgearbeitet von einer Gruppe von Sachverständigen im Rahmen des "Aktionsplans der Gemeinschaft auf dem Gebiet der radioaktiven Abfallstoffe". Serie "Euradwaste" Nr. 6, Kernforschung und -technologie, EUR 14598, Kommission der Europäischen Gemeinschaften (KEG), 26 S., ISBN 92-826-4848-8: Luxembourg, 1992.

- /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 05/ Deutsches Institut für Normung e.V.: Bauten in deutschen Erdbebengebieten - Lastannahmen, Bemessung und Ausführung üblicher Hochbauten, Nr. 4149, April 2005.
- /DSB 04/ Kernenergieverordnung. KEV. 10. Dezember 2004.
- /ENSI 09/ Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI): Spezifische Auslegungsgrundsätze für geologische Tiefenlager und Anforderungen an den Sicherheitsnachweis. Erläuterungsbericht zur Richtlinie, Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen, G03/d, 26 S., Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI), April 2009.
- /ENSI 10/ Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI): Sicherheitstechnisches Gutachten zum Vorschlag geologischer Standortgebiete. Sachplan geologische Tiefenlager, Etappe 1, ENSI, 33/070, 196 S., Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI): Brugg, Januar 2010.
- /ENSI 12/ Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI): Stellungnahme zu NTB 08-02 "Bericht zum Umgang mit den Empfehlungen in den Gutachten und Stellungnahmen zum Entsorgungsnachweis, ENSI, 35/114, 47 S., Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI): Brugg, Schweiz, März 2012.
- /FAU 03/ Faulkner, D., Rutter, E., Faulkner, D.R.: The effect of temperature, the nature of the pore fluid, and subyield differential stress on the permeability of phyllosilicate-rich fault gouge, Journal of Geophysical Research, Bd. 108, B5, DOI 10.1029/2001JB001581, 2003.
- /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.

- /FRA 09/ François, B., Laloui, L., Laurent, C.: Thermo-hydro-mechanical simulation of ATLAS in situ large scale test in Boom Clay, *Computers and Geotechnics*, Bd. 36, 626-640, 2009.
- /FRA 16/ Code de l'environnement. 19.03.2016.
- /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.
- /GUN 06/ Gunnarsson, D., Morén, L., Sellin, P., Keto, P.: Deep Repository – Engineered Barrier Systems. Assessment of Backfill Materials and Methods for Deposition Tunnels, POSIVA Working Report, WR 2006-64, 40 S., POSIVA Oy: OLKILUOTO, 1. September 2006.
- /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.
- /HAE 04/ Haeberli, W.: Eishaus + 1.000.000 a: Zu Klima und Erdoberfläche im Zürcher Weinland während der kommenden Million Jahre, HSK, Hrsg.: Hauptabteilung für die Sicherheit der Kernanlagen, Sektion Geologische Tiefenlagerung (HSK), 35/93, 40 S.: Würenlingen, April 2004.
- /HAR 03/ Harrington, J.F., Horseman, S.T.: Gas migration in KBS-3 buffer bentonite. Sensitivity of test parameters to experimental boundary conditions, SKB Technical Report, Hrsg.: Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), TR-03-02, 57 S.: Stockholm, Sweden, Januar 2003.
- /HAR 10/ Hartley, L., Hoek, J., Swan, D., Roberts, D.: Hydrogeological Discrete Fracture Network Modelling of Groundwater Flow Under Open Repository Conditions, Working Report, Hrsg.: POSIVA Oy, 2010-51, 102 S.: Eurajoki, Finland, Juli 2010.
- /HAR 13/ Hartley, L., Hoek, J., Swan, D., Appleyard, P., Baxter, S., Roberts, D., Simpson, T.: Hydrogeological Modelling for Assessment of Radionuclide

Release Scenarios for the Repository System 2012, Working Report, 2012-42, 318 S., POSIVA Oy, Juli 2013.

- /HER 13/ Hertzsch, J.-M.: Zur Wahrscheinlichkeit der Beeinträchtigung der Integrität untertägiger Endlager durch Impaktereignisse, Hrsg.: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), 19 S.: Hannover, 13. Dezember 2013.
- /HEU 11/ Heusermann, S., Eickemeier, R.: Festlegung von Materialparametern für thermomechanische Modellberechnungen. Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, Hrsg.: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Arbeitspaket 9: Hannover, 1. Januar 2011.
- /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, Technical Report, Hrsg.: Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), TR-10-23: Stockholm, Sweden, Mai 2010.
- /HOR 05/ Hora, S., Jensen, M.: Expert Panel Elicitation of Seismicity Following Glaciation in Sweden, SSI Rapport, Hrsg.: Swedish Radiation Safety Authority (SSM, Strål Säkerhets Myndigheten), 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, Hrsg.: Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-A-3447, 50 S.: Köln, Mai 2010.
- /HUE 09/ Hueckel, T., François, B., Laloui, L.: Explaining thermal failure in saturated clays, Géotechnique, Bd. 59, 197-212, 2009.
- /HUF 05/ Hufschmied, P., Stech, H.J., Pöhler, W., Folly, M., Knobel, S.: Beurteilung der bautechnischen Machbarkeit eines geologischen Tiefenlagers für BE/HAA und LMA und der durch das Lager induzierte Prozesse. Projekt Opalinuston Zürcher Weinland der Nagra. Expertenbericht zuhanden der

HSK, Hrsg.: Emch+Berger AG Bern Ingenieure und Planer, 87 S.: Bern, Schweiz, März 2005.

/HUN 03/ Hunsche, U., Schulze, O., Walter, F., Plischke, I.: Projekt Gorleben – Thermomechanisches Verhalten von Salzgestein. Abschlussbericht, Hrsg.: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Arbeitspaket 9G 213 811: Hannover, 1. Januar 2003.

/IFG 15/ Institut für Gebirgsmechanik (IFG) GmbH, TU Bergakademie Freiberg, Verein Freiburger Geotechniker e.V. (Hrsg.): 44. Geomechanik-Kolloquium, 13.11.2015, Geomechanik-Kolloquium, Bd. 44, 2015.

/JOB 15a/ Jobmann, M., Lommerzheim, A.: Endlagerkonzept sowie Verfüll- und Verschlusskonzept für das Endlagerstandortmodell SÜD. Stand 09.10.2014, Technischer Bericht, Hrsg.: DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC): Peine, 2015.

/JOB 15b/ Jobmann, M., Meleshyn, A.: Evaluation of temperature-induced effects on safety-relevant properties of clay host rocks with regard to HLW/SF disposal, Mineralogical Magazine, Bd. 79, Nr. 6, S. 1389–1395, DOI 10.1180/minmag.2015.079.6.14, 2015.

/JOB 16/ Jobmann, M., Meleshyn, A., Maßmann, J., Polster, M.: Ableitung und quantitative Formulierung der Integritätskriterien für die geologische Barriere zur Verwendung im Rahmen der Nachweismethodik. Entwurfsfassung vom Stand Dezember 2015, TEC-08-2013-AP, DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC): Peine, 2016.

/JOH 02a/ Johanson, L.H., Niemeyer, M., Klubertanz, G., Siegel, P., Gribi, P.: Calculations of the Temperature Evolution of a Repository for Spent Fuel, Vitrified High-Level Waste and Intermediate Level Waste in Opalinus Clay, Nagra Technischer Bericht, Hrsg.: Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA), NTB 01-04, 80 S.: Wetingen, Schweiz, Oktober 2002.

/JOH 02b/ Johns, L., Schneider, J., Zuidema, P., Gribi, P., Mayer, G., Smith, P.: Project Opalinus Clay - Safety Report. Demonstration of disposal feasibility for

spent fuel, vitrified high-level waste and longlived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis), Nagra Technischer Bericht, NTB 02-05, 472 S., Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA): Wettingen, Schweiz, 1. Dezember 2002.

- /JOH 06/ Johannesson, L.E., Nilsson, U.: Deep Repository – Engineered Barrier Systems. Geotechnical Behaviour of Candidate Backfill Materials. Laboratory Tests and Calculations for determining Performance of the Backfill, SKB Rapport, Hrsg.: Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), R-06-73, 74 S.: Stockholm, Sweden, November 2006.
- /KAR 09/ Karnland, O., Olsson, S., Dueck, A., Birgersson, m., Nilsson, U., Hernan-Håkansson, T., Pedersen, K., Nilsson, S., Eriksen, T.E., Rosborg, B.: Long term test of buffer material at the Äspö Hard Rock Laboratory, LOT project. Final report on the A2 test parcel, Technical Report, Hrsg.: Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), TR-09-29, 296 S.: Stockholm, Sweden, 2009.
- /KEL 01/ Keller, S.: Zusammenstellung von Zuständen, Ereignissen und Prozessen (ZEP) als Basis für die Ermittlung von Szenarien (Standort Gorleben), 148 S., Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Hannover, 1. Januar 2001.
- /KET 04/ Keto, P.: Natural Clays as Backfilling Materials in Different Backfilling Concepts, POSIVA Working Report, Hrsg.: POSIVA Oy, WR 2003-79, 63 S.: Olkiluoto, Finland, 1. März 2004.
- /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, GRS-286, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, 301 S., ISBN 978-3-939355-62-5: Köln, 2012.
- /KOM 16/ Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe: Abschlussbericht der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe. Vorabfassung, K-Drs. 268, 681 S.: Berlin, 4. Juli 2016.

- /KOS 09/ Koskinen, L., Hellä, P., Löfman, J., Lanyon, B., Öhberg, A., Autio, J., Sacklèn, N., Saukkonen, K., Saari, J., Lakio, A., Silvast, M., Wiljanen, B., Vuokko, J., Lyytinen, T.: EDZ Programme. EDZ Studies in ONKALO 2007-2008, Working Report, Hrsg.: Mellanen, S., 2008-66, 1110 S., POSIVA Oy: Eurajoki, Finland, März 2009.
- /LAP 99/ LaPointe, P.R., Cladouhos, T., Follin, S.: Calculation of displacements on fractures intersecting canisters induced by earthquakes. Aberg, Beberg and Ceberg examples, Technical Report, Hrsg.: Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), TR-99-03, 103 S., Golder Associates, Inc.; Golder Grundteknik KB: Stockholm, Sweden, Januar 1999.
- /LAW 07/ Laws, S., Deplazes, G.: Geologie und Hydrogeologie der Effinger Schichten im Tafeljura und am Jurasüdfuß. Zusammenfassung des Wissensstandes vor den Untersuchungen in den EWS-Bohrungen Küttingen 1, Küttingen 2 und Oftringen, Nagra Arbeitsbericht, Hrsg.: Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA), NAB 07-28: Wettingen, Schweiz, 2007.
- /LOM 15/ Lommerzheim, A., Jobmann, M.: Endlagerkonzept sowie Verfüll- und Verschlusskonzept für das Endlagerstandortmodell NORD. Stand 28.05.2015, Technischer Bericht, DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC): Peine, 2015.
- /LUX 07/ Lux, K.H., Minkley, W., Wallner, M., Hardy, W.B.: Basic and Applied Salt Mechanics, Mechanical Behavior of Salt, 6th conference on the mechanical behavior of salt (Saltmech6): Hannover, Germany, 22-25 May 2007.
- /MAR 14/ Marschall, P., Giger, S.: SGT Etappe 2: Vorschlag weiter zu untersuchender geologischer Standortgebiete mit zugehörigen Standortarealen für die Oberflächenanlage. Geologische Grundlagen. Dossier IV Geomechanische Unterlagen, Technischer Bericht, Hrsg.: Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA), NTB 14-02, 149 S., Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA): Wettingen, Schweiz, Dezember 2014.
- /MEL 11/ Meleshyn, A.: Microbial processes relevant for longterm performance of radioactive waste repositories in clays. BMWi-Vorhaben, FKZ 02E10548,

GRS-291, 117 S., ISBN 978-3-939355-67-0, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Braunschweig, 2011.

- /MEL 14/ Meleshyn, A.: Microbial processes relevant for the long-term performance of high-level radioactive waste repositories in clays, *Clays in Natural and Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement*, S. 179–194.
- /MEL 16/ Meleshyn, A., Weyand, T., Bracke, G., Kull, H., Wiczorek, K.: Wärmeentwicklung / Gesteinsverträglichkeit, Hrsg.: Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, K-MAT 64, DOI 10.13140/RG.2.1.1882.8406, 172 S., Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Mai 2016.
- /MIN 10a/ Minkley, W., Popp, T.: Final Disposal in Rock Salt – Geomechanical Assessment of the Barrier Integrity, *WM2010 Conference Proceedings*, WM2010 Conference: Phoenix, AZ, 07.03.2010.
- /MIN 10b/ Minkley, W., Wüste, U., Popp, T., Naumann, D., Wiedemann, M., Bobinsky, J., Tejchman, J.: Beweissicherungsprogramm zum geomechanischen Verhalten von Salinarbarrieren nach starker dynamischer Beanspruchung und Entwicklung einer Dimensionierungsrichtlinie zum dauerhaften Einschluss. Hauptband. BMBF-Vorhaben FKZ 02C1264, 214 S., Institut für Gebirgsmechanik (IFG) GmbH: Leipzig, 1. Januar 2010.
- /MIN 12a/ Minkley, W.: Final Disposal in Rock Salt and Barrier Integrity, Impact of thermo-hydro-mechanical-chemical (THMC) processes on the safety of underground radioactive waste repositories, S. 105–121, *European Commission TIMODAZ-THERESA International Conference*: Luxembourg, 29.09.2009 - 01.10.2009.
- /MIN 12b/ Minkley, W., Knauth, M., Wüste, U.: Integrity of salinar barriers under consideration of discontinuum-mechanical aspects. In: *Mechanical Behaviour of Salt VII*. Hrsg: Berest, W., Ghoreychi, M., Hadj-Hassen, F., Tijani, M., S. 469–478, ISBN 9780415621229, Taylor & Francis: Paris, 2012.
- /MIN 15a/ Minkley, W., Brückner, D., Knauth, M., Lüdeling, C.: Integrity of saliferous barriers for heatgenerating radioactive waste - natural analogues and geo-

mechanical requirements., Mechanical Behavior of Salt VIII, S. 159–170,
SALT MECH 8: Rapid City, SD, USA, 26.-28.05.2015.

- /MIN 15b/ Minkley, W., Brückner, D., Knauth, M., Lüdeling, C.: Natürliche Analoga zur Integrität von Salinarbarrieren und Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle, 44. Geomechanik-Kolloquium, S. 7–16: Leipzig, 13.11.2015.
- /MÖN 12/ Mönig, J., Buhmann, D., Rübél, A., Wolf, J., Baltés, 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.
- /MTI 08/ Nuclear Energy Act. 990/1987. in der Fassung vom english translation 342/2008, 28.04.2008.
- /MÜL 02/ Müller, W.H., Naef, H., Graf, H.R.: Geologische Entwicklung der Nordschweiz, Neotektonik und Langzeitszenarien Zürcher Weinland, Hrsg.: Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA), NTB 99-08, 238 S.: Wettingen, Schweiz, Dezember 2002.
- /MÜL 12/ Müller-Hoeppe, N., Breustedt, M., Czaikowski, O., Wieczorek, K., Wolf, J.W.: Integrität geotechnischer Barrieren – Teil 2, Vertiefte Nachweisführung. Bericht zum Arbeitspaket 9.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-288, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, 323 S., ISBN 978-3-939355-64-9: Köln, 2012.
- /MUN 06/ Munier, R.: Using observations in deposition tunnels to avoid intersections with critical fractures in deposition holes, SKB Rapport, Hrsg.: Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), R-06-54, 39 S.: Stockholm, Sweden, April 2006.
- /MUS 10/ Mustonen, S., Norokallio, J., Mellanen, S., Lehtimäki, T., Heikkinen, E.: EDZ09 Project and Related EDZ Studies in ONKALO 2008-2010, Working Report, Hrsg.: POSIVA Oy, 2010-27, 404 S.: Eurajoki, Finland, Dezember 2010.

- /NAG 08/ Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA): Bericht zum Umgang mit den Empfehlungen in den Gutachten und Stellungnahmen zum Entsorgungsnachweis, Nagra Technischer Bericht, NTB 08-02, 170 S., Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA): Wetztingen, Schweiz, Oktober 2008.
- /NAG 10/ Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA) (Hrsg.): Sachplan geologische Tiefenlager, Etappe 1: Fragen des ENSI und seiner Experten und zugehörigen Antworten der Nagra, Nagra Arbeitsbericht, NAB 09-29: Wetztingen, Schweiz, 2010.
- /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 12a/ POSIVA Oy: Safety case for the disposal of spent nuclear fuel at Olkiluoto. Synthesis 2012, POSIVA, 2012-12, 277 S., Posiva Oy: Olkiluoto, December 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, Posiva Oy: Eurajoki, Finland, December 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, February 2013.
- /POS 99/ POSIVA Oy: The final disposal facility for spent nuclear fuel. Environmental impact assessment report, POSIVA Oy, 241 S., 1999.
- /PUS 01/ Pusch, R.: The Buffer and Backfill Handbook, Part 2. Materials and Techniques, SKB Technical Report, Hrsg.: Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), TR-02-12: Stockholm, 1. Dezember 2001.
- /RES 12/ Rest, P.B., Ghoreychi, M., Hadj-Hassen, F. (Hrsg.), The Mechanical Behavior of Salt: 7th Conference (SaltMech7), 2012, Taylor and Francis, 2012.

- /RÖH 02/ Röhlig, K.-J., Baltés, B., Becker, A., Beuth, T., Fischer, H., Fischer-Appelt, K., Javeri, V., Lambers, L., Larue, P.-J., Martens, K.-H., Mielke, H.G., Pörtl, B.: Sicherheit in der Nachbetriebsphase von Endlagern für radioaktive Abfälle. Abschlussbericht, GRS-A-3042, 134 S., Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, Juni 2002.
- /RSK 05/ Reaktor-Sicherheitskommission (RSK): Gase im Endlager, RSK-Stellungnahme, 20 S., 21. Januar 2005.
- /SAA 00/ Saari, J.: Seismic activity parameters of the Finnish potential repository sites, Hrsg.: 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, Working Report, Hrsg.: POSIVA Oy, 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, Working Report, Hrsg.: POSIVA Oy, 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, Working Report, Hrsg.: POSIVA Oy, 2012-29, 37 S.: Olkiluoto, Finland, Juni 2012.
- /SCH 02/ Schulze, O., Popp, T.: Untersuchungen zum Dilatanzkriterium und zum Laugendruckkriterium für die Beurteilung der Integrität eines Endlagerbergwerkes in einer Steinsalzformation, Zeitschrift für Angewandte Geologie, Bd. 48, Nr. 2, S. 16–22, 2002.
- /SCH 07/ Schlatter, A.: Neotektonische Untersuchungen in der Nordschweiz und Süddeutschland. Kinematische Ausgleichung der Landesnivellamentlinien CH/D, Nagra Arbeitsbericht, Hrsg.: Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA), 07-13: Wetingen, Schweiz, 2007.
- /SCH 08a/ Schneider, J., Gribi, P., Zuidema, P.: Begründung der Abfallzuteilung, der Barriersysteme und der Anforderungen an die Geologie. Bericht zur Si-

cherheit und technischen Machbarkeit. Vorschlag geologischer Standorte für das SMA- und das HAA-Lager, Nagra Technischer Bericht, Hrsg.: Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA), 08-05, 555 S.: Wetztingen, Schweiz, Oktober 2008.

/SCH 08b/ Schulze, O.: Druckaufbau und Permeation von Gasen in gering permeablen Gesteinen. In: Gase in Endlagern im Salz - Workshop der GRS in Zusammenarbeit mit dem PTKA-WTE. Berlin, 17.-18. April 2007. BMWi-Vorhaben, FKZ 02E9954, GRS-242, Hrsg: Rübel, A., Mönig, J., S. 25–43, ISBN 978-3-939355-16-8, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Braunschweig, 2008.

/SKB 06/ Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB): Long-term safety for KBS-3 repository at Forsmark and Laxemar - a first evaluation. Main report of the SR-Can project, SKB Technical Report, TR-06-09, 620 S., Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB): Stockholm, Schweden, 1. Oktober 2006.

/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, Hrsg.: Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), TR-09-22, 44 S., Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB): Stockholm, Sweden, November 2009.

/SKB 10/ Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB): Corrosion calculations report for the safety assessment SR-Site, Technical Report, TR-10-66, 52 S.: Stockholm, Sweden, Dezember 2010.

/SKB 11a/ Svensk Kärnbränslehantering AB: Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark. Main report of the SR-Site project, SKB TR-11-01, 893 S.: Stockholm, Sweden, März 2011.

/SKB 11b/ Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB): Volume I. In: Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark. Main report of the SR-Site project. SKB TR-11-01, Hrsg: Svensk Kärnbränslehantering AB, S. 1–276: Stockholm, Sweden, März 2011.

- /SKB 11c/ Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB): Volume II. In: Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark. Main report of the SR-Site project. SKB TR-11-01, Hrsg: Svensk Kärnbränslehantering AB, S. 279–552: Stockholm, Sweden, März 2011.
- /SKB 11d/ Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB): Volume III. In: Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark. Main report of the SR-Site project. SKB TR-11-01, Hrsg: Svensk Kärnbränslehantering AB, S. 555–893: Stockholm, Sweden, März 2011.
- /SKB 94/ Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB) (Hrsg.): 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.
- /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. 1993.
- /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., Swedish Radiation Safety Authority (SSM, Strål Säkerhets Myndigheten): 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.
- /STUK 14/ STUK - Radiation and Nuclear Safety Authority: GUIDE YVL D.5. DISPOSAL OF NUCLEAR WASTE, YVL, D.5, 20 S., Radiation and Nuclear Safety Authority (STUK): Helsinki, 2014.

- /SUL 02/ Sultan, N., Delage, P., Cui, Y.: Temperature effects on the volume change behaviour of Boom clay, *Engineering Geology*, Bd. 64, S. 135–145, 2002.
- /SUVA 02/ Schweizerische Unfallversicherungsanstalt (SUVA): Verhütung von Unfällen durch Brände und Explosionen bei der Erstellung von Untertagbauten in Erdgas führenden Gesteinsschichten. Technisches Merkblatt, 1. Aufl., 16 S., Schweizerische Unfallversicherungsanstalt (SUVA): Luzern, Schweiz, März 2002.
- /SZA 07/ Szakálos, P., Hultquist, G., Wikmark, G.: Corrosion of Copper by Water, *Electrochemical and Solid-State Letters*, Bd. 10, Nr. 11, 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, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, ISBN 978-3-946607-10-6, 2016.
- /ZUI 08/ Zuidema, P., Albert, W., Gautschi, A., Gribi, P., Lambert, A., Müller, H., Schnellmann, M.: Darlegung der Anforderungen, des Vorgehens und der Ergebnisse. Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager, Nagra Technischer Bericht, Hrsg.: Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA), 08-03, 428 S., Oktober 2008.
- /ZUI 14/ Zuidema, P., Albert, W., Deplazes, G., Gautschi, A., Gribi, P., Hertrich, M., Madritsch, H., Ruff, M., Schneider, J., Schnellmann, M.: Sicherheitstechnischer Vergleich und Vorschlag der in Etappe 3 weiter zu untersuchenden geologischen Standortgebiete. Sicherheitstechnischer Bericht zu SGT Etappe 2. Textband, Nagra Technischer Bericht, Hrsg.: Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA), 14-01, 390 S., Dezember 2014.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 3.1	Sicherheitsfunktionen im französischen Sicherheitskonzept /AND 05b/	10
Abb. 3.2	Sicherheitsfunktionen zur Gewährleistung der Einschlusswirksamkeit /SKB 11b/	16
Abb. 3.3	Eine Kluft (durchgezogene rote Linie) verbindet die Einlagerungsstrecke mit Bohrloch 3 und verletzt somit das EFPC- kriterium. Die Bohrlöcher 1 und 2 verletzen ebenfalls das EFPC- Kriterium, da eine Projektion der Kluft (rote gestrichelte Linie) diese ebenfalls mit der Einlagerungsstrecke verbindet.....	17
Abb. 5.1	Konzeptionelle Darstellung der Auflockerungszone (links) mit geklüfteten Zonen (links) und beobachteten Scherbewegungen im Gestein (rechts) am Beispiel des Meuse/Haute-Mame Untertagelabores /AND 05b/	25
Abb. 5.2	Gasgefahrenstufen bei der Erstellung von Untertagebauten /SUVA 02/	29
Abb. 5.3	Zeitlicher Verlauf der Temperatur an der Behälteraußenseite für zwei unterschiedliche Bohrlöcher für verschiedenen Rechenfälle /HÖK 10/.....	32
Abb. 5.4	Temperaturerhöhung des Wirtsgesteins am Standort Forsmark, 50 Jahre (links) und 1.000 Jahre nach simultaner Einlagerung der hoch radioaktiven Abfälle (rechts) /HÖK 10/	33
Abb. 5.5	Anzahl an Erdbeben pro Jahr am Standort Olkiluoto in Abhängigkeit ihrer Magnitude /SAA 12/	37

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

Schwertnergasse 1
50667 Köln
Telefon +49 221 2068-0
Telefax +49 221 2068-888

Forschungszentrum
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