

**Weiterentwicklung einer  
Methode zum Vergleich  
von Endlagerstandorten  
in unterschiedlichen  
Wirtsgesteinsformationen**



## Weiterentwicklung einer Methode zum Vergleich von Endlagerstandorten in unterschiedlichen Wirtsgesteinsformationen

Klaus Fischer-Appelt  
Gerd Frieling  
Ingo Kock  
Martin Navarro  
Thomas Beuth  
Guido Bracke  
Thorsten Faß  
Jürgen Larue  
Kim-Marisa Mayer  
Holger Seher  
Eva Hartwig-Thurat

Oktober 2017

### **Anmerkung:**

Das diesem Bericht zugrunde liegende F&E-Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesamtes für kerntechnische Entsorgungssicherheit (BFE) sowie des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) unter dem Kennzeichen 05504/2 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**

Endlagersystemvergleich, Kristallin, Robustheit, Sicherheitsfunktionen, Sicherheitskonzepte, VerSi

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung und Zielsetzung .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Auswirkung der Forderung nach Rückholbarkeit und Bergbarkeit auf die Abwägungsmethode .....</b>	<b>3</b>
<b>2.1</b>	<b>Sachstand .....</b>	<b>4</b>
2.1.1	Begriffsbestimmung in Deutschland.....	4
2.1.2	Regulatorischer Rahmen in Deutschland.....	5
2.1.3	Zeitraumen .....	7
<b>2.2</b>	<b>Potenzielle Einflussnahme auf das Systemverhalten .....</b>	<b>8</b>
2.2.1	Maßnahmen zur Erleichterung einer Rückholung und Bergung .....	10
2.2.2	Einflüsse auf das Endlagersystem .....	11
<b>2.3</b>	<b>Bedeutung für die Abwägungsmethode .....</b>	<b>13</b>
2.3.1	Behälterauslegung.....	13
2.3.2	Relevanz der Sicherheitsfunktionen des Behälters .....	13
2.3.3	Umgang mit Überdimensionierungen bei der Robustheitsbewertung .....	14
2.3.4	Berücksichtigung veränderter Systemeigenschaften.....	15
2.3.5	Fazit.....	15
<b>3</b>	<b>Untersuchung der Erweiterbarkeit der Abwägungsmethode auf Standorte in kristallinem Wirtsgestein.....</b>	<b>17</b>
<b>3.1</b>	<b>Rahmenbedingungen in Deutschland.....</b>	<b>17</b>
3.1.1	Derzeitiger regulatorischer Rahmen und Konsequenzen für die Abwägungsmethode .....	17
3.1.2	Kristallgebiete in Deutschland .....	25
3.1.3	Tiefes Grundwasser in Deutschland .....	32
<b>3.2</b>	<b>Endlagerungskonzept für kristalline Wirtsgesteine .....</b>	<b>40</b>
3.2.1	Das KBS-3-Konzept.....	40
3.2.2	Abfallspektrum.....	46

3.2.3	Anwendbarkeit des KBS-3-Konzeptes auf deutsche Verhältnisse.....	50
<b>3.3</b>	<b>Allgemeine Erweiterungen der VerSi-Methode.....</b>	<b>53</b>
3.3.1	Modifikation des VerSi-Komponentenmodells.....	53
3.3.2	Rolle der Geosphäre bei Sicherheitskonzepten für Kristallin.....	58
3.3.3	Relevanz- und Robustheitsklassifizierung.....	64
3.3.4	Weitere Möglichkeiten der datenbankgestützten Analyse .....	75
3.3.5	Robustheitsvergleich für Endlagersysteme .....	79
<b>3.4</b>	<b>Identifikation, Klassifizierung und Relevanzwichtung der Sicherheitsfunktionen .....</b>	<b>82</b>
3.4.1	Sicherheitsfunktionen des KBS-3-Konzeptes.....	82
3.4.2	Erweiterung der Liste der Sicherheitsfunktionen für kristalline Wirtsgesteine.....	94
<b>3.5</b>	<b>Relevanzwichtung der Sicherheitsfunktionen für das Wirtsgestein Kristallin .....</b>	<b>121</b>
3.5.1	Wirkungsphasen für die Relevanzwichtung.....	121
3.5.2	Relevanzwichtung der Sicherheitsfunktionen.....	123
<b>3.6</b>	<b>Überprüfung des methodischen Änderungsbedarfes für Kristallinstandorte unter geringpermeabler Überdeckung.....</b>	<b>126</b>
<b>4</b>	<b>Untersuchung der Anwendbarkeit der Abwägungsmethode bei der Ermittlung von Standortregionen für übertägige Erkundung (Phase 1) .....</b>	<b>131</b>
<b>5</b>	<b>Schlussfolgerungen .....</b>	<b>135</b>
<b>5.1</b>	<b>Zusammenfassung der Ergebnisse.....</b>	<b>135</b>
5.1.1	Rückholung und Bergung .....	135
5.1.2	Kristallgebiete .....	136
5.1.3	Tiefe Grundwässer .....	136
5.1.4	Allgemeine Erweiterung der VerSi-Methode .....	137

5.1.5	Identifikation, Klassifizierung und Relevanzwichtung der Sicherheitsfunktionen .....	140
5.1.6	Überprüfung des methodischen Änderungsbedarfes für Kristallinstandorte unter geringpermeabler Überdeckung.....	141
5.1.7	Untersuchung der Anwendbarkeit der Abwägungsmethode bei der Standortauswahl für die übertägige Untersuchung.....	142
<b>5.2</b>	<b>Ausblick .....</b>	<b>143</b>
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	
<b>A.1</b>	<b>Allgemeines zur Kupfer-Korrosion.....</b>	<b>147</b>
<b>A.2</b>	<b>Kenntnisstand.....</b>	<b>148</b>
<b>A.3</b>	<b>Tiefes Grundwasser im skandinavischen Kristallin.....</b>	<b>149</b>
<b>A.4</b>	<b>Bentonit.....</b>	<b>152</b>
<b>A.5</b>	<b>Sulfat / Sulfid.....</b>	<b>153</b>
<b>A.6</b>	<b>Alkalische Lösungen.....</b>	<b>153</b>
<b>A.7</b>	<b>Lösungen mit Chlorid und Sulfat.....</b>	<b>154</b>
<b>A.8</b>	<b>Wasserstoffbildung unter anoxischen Bedingungen.....</b>	<b>154</b>
<b>A.9</b>	<b>Eh-pH-Phasendiagramme .....</b>	<b>155</b>
<b>A.10</b>	<b>Flächige und Lochkorrosion.....</b>	<b>157</b>
<b>A.11</b>	<b>Korrosion und Mikrobiologie.....</b>	<b>160</b>
<b>A.12</b>	<b>Bewertung.....</b>	<b>161</b>

**Abbildungsverzeichnis..... 163**

**Tabellenverzeichnis..... 165**

**Literaturverzeichnis..... 169**



# 1 Einleitung und Zielsetzung

In Deutschland wird zukünftig auf Grundlage des Standortauswahlgesetzes (StandAG /STA 17a/), ein Auswahlverfahren für Endlagerstandorte für hochradioaktive Abfälle durchgeführt. Im Rahmen des kriteriengesteuerten Auswahlprozesses erfolgt, auf Basis vorläufiger Sicherheitsuntersuchungen<sup>1</sup>, eine Einengung der Anzahl der Regionen bzw. Standorte für die jeweils nächste Phase des Verfahrens. Da keine Vorfestlegung auf einen bestimmten Wirtsgesteinstyp erfolgt, ist es aus heutiger Sicht nicht auszuschließen, dass sich die zu vergleichenden Lokationen in verschiedenen Wirtsgesteinsformationen befinden.

Die Sicherheitskonzepte für verschiedene Wirtsgesteine wie Tonstein, Salz und Kristallin unterscheiden sich so erheblich, dass ein sinnvoller, sicherheitsgerichteter Vergleich der Endlagersysteme sowie der Ergebnisse vorläufiger Sicherheitsuntersuchungen ohne weiteres kaum möglich ist. Für die Durchführung des Standortauswahlverfahrens ist es daher erforderlich, die technisch-wissenschaftlichen Grundlagen für einen Vergleich von Endlagersystemen in unterschiedlichen Wirtsgesteinen zu schaffen. Entsprechende Vorarbeiten aus anderen Ländern liegen dabei nicht vor, da man in denjenigen Ländern, in denen der Endlagersuchprozess sehr fortgeschritten ist (Schweiz, Frankreich, Schweden und Finnland), den Wirtsgesteinstyp für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle bereits vor der Standortsuche festgelegt hat.

---

<sup>1</sup> Nach StandAG /STA 17a/ sind auf Grundlage der erhobenen, bei den Behörden des Bundes und der Länder vorliegenden Daten, auf Grundlage der Ergebnisse der übertägigen und untertägigen Erkundung, sowie auf Grundlage des dem jeweiligen Verfahrensstandes entsprechenden konkretisierten Endlagerkonzeptes, vorläufige Sicherheitsuntersuchungen anzufertigen. In den vorläufigen Sicherheitsuntersuchungen gemäß Absatz 1 wird das Endlagersystem in seiner Gesamtheit betrachtet und entsprechend dem Stand von Wissenschaft und Technik hinsichtlich seiner Sicherheit bewertet.

In den Jahren 2007 bis 2010 hat die GRS im Rahmen eines vom BMUB geförderten Forschungsprojektes „Vergleichende Sicherheitsanalysen (VerSi)“ /FIS 10/ (im Folgenden VerSi I genannt) einen ersten Schritt zur Entwicklung einer Abwägungsmethode für verschiedene Wirtsgesteine unternommen. Es wurde eine verbal-argumentative Abwägungsmethode entwickelt, welche einen transparenten, kriteriengesteuerten Vergleich von Endlagersystemen in unterschiedlichen Wirtsgesteinsformationen auf der Basis einer Robustheitsbewertung von Sicherheitsfunktionen erlaubt. Im Zentrum der Untersuchung stand Steinsalz in steiler Lagerung und Tonstein. Kristallin wurde als mögliches Wirtsgestein nicht in Betracht gezogen.

Im vorliegenden Vorhaben entwickelt die Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH aufbauend auf der Abwägungsmethode des Projektes VerSi I den Stand von Wissenschaft und Technik weiter. Das Vorhaben wird im Folgenden VerSi II genannt. Hierbei werden folgende Aspekte betrachtet:

- Die Notwendigkeit der Modifikation der Abwägungsmethode infolge des Gebotes der Rückholbarkeit und der Bergbarkeit der Abfälle
- Die Erweiterbarkeit der Abwägungsmethode auf Standorte in kristallinem Wirtsgestein
- Die Anwendbarkeit der Abwägungsmethode bei der Auswahl geologischer Suchräume für die übertägige Untersuchung (Phase 1)

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse des Vorhabens. Dabei setzt er die Kenntnis der im Vorhaben VerSi I entwickelten Abwägungsmethode /FIS 10/ voraus.

## **2            Auswirkung der Forderung nach Rückholbarkeit und Bergbarkeit auf die Abwägungsmethode**

Die Sicherheitsanforderungen des BMUB /BMU 10/ enthielten erstmals die Forderung, dass die Möglichkeiten einer Rückholung für die Dauer der Betriebsphase eines Endlagers und die Möglichkeit einer Bergung für 500 Jahre nach dem geplanten Verschluss des Endlagers vorzusehen sind. Diese Forderung ist auch im StandAG /STA 17a/ enthalten.

Dieses Kapitel geht der Frage nach, ob sich aus den veränderten regulatorischen Randbedingungen Änderungen in der VerSi-Abwägungsmethode ergeben. Vor allem wird untersucht, ob in Bezug auf Rückholbarkeit und Bergbarkeit neue Sicherheitsfunktionen für Endlagerbehälter abgeleitet oder bestehende modifiziert werden müssen. Geprüft werden auch mögliche Konsequenzen für die Relevanz- und Robustheitsbewertung im Rahmen des Abwägungsverfahrens.

Existierende Konzepte und Ideen zur Rückholung und Bergung bzw. zum dafür erforderlichen Monitoring werden nur angerissen, da es hier primär um den Modifikationsbedarf der Abwägungsmethode geht. Aus diesem Grund werden auch mögliche Zielkonflikte zwischen den Maßnahmen zur Ermöglichung einer Rückholung und Bergung und Maßnahmen zur Gewährleistung der Langzeitsicherheit hier nicht behandelt.

Die Betrachtung beschränkt sich auf das Wirtsgestein Steinsalz, da die geforderte Zeitdauer für die Behälterintegrität bei den Sicherheitskonzepten für Tonstein und Kristallin ausreichend groß ist, um eine Bergung und Rückholung der Behälter zu gewährleisten. Für Endlagerbehälter im Tonstein wurde im Vorhaben VerSi /FIS 10/ von einer Anforderung der Dichtheit über 1.000 Jahre ausgegangen. Hintergrund ist die benötigte Zeitdauer bis zu einer nahezu vollständigen Quellung des Bentonits. Die gemäß dem schwedischen Endlagerkonzept KBS-3 für Kristallin geforderte Zeitdauer für die Behälterintegrität im Kristallin liegt sogar um 1 Größenordnung höher. Insofern ist eine Bergbarkeit dieser Behälter über 500 Jahre auch hier intrinsisch gegeben.

Im Folgenden wird zunächst der relevante Stand von W&T zur Rückholung und Bergung dargestellt und danach die potenzielle Beeinflussung des Endlagersystems durch die Maßnahmen zur Erleichterung einer Rückholung und Bergung. Abschließend wird die Bedeutung dieser Maßnahmen für die Abwägungsmethode betrachtet.

## 2.1 Sachstand

### 2.1.1 Begriffsbestimmung in Deutschland

Das StandAG /STA 17a/ trifft folgende Begriffsbestimmungen:

- **Bergung:** „ungeplantes Herausholen von radioaktiven Abfällen aus einem Endlager;“
- **Rückholbarkeit:** „die geplante technische Möglichkeit zum Entfernen der eingelagerten Abfallbehälter mit radioaktiven Abfällen während der Betriebsphase“

Eine ausführlichere Begriffsbestimmung findet sich im Abschlussbericht der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe (Endlagerkommission) /KOM 16/, der die Grundlage für das StandAG bildete:

- „*Rückholbarkeit* ist die Fähigkeit, hoch radioaktiven Abfall aus einem Endlager wieder zurückzuholen, wenn dieser bereits in einem Endlager eingelagert ist und die Einlagerungsstrecken beziehungsweise die Einlagerungsbohrlöcher teilweise endgültig verfüllt, beziehungsweise technisch verschlossen sind. Rückholung ist die konkrete Handlung, mit der die Abfallbehälter aus dem Endlager zurückgeholt werden. Rückholbarkeit setzt voraus, dass Vorkehrungen getroffen worden sind, die – ohne Beeinträchtigung der Sicherheit – eine Rückholung der Abfallbehälter erleichtern beziehungsweise gewährleisten, dass also entsprechende Technologien von der Infrastruktur bis hin zu den Behältern verfügbar sind.“
- „*Bergbarkeit* wird als die Möglichkeit der Rückholung von Behältern mit hoch radioaktivem Abfall verstanden, wenn das Endlagerbergwerk bereits vollständig verschlossen ist. Dies kann zum Beispiel durch das Auffahren eines zweiten Bergwerks in Nachbarschaft zu dem ursprünglichen Endlagerbergwerk erfolgen, über das die Bergung erfolgen kann. Voraussetzungen dafür sind die Wiederauffindbarkeit, das heißt die genaue Kenntnis der Lage der Abfälle zum Zeitpunkt der Einlagerung, sowie der intakte Zustand der Behälter.“

Weitere Definitionen zur Rückholbarkeit und Bergung finden sich auch in den Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ und dem StandAG von 2013 /STA 15/.Vergleicht man die Begriffsbestimmungen des StandAG /STA 17a/ mit denen der Fassung von 2013 /STA 15/, so zeigen sich beim Begriff der Rückholbarkeit keine gravierenden Unterschiede. Die Änderung trägt eher zur Konkretisierung der Gegenstände einer Rückho-

lung bei. Hinsichtlich des Begriffes „Bergung“ ist der Bezug zum Begriff „Rückholung“ durch die Einführung des Begriffes „Herausholen“ entkoppelt worden. Der weitaus größere Unterschied ist allerdings mit der Streichung des Textes „als Notfallmaßnahme“ verbunden. D. h., in der früheren Fassung des StandAG /STA 15/ fokussiert die Begriffsbestimmung auf eine Bergung in Verbindung mit einer Notfallmaßnahme. In der aktuellen Fassung /STA 17a/ sind die möglichen Gründe für das Herausholen der Abfälle breiter angelegt. So ist eine Bergung nun auch aus anderweitigen Gründen wie z. B. der Rücknahme von Entscheidungen möglich.

### **2.1.2 Regulatorischer Rahmen in Deutschland**

Im Folgenden werden allgemeine Sicherheitsanforderungen und Leitlinien sowie Ausführungen aus dem StandAG und Empfehlungen der Endlagerkommission zur Rückholbarkeit, Bergbarkeit und Überwachung aufgeführt:

#### **Sicherheitsanforderungen /BMU 10/**

Die Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle /BMU 10/ beinhalten die folgenden Ausführungen zu den Aspekten Rückholbarkeit und Bergung:

„8.6 Abfallbehälter müssen unter Berücksichtigung der darin verpackten Abfallprodukte und des sie umgebenden Versatzes folgende Sicherheitsfunktionen erfüllen:

- Für die wahrscheinlichen Entwicklungen muss eine Handhabbarkeit der Abfallbehälter bei einer eventuellen Bergung aus dem stillgelegten und verschlossenen Endlager für einen Zeitraum von 500 Jahren gegeben sein. Dabei ist die Vermeidung von Freisetzungen radioaktiver Aerosole zu beachten.
- In der Betriebsphase bis zum Verschluss der Schächte oder Rampen muss eine Rückholung der Abfallbehälter möglich sein.

Maßnahmen, die zur Sicherstellung der Möglichkeiten zur Rückholung oder Bergung getroffen werden, dürfen die passiven Sicherheitsbarrieren und damit die Langzeitsicherheit nicht beeinträchtigen.“ /BMU 10/

Die Teilanforderung der Vermeidung von Freisetzungen beinhaltet nicht die Forderung nach einer Gas- und Aerosoldichtheit der Behälter über den gesamten Bergungszeit-

raum. Die Anforderung zielt lediglich darauf ab, durch geeignete technische und planerische Maßnahmen bei der Auslegung der Endlagerbehälter weitere Freisetzungen während des Bergungsvorganges zu unterbinden. (Quelle: /ESK 11/)

Nicht gefordert ist ein Konzept zur Durchführung der Bergungsmaßnahme. Die Forderung richtet sich allein an die Handhabbarkeit der Abfallbehälter über den genannten Zeitraum. Folgt man der Begriffsbestimmung in den Sicherheitsanforderungen, dann bezeichnet die Bergung eine als Notfallmaßnahme durchgeführte Rückholung (siehe hierzu auch Kapitel 2.1.4). Auf der anderen Seite ist jedoch die Handhabbarkeit der Abfallbehälter für wahrscheinliche Entwicklungen zu belegen. Die wahrscheinlichen Entwicklungen umfassen jedoch keine Umstände, die die Einleitung einer Bergung (als Notfallmaßnahme) erfordern würde, denn ansonsten würde das geplante Endlager nicht die Genehmigungsvoraussetzung erfüllen.

### **Empfehlungen der Endlagerkommission**

Da das aktuelle StandAG auf den Arbeiten der Endlagerkommission beruht, erscheint es sinnvoll, als Hintergrund des regulatorischen Rahmens ebenfalls diese Arbeiten zu erwähnen. Nach Diskussionen über andere Entsorgungsoptionen erachtet die Endlagerkommission ein Endlagerbergwerk mit den Optionen der Reversibilität, Rückholung und Bergbarkeit als priorisiertes Konzept /KOM 16/.

Infolgedessen finden sich im Bericht der Endlagerkommission zahlreiche Vorschläge zu dieser Thematik. Unter anderem soll bzw. sollen (nach /KOM 16/)

- die Rückholung der Abfälle in einer Zeitdauer ähnlich der Einlagerung möglich sein,
- die Gebinde/Behälter so ausgelegt sein, dass eine Rückholung möglich ist,
- die Behälter, die Versatztechnologie und die Lagerorte so eingerichtet sein, dass eine Rückholung in angemessener Zeit möglich ist,
- der Verschluss so erfolgen, dass eine Wiederöffnung und Rückholung möglich ist,
- die Sicherheitsanforderungen Festlegungen zum Punkt „Anforderungen zur Ermöglichung von Rückholung oder Bergung“ /KOM 16/ enthalten,
- in einer Überarbeitung der Sicherheitsanforderungen die Prüfung angegangen werden, „ob für die Anforderung nach Bergbarkeit der dort genannte Zeitraum von

500 Jahren ausreichend ist“ /KOM 16/ und ob es weitere „Voraussetzungen für Rückholbarkeit oder Bergbarkeit“ /KOM 16/ gibt,

- das Konzept bzw. die Konzeptplanung für „das Bauwerk“ /KOM 16/ ein Konzept für die Rückholung bzw. Bergung beinhalten,
- der Flächenbedarf des Endlagers Flächen „für die Realisierung von Maßnahmen zur Rückholung von Abfallbehältern oder zur späteren Auffahrung eines Bergungsbergwerks“ /KOM 16/ einschließen sowie
- „die Behälterintegrität mindestens über einige hundert Jahre bestehen bleiben, um für den Fall einer notwendigen Fehlerkorrekturmaßnahme eine Bergung durchführen zu können“ /KOM 16/.

### **StandAG /STA 17a/**

Das Standortauswahlgesetz beinhaltet in Bezug auf die Rückholung und Bergung sowie Reversibilität folgende Festlegungen:

- Die Möglichkeit einer Rückholbarkeit für die Dauer der Betriebsphase des Endlagers und die Möglichkeit einer Bergung für 500 Jahre nach dem geplanten Verschluss des Endlagers sind vorzusehen.
- Das Standortauswahlverfahren ist nach Maßgabe der §§ 12 ff. reversibel.

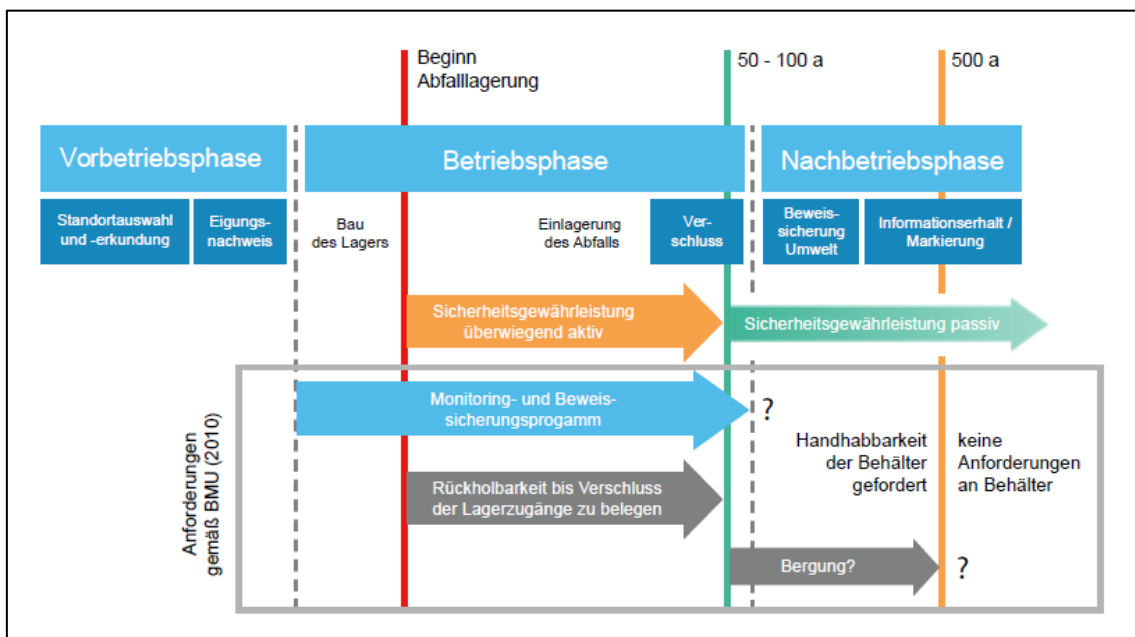
Weiterhin wird ausgeführt, dass als Vorkehrung für eine später ggf. erforderliche Bergung ausreichend Platz für das Auffahren eines Bergungsbergwerkes einzuplanen und bei wahrscheinlicher Entwicklung des Endlagers eine Handhabbarkeit der Abfallbehälter gegeben ist. Die Auslegung des Endlagers, soweit nicht sicherheitstechnisch nachteilig, darf eine spätere Bergung nicht erschweren.

### **2.1.3 Zeitrahmen**

Die Rückholung der Abfallbehälter muss gemäß den Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ in der Betriebsphase bis zum Verschluss der Schächte oder Rampen möglich sein. Ein Zeitraum für die Einlagerung der Abfälle in der Betriebsphase wird im Nationalen Entsorgungsprogramm /BMUB 15a/ aufgrund der Abhängigkeit vom Sicherheitskonzept nicht spezifiziert.

Nach /BOL 14/ ergibt sich der Gesamtzeitraum für die Handhabbarkeit der Endlagerbehälter aus der Summe der Zeitbereiche für die Bergbarkeit der Abfallbehälter von 500 Jahren, der Betriebszeit von rund 40 Jahren sowie einer nicht näher definierten Verschlussphase und beträgt damit rund 600 Jahre. Dazu käme ggf. noch eine Beobachtungs- bzw. „Monitoring“-Phase zwischen der Einlagerungs- und Verschlussphase.

Eine zeitliche Einteilung der Aspekte Rückholbarkeit, Bergung und Monitoring zeigt die Abb. 2.2, die sich nach /APP 15/ an den Angaben entsprechend den Sicherheitsanforderungen des BMU orientiert. Die Rückholbarkeit deckt den Zeitbereich von Beginn der Einlagerung der Abfallgebände bis zum Verschluss der Schächte oder Rampen des Endlagers ab. Daran anschließend muss für eine Dauer von 500 Jahren die Handhabbarkeit der Abfallbehälter für die wahrscheinlichen Entwicklungen bei einer eventuellen Bergung gegeben sein.



**Abb. 2.1** Darstellung der operativen Phasen in der Endlagerentwicklung (entnommen aus /APP 15/)

## 2.2 Potenzielle Einflussnahme auf das Systemverhalten

Für das VerSi-Abwägungsverfahren sind lediglich die ergriffenen Maßnahmen zur Erleichterung einer Rückholung und Bergung zu betrachten, nicht aber die direkten Folgen einer durchgeführten Rückholung oder Bergung. Bei einer Rückholung oder Ber-



gung ist nämlich eine erneute Einlagerung der entnommenen Endlagerbehälter nicht mehr vorgesehen. Sofern alle eingelagerten Behälter rückgeholt werden, ist der Erhalt der Barrieren und der langfristig sichere Einschluss nicht mehr entscheidend /BOL 14/. Dies gilt nicht für den Fall, wenn einzelne Behälter rückgeholt werden müssen, andere jedoch am Einlagerungsort verbleiben sollen.

Für das Abwägungsverfahren relevant sind jedoch die Folgen der Maßnahmen zur Erleichterung der Rückholbarkeit und Bergbarkeit, da diese das Endlagersystem modifizieren und damit auch die Robustheit des Endlagersystems im Hinblick auf dessen Langzeitsicherheit ändern können.

Zwischen der Rückholbarkeit und der Langzeitsicherheit treten verschiedene potenzielle Zielkonflikte auf, auch durch ein aufgrund der Zielsetzung der Rückholung bzw. Bergung möglicherweise durchzuführendes Monitoring des Endlagers. Zum Beispiel erhöht eine lange Offenhaltung der Grubenräume den Schädigungsgrad des Gebirges (Auflockerung), was hinsichtlich des sicheren Einschlusses der Radionuklide meist ungünstig ist. Das Auswahlverfahren geht davon aus, dass alle zu vergleichenden Endlagersysteme prinzipiell genehmigungsfähig sind, was bedeutet, dass die erwähnten Zielkonflikte soweit ausgeräumt sind, dass die Langzeitsicherheit in Übereinstimmung mit /STA 17a/, /BMU 10/ bzw. aktualisierten Sicherheitsanforderungen nicht entscheidend beeinträchtigt wird. Aus diesem Grund ist die Lösung der Zielkonflikte zwischen Rückholbarkeit und Langzeitsicherheit nicht Gegenstand dieser Betrachtung. Dennoch können die Zielkonflikte aufzeigen, in welcher Weise die Robustheit einzelner Barrieren durch die Rückholungsvorkehrungen beeinflusst werden kann.

Die folgende Auflistung möglicher Maßnahmen zur Erleichterung einer Rückholung und Bergung sowie ihre potenziellen Einflüsse auf die Langzeitsicherheit und Robustheit der Endlagerkomponenten konzentriert sich auf das Wirtsgestein Steinsalz. Entsprechende Betrachtungen sind jedoch für alle Wirtsgesteine empfehlenswert.

Die folgenden Kapitel geben einen Überblick über potentielle Maßnahmen zur Rückholung und zur Bergung. Die Informationen sind im Wesentlichen /BOL 14/, /BOL 12/ entnommen.

### 2.2.1 Maßnahmen zur Erleichterung einer Rückholung und Bergung

Im Folgenden werden potenzielle Maßnahmen, die eine Rückholung, Bergung und das zugehörige Monitoring erleichtern sollen, aufgezeigt. Inwieweit die einzelnen Maßnahmen für die jeweiligen Endlagerkonzepte, hinsichtlich der Betriebs- und Langzeitsicherheit umsetzungswürdig erscheinen, wird hier nicht betrachtet. Diese Diskussion kann nur anhand eines konkreten Standortes und Endlagerkonzeptes erfolgen. Gegenstand der Untersuchungen im Vorhaben VerSi II ist vielmehr die Untersuchung, ob die Forderungen nach Bergbarkeit und Rückholbarkeit Änderungen der Abwägungsmethode erfordern.

#### **Behälterkonzeption** (z. B. Tragzapfen, Form, Materialien)

- Vorrichtung an den Behältern zur Aufnahme und Transport der Abfallgebinde (Tragzapfen, Tragpilz, keramische Gleiter)
- Nutzung von handhabbaren Gebinden bzw. Abfallbehältern (geeignete Abmessung, Gewicht)
- Nutzung möglichst einheitlicher Behälter (wodurch die Entwicklung und Vorhaltung unterschiedlicher Rückholungstechniken vermieden wird)
- Nutzung von Behältermaterialien, die dem Alterungs- und Korrosionsprozess über den vorgesehenen Bergungszeitraum standhalten
- Konzeption einer geeigneten Behälterform (z. B. konisch bei der Bohrlochlagerung), die den Rückhol- und ggf. den Bergungsprozess erleichtert

Für Bohrlochkonzepte wurde im Vorhaben VSG /BOL 12/ das BSK-R-Konzept für eine rückholbare Kokille entwickelt. Die Konizität der BSK-R-Kokille soll das Ziehen der Behälter ggf. unter Rütteln aus der versatzgefüllten Bohrlochverrohrung erleichtern. Der Deckel der neuen Kokille ist mit einer Wandsteigung von 20° zum Tragpilz hin ausgestattet. Die Neigung soll das Abrieseln des Verfüllmaterials erleichtern. Die Bergbarkeit einer BSK-R-Kokille wurde dabei nicht untersucht.

#### **Endlagerauslegung** (z. B. Offenhaltung, ausreichende Zwischenräume, Infrastruktur)

- Offenhaltung von Einlagerungsbereichen oder Teilbereichen des Endlagerbergwerkes (Schächte, Rampen, Erkundungsbereich)

- Ausreichende Zwischenräume zwischen den Einlagerungsstrecken für die Auffahrung paralleler Rückholungsstrecken (Streckenlagerung)
- Zusätzliche Verrohrung und Versatz mit rieselfähigem Material (Bohrlochlagerung)
- Vorhaltung einer geeigneten Infrastruktur für die Zwischenpufferung und den Transport der Behälter (z. B. Gleise, Umschlagsplätze, Rampen, Verrohrung und Fahrbahnen).

**Arbeitsbedingungen** (z. B. akzeptable Arbeits- und Umgebungsbedingungen, automatisierte Arbeitsprozesse, Strahlenschutz)

- Schaffung von akzeptablen Arbeits- und Umgebungsbedingungen (Bewetterung, Wärmeableitung, Arbeitstemperatur)
- Planung von Endlagerkonzepten, die eine weitestgehend automatisierte maschinengestützte Rückholung bzw. Bergung der Abfallgebände ermöglichen (z. B. zum Freilegen, zur Aufnahme und zum Transport der Behälter)

**Technische Hilfsmittel** (z. B. erprobte Technik, Detektoren und Sensoren)

- Vorhaltung entsprechender Technik und Maschinen zur Rückholung
- Vorhaltung entsprechender Technik und Maßnahmen für das Monitoring
- Nutzung von Sensorik, Einbauten (Sender/ Empfänger), Materialien die eine Ortung/Detektion der Behälter ermöglichen (vereinfacht die Auffahrung paralleler Strecken sowie die Anwendung und Positionierung von Rückholungstechniken sowie das Monitoring)
- Nachgewiesene erprobte Technik für die Rückholung

### 2.2.2 Einflüsse auf das Endlagersystem

Im Folgenden werden mögliche Auswirkungen der Maßnahmen zur Erleichterung einer Rückholung oder Bergung auf die Langzeitsicherheit bzw. passive Sicherheit des Endlagers beispielhaft betrachtet.

## **Zusätzliche Auffahrungen**

Maßnahmen zur Temperaturminderung im Endlagerbergwerk und zur Überwachung des Endlagers in der Nachverschlussphase können zusätzliche Auffahrungen zur Bewetterung und zum Monitoring beinhalten.

## **Offenhaltung**

Technische Konzepte, die die Rückholung von Abfällen ermöglichen oder erleichtern sollen, erfordern oftmals das Offenhalten von Teilen des Endlagers. Die von einer Offenhaltung betroffenen Endlagerkomponenten sind der Einlagerungsbereich und der einschlusswirksame Gebirgsbereich, deren Auflockerung sich im Bereich der offengehaltenen Räume erhöht.

Die Offenhaltung im Steinsalz kann mit Maßnahmen zur Reduktion der Gebirgstemperatur einhergehen, um das temperaturabhängige Kriechen des Salzes zu verringern. Eine nachhaltige Temperaturreduktion (z. B. durch eine Minderung der thermischen Beladung) führt jedoch zu größeren Zeiträumen bis zum Erreichen des sicheren Einchlusses durch die Gebirgskonvergenz.

## **Größerer Flächenbedarf (Streckenlagerung gemäß VSG)**

Das Rückholungskonzept der VSG für die Streckenlagerung sieht für jede Einlagerungsstrecke die Auffahrung zweier flankierender Strecken vor. Hierdurch muss ein größerer Abstand zwischen den Einlagerungsstrecken eingehalten werden. Dies mindert in manchen Bereichen des Endlagers die Temperatur, sodass sich eine langsamere Konvergenz des Gebirges und eine langsamere Kompaktion des Salzgrusversatzes ergeben könnten.

## **Temperaturbegrenzung**

Die hohen Temperaturen, die nach Einlagerung von wärmeentwickelnden Abfällen im Endlagerbereich auftreten, können die Rückholung der Abfälle für das Betriebspersonal erschweren. Durch Kühlung der Wetter kann die Temperatur im Endlager begrenzt werden, um die Temperaturobergrenzen für die Arbeit im Rückholungsbergwerk einzuhalten.

## **Überwachungsmaßnahmen**

Um die Entscheidung zur Rückholung oder Bergung vornehmen zu können, muss ein Monitoring der Prozesse im Endlager oder in Teilen des Endlagers erfolgen. Auch wenn zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht bekannt ist, welche Prozesse oder Parameter überwacht werden sollen, können sowohl die notwendigen Sensorik als auch Maßnahmen zur Datenübertragung Einfluss auf verschiedene Aspekte der Langzeitsicherheit haben. Beispielsweise ist es denkbar, dass die nötige Messinfrastruktur Barrieren modifiziert und damit die Robustheit rückhaltender Sicherheitsfunktionen beeinflusst.

### **2.3 Bedeutung für die Abwägungsmethode**

#### **2.3.1 Behälterauslegung**

Die konkreten Endlagerkonzepte für Endlager im Steinsalz sind bis zu einer tatsächlichen Antragstellung noch nicht festgelegt. Wahrscheinlich ist jedoch, dass auch die Behälterkonzepte die Rückholbarkeit und Bergbarkeit in den jeweiligen Zeiträumen gewährleisten. Da bei Endlagern im Steinsalz die Behälter (je nach Sicherheitskonzept) nicht zwingend einen sicheren Einschluss gewährleisten müssen, kann die Gewährleistung der Rückholbarkeit und Bergbarkeit dazu führen, dass die Behälter mechanisch stabiler und korrosionsbeständiger ausgelegt werden, als dies für die Erfüllung der Langzeitsicherheit erforderlich wäre. Damit ergibt sich die Frage, woran sich die Relevanz- und Robustheitsbewertung im Sinne der VerSi-Abwägungsmethode orientieren sollte: An der Rückholbarkeit bzw. Bergbarkeit oder an der Langzeitsicherheit.

#### **2.3.2 Relevanz der Sicherheitsfunktionen des Behälters**

Die Relevanzbewertung der Sicherheitsfunktionen der Behälter für die VerSi-Abwägungsmethode kann unterschiedlich ausfallen, je nachdem, ob die Relevanz für die Rückholung bzw. Bergung oder aber die Relevanz für die Langzeitsicherheit gemeint ist. Beispielsweise kann bei einem Endlager im Steinsalz, das den Einschluss der Radionuklide im Wesentlichen durch die Abdichtungsbauwerke und den Versatz erzielt, die Behälterstabilität der Behälter für die Bergung relevanter sein als für die Langzeitsicherheit.

Für die im Abwägungsverfahren durchzuführende Relevanzbewertung der Behälter-Sicherheitsfunktionen wird festgestellt, dass es sich bei der zu bewertenden Relevanz

um die Relevanz für die Langzeitsicherheit handelt und nicht um die Relevanz für die Rückholbarkeit oder Bergbarkeit. Grund hierfür ist, dass Standortvergleiche schwerpunktmäßig auf der Basis der Langzeitsicherheit eines Endlagersystems erfolgen und nicht auf Basis ihrer Eignung für eine Rückholung oder Bergung.

### **2.3.3 Umgang mit Überdimensionierungen bei der Robustheitsbewertung**

Betrachtet man den Fall, dass die Behälter für die Rückholbarkeit und Bergbarkeit mechanisch stabiler und korrosionsbeständiger ausgelegt werden müssen, als dies für die Langzeitsicherheit notwendig wäre, dann liegt in Bezug auf die Erfordernisse der Langzeitsicherheit eine Überdimensionierung vor. Diese Überdimensionierung ist vergleichbar mit einer sehr konservativen Auslegung. Übertrieben konservative Auslegungsanforderungen sind im Rahmen der Abwägungsmethode auszuschließen, da „ansonsten die Vergleichbarkeit der Robustheit von Sicherheitsfunktionen nicht mehr gegeben ist“ /FIS 10/. Wie nachfolgend erläutert wird, müssen deshalb Überdimensionierungen im Abwägungsverfahren richtig behandelt werden, damit sie nicht zu einem ungerechtfertigten Robustheitsverlust einer Sicherheitsfunktion führen.

Vergrößert man beispielsweise aus Gründen der Rückhol- und Bergbarkeit die mechanische Festigkeit der Behälter über das für die Langzeitsicherheit nötige Maß hinaus (dies wäre eine Überdimensionierung in Bezug auf reine langzeitsicherheitsliche Anforderungen), so wird der Behälter zwar mechanisch robuster. Dieser Robustheitsgewinn bleibt jedoch im Abwägungsverfahren unberücksichtigt, wenn gleichzeitig auch die Robustheitskriterien für die Behältersicherheitsfunktionen strenger ausgelegt werden, etwa dadurch, dass man für einen charakteristischen Parameter „Festigkeit“ der Sicherheitsfunktion „Mechanische Stabilisierung“ (siehe Abschnitt 3.4.2) strengere Kriterien zugrunde legt (also eine höhere Festigkeit verlangt). Verschärft man auf diese Weise die Robustheitskriterien, um den Ansprüchen der Rückhol- und Bergbarkeit zu genügen, so fallen diese Kriterien hinsichtlich der Langzeitsicherheit zu streng aus. Die Folge ist, dass die Behälterrobustheit in Abwägungsverfahren schlechter bewertet wird, als sie in Hinblick auf die Langzeitsicherheit tatsächlich ist.

Im Abwägungsverfahren ist es also wichtig, dass die Kriterien für die Bewertung der Robustheit, sich allein an der zur Gewährleistung der Langzeitsicherheit *notwendigen* Auslegung orientieren. „Überdimensionierungen“ dürfen also nicht als Robustheitsgewinn der betreffenden Sicherheitsfunktionen gewertet werden.

Diese Feststellung ist allgemein gültig und beschränkt sich nicht auf die Sicherheitsfunktionen des Behälters. Sie ist auch unabhängig davon, ob eine Überdimensionierung aus Gründen der Rückholbarkeit bzw. Bergbarkeit oder aus anderen Gründen erfolgt.

#### **2.3.4 Berücksichtigung veränderter Systemeigenschaften**

Maßnahmen zur Erzielung der Rückholbarkeit und Bergbarkeit, wie sie in Kap 0 ausgeführt wurden, modifizieren grundsätzlich das Endlagersystem und können verschiedene Endlagerkomponenten betreffen. Die Beeinflussungen müssen dabei nicht eindeutig positiv oder negativ sein. Beispielsweise würde eine Vergrößerung der Behälterwandstärke zwar die Robustheit der Metallbehälter erhöhen, aber auch die Menge des gebildeten Gases vergrößern.

Im Abwägungsverfahren werden die Einflüsse der genannten Maßnahmen auf das Endlagersystem bei der Robustheitsbewertung einzelner Sicherheitsfunktionen mitbehandelt, da die Robustheitsbewertungen die Eigenschaften, Zustände und Entwicklungen des Systems (also auch des durch die Maßnahmen modifizierten Systems) berücksichtigen. Hierzu ist keine Modifikation der Abwägungsmethode notwendig.

#### **2.3.5 Fazit**

Die Bedeutung von Maßnahmen zur Ermöglichung einer Rückholung und Bergung für das Abwägungsverfahren lassen sich wie folgt zusammenfassen.

- Eine Modifikation bestehender Sicherheitsfunktionen aufgrund von Maßnahmen zur Ermöglichung der Rückholung und Bergung ist nicht erforderlich.
- Bei der Relevanzbewertung der Sicherheitsfunktionen ist die Relevanz für die Langzeitsicherheit und nicht die Relevanz für die Rückholung und Bergung zu betrachten. Dies betrifft insbesondere die Sicherheitsfunktionen des Behälters. Erüchtigungen von Behältern aus Gründen der Rückholbarkeit oder Bergbarkeit, die über das für die Langzeitsicherheit erforderliche Maß hinausgehen, dürfen nicht als Robustheitsgewinn gewertet werden.
- Maßnahmen zur Erleichterung bzw. Gewährleistung der Rückholung modifizieren das Endlagersystem und können verschiedene Endlagerkomponenten beeinflus-

sen. Dies wird bereits bei der Robustheitsbewertung der Sicherheitsfunktionen berücksichtigt.

Die Abwägungsmethode bedarf daher, unter Beachtung obiger Punkte, keiner Modifikation.



### **3 Untersuchung der Erweiterbarkeit der Abwägungsmethode auf Standorte in kristallinem Wirtsgestein**

Die VerSi-Abwägungsmethode wurde für die Wirtsgesteine Salz- und Tonstein entwickelt. Nach StandAG /STA 17a/ muss neben den Wirtsgesteinen Salz und Tonstein auch Kristallin in der Standortsuche berücksichtigt werden. Um eine Abwägung bzw. Vergleichbarkeit auch für kristallines Wirtsgestein zu ermöglichen, wird in den folgenden Kapiteln der Erweiterungsbedarf der Abwägungsmethode für Standorte im kristallinen Wirtsgestein dargestellt.

In Kapitel 3 werden die folgenden Aspekte behandelt:

- Beschreibung der Rahmenbedingungen in Deutschland sowie des für die Betrachtungen zu Grunde gelegten Sicherheitskonzepts
- Beschreibung der Erweiterung und Anpassung der Sicherheitsfunktionen.
- Bewertung der Sicherheitsfunktionen anhand ihrer Relevanz in Bezug zu den Komponenten.
- Überprüfung des methodischen Änderungsbedarfes für Kristallinstandorte unter geringpermeabler Überdeckung

#### **3.1 Rahmenbedingungen in Deutschland**

##### **3.1.1 Derzeitiger regulatorischer Rahmen und Konsequenzen für die Abwägungsmethode**

Zum Zeitpunkt der Abfassung dieses Berichts war der regulatorische Rahmen zur Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in Veränderung begriffen. Der *„Entwurf eines Gesetzes zur Fortentwicklung des Gesetzes zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle und anderer Gesetze“* (im Folgenden "StandAG" genannt) ist am 5. Mai 2017 im Bundesanzeiger veröffentlicht worden /STA 17b/. Am 20. Juli 2017 wurde eine Änderung bzgl. vorläufiger Sicherheitsuntersuchungen vom Gesetzgeber ergänzt /STA 17a/, so dass diese Fassung die derzeit gültige darstellt. Zur vollständigen Regulierung wird derzeit das untergeordnete Regelwerk bearbeitet: Verordnungen zu vorläufigen Sicherheitsanalysen sowie eine erforderliche Aktualisierung der Sicherheitsanforderungen, die sich zurzeit

auf dem Stand von 2010 /BMU 10/ befinden, sind in Bearbeitung. In der Konsequenz galt es zum Zeitpunkt der Bearbeitung des Vorhabens einige Unterschiede zwischen den „alten“ Sicherheitsanforderungen und dem „neuen“ StandAG zu beachten.

Im StandAG werden zahlreiche zentrale Begriffe definiert, die teilweise für die Modifikationen der Abwägungsmethode von Bedeutung sind, da sie zum Beispiel die Nomenklatur von Endlagerkomponenten betreffen. Diese Definitionen sind teilweise den Definitionen in den Sicherheitsanforderungen sehr ähnlich, teilweise auch deutlich anders. Nicht alle in den Sicherheitsanforderungen definierten Begriffe sind im StandAG zu finden, gleichzeitig sind weitere Definitionen im StandAG hinzugekommen (s. u.). Die folgenden Begriffe werden als potentiell bedeutsam für die Abwägungsmethode eingeschätzt. Ihre Bedeutung und der Umgang mit diesen Begriffen im aktuellen Vorhaben werden im Folgenden beschrieben.

Nicht in den Sicherheitsanforderungen enthalten, aber im StandAG definiert, sind der Begriff des **Einlagerungsbereichs** und des **Endlagerbereichs**. Die Begriffe **Endlagerbergwerk** und auch **Einschluss** sind im StandAG nicht mehr vorhanden.

Im StandAG vorhanden sind die Begriffe des **Endlagersystems**, der **Barriere**, des **Deckgebirges** und vor allem des **einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (ewG)**.

#### **3.1.1.1 Endlagerbereich**

Der Begriff des Endlagerbereichs ist in /STA 17a/ als ein Gebirgsbereich definiert, in welchem ein Endlagersystem ist oder realisiert werden soll. Im Rahmen des StandAG wird der Begriff vor allem in § 22 (Ausschlusskriterien) und auch in den Anlagen 3 und 8 verwendet.

#### **Konsequenzen und Annahmen für VerSi II**

Der Begriff „Endlagerbereich“ dient der Eingrenzung von Suchgebieten im Standortauswahlverfahren und bezeichnet keine spezielle Komponente im Endlagersystem. Aus diesem Grund muss er in der Abwägungsmethode nicht berücksichtigt werden, da ja die Relevanz und Robustheit der Sicherheitsfunktionen von Endlagerkomponenten betrachtet wird.

### **3.1.1.2 Endlagersystem**

Zentraler Begriff für Vorhaben VerSi I war das Endlagersystem, denn die übergeordnete Zielsetzung dieses Vorhabens war „...die Entwicklung einer Systematik für einen Vergleich von zwei Endlagersystemen in unterschiedlichen Wirtsgesteinsformationen im Hinblick auf ihre Sicherheit in der Phase nach Verschluss ...“ /FIS 10/.

Während für das Vorhaben VerSi I das Endlagersystem im Sinne der Sicherheitsanforderungen verstanden wurde, ist im StandAG (§2 (10)) eine andere Definition dieses zentralen Begriffs zu finden. Der Unterschied zwischen beiden Definitionen ist der Berücksichtigung des Wirtsgesteins Kristallin geschuldet. Im Unterschied zur Formulierung in /BMU 10/ werden im StandAG nun die Barrieren als expliziter Bestandteil des Endlagersystems benannt, wobei als Barrieren sowohl geologische als auch technische und geotechnische Barrieren definiert werden (siehe §2 (7) und (8)). Das Endlagersystem wird im StandAG also umfassender definiert.

### **Konsequenzen und Annahmen für VerSi II**

Das Endlagersystem bleibt zentraler Begriff dieser Abwägungsmethode und kann durch die Neudefinition im StandAG weiter im ursprünglichen Sinn benutzt werden, da die definitorischen Änderungen ohne Konsequenz für die Abwägungsmethode bleiben.

### **3.1.1.3 Einlagerungsbereich**

Auch der neu (vgl. Sicherheitsanforderungen) eingeführte Begriff des Einlagerungsbereichs ist auf die zusätzliche Berücksichtigung des Wirtsgesteins Kristallin zurückzuführen. Für den Fall, dass das Einschlussvermögen des Endlagersystems wesentlich auf technischen und geotechnischen Barrieren beruht, zählt zum Einlagerungsbereich auch der Teil des Gebirges der die Funktionsfähigkeit und den Erhalt der Barrieren gewährleistet. Damit kommt diesem Begriff für ein Endlager im Kristallin (welches zum Beispiel dem schwedischen Konzept ähnelt) eine erhebliche und umfassende Bedeutung zu: Der Begriff des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (ewG, s. u.) entfällt dabei für Endlagersysteme im Kristallin. Folglich sind die Mindestanforderungen sowie Abwägungskriterien nach StandAG (§23 (4) und (5) sowie §24 (2)) nun auf den Einlagerungsbereich anzuwenden.

## **Konsequenzen und Annahmen für VerSi II**

Für das Vorhaben gibt es eine Vielzahl von Konsequenzen, die nicht nur mit der Definition des Begriffs Einlagerungsbereich zusammenhängen, sondern auch unmittelbar die Frage betreffen, wie der sichere Einschluss bei Endlagersystemen im Kristallin gezeigt werden kann bzw. soll. Vergleichbar zum ewG (in den bisherigen Sicherheitsanforderungen und dem neuen StandAG) wird mit dem Einlagerungsbereich im neuen StandAG a priori keine bestimmte räumliche Ausdehnung (also keine spezifizierte Länge, Breite oder Höhe) verknüpft. Unter anderem deshalb wird in Kap. 3.3.2 dargestellt, in welcher Weise der Einlagerungsbereich dimensioniert werden könnte.

Der Einlagerungsbereich muss als neue Komponente in die Abwägungsmethode aufgenommen werden. Der Grund besteht darin, dass ihm – per Definition in /STA 17a/ – integritätserhaltende Sicherheitsfunktionen zugeordnet werden, falls das Einschlussvermögen des Endlagersystems wesentlich auf technischen und geotechnischen Barrieren beruht. Darüber hinaus wird die Komponente Einlagerungsbereich methodisch benötigt, um für Endlager im Kristallin die Sicherheitsfunktion „Dispersion“ einzuführen (siehe dazu Kapitel 3.3.2).

### **3.1.1.4 Barrieren**

In den Sicherheitsanforderungen ist der Begriff der Barriere allgemein als natürliche oder technische Komponente des Endlagersystems definiert, welche verschiedene Sicherheitsfunktionen „wahrnehmen“ /BMU 10/ kann.

Im StandAG werden die Begriffe der geologischen Barriere und der technischen und geotechnischen Barrieren definiert, die jeweils eine Ausbreitung von Radionukliden verhindern oder behindern sollen.

## **Konsequenzen und Annahmen für VerSi II**

In der Abwägungsmethode wird jede einzelne Barriere betrachtet und mit ihren zugehörigen Sicherheitsfunktionen in ihrer Relevanz und Robustheit bewertet. Die Definitionen der Barrieren in den Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ und dem StandAG unterscheidet sich letztlich nur geringfügig. Insofern bestehen keine Auswirkungen auf die Abwägungsmethode.

### 3.1.1.5 Deckgebirge

Die Definition des Begriffs „Deckgebirge“ hat sich im StandAG gegenüber der im Vorhaben VerSi I verwendeten Definition geändert. Das Deckgebirge nach StandAG ist nicht im geologischen Sinn als eine das Grundgebirge überlagernde, sedimentäre Auflage zu verstehen, sondern bezeichnet unabhängig von der Gesteinszusammensetzung die Teile des Gebirges, die sich oberhalb des ewG oder des Einlagerungsbereichs befinden.

### Konsequenzen und Annahmen für VerSi II

Die Definition des Deckgebirges im StandAG hat Konsequenzen für die Abwägungsmethode. Im Vorhaben VerSi I wurde unterschieden zwischen

- dem oberhalb des ewG anschließenden Wirtsgestein („weiteres Wirtsgestein“) und
- weiteren geologischen Formationen, die sich oberhalb des Wirtsgesteins befinden.

Insofern muss die Abwägungsmethodik dahin gehend verändert werden, dass die beiden oben genannten Komponenten zum Deckgebirge im Sinne des StandAG zusammengefasst werden.

### 3.1.1.6 Einschlusswirksamer Gebirgsbereich

Die Sicherheitsanforderungen von 2010 sind nicht vor dem Hintergrund der Möglichkeit eines Wirtsgesteins Kristallin formuliert worden, während das StandAG explizit dieses Wirtsgestein berücksichtigt. Am deutlichsten wird dies im Umgang mit dem „einschlusswirksamen Gebirgsbereich“ (ewG), der in /BMU 10/ ohne Ausnahme wesentlicher Teil des Endlagersystems ist, während in /STA 17a/ davon ausgegangen wird, dass er für ein Endlagersystem, dessen Einschlussvermögen wesentlich auf technischen und geotechnischen Barrieren beruht<sup>2</sup>, nicht unbedingt vorhanden sein muss. An die Stelle des ewG tritt in diesem Fall der Einlagerungsbereich. Für den ewG fokussieren bisher zahlreiche geforderte Nachweise nach /BMU 10/ auf:

---

<sup>2</sup> Im Folgenden wird vereinfacht davon ausgegangen, dass dies für Kristallingestein der Fall ist. In der Folge kann – wie auch in /STA 17a/ explizit erwähnt – für Kristallingestein anstelle eines Nachweises geringer Gebirgsdurchlässigkeit für den einschlusswirksamen Gebirgsbereich der Nachweis treten, dass ein sicherer Einschluss mittels technischer und geotechnischer Barrieren möglich ist.

1. den Erhalt der Barrierewirkung der geologischen Barriere im Nachweiszeitraum (Integritätserhalt des ewG),
2. einer zwar „langfristigen“ aber nicht für den Nachweiszeitraum zu zeigenden Robustheit der technischen Komponenten sowie
3. auf den Nachweis einer geringeren zusätzlichen effektiven Dosis von 0,01 mSv/a für wahrscheinliche bzw. 0,1 mSv/a für weniger wahrscheinliche Entwicklungen im Nachweiszeitraum.

Analog zu den zu erbringenden Nachweisen für den ewG in der bisherigen Form kann man davon ausgehen, dass auch für den Einlagerungsbereich in einem Endlager im Kristallingestein zahlreiche Nachweise (möglicherweise andere als für den ewG) erbracht werden müssen.

### **Konsequenzen und Annahmen für VerSi II**

Der ewG ist und bleibt Bestandteil der Abwägungsmethode, da ihm integritätserhaltende und rückhaltende Sicherheitsfunktionen zugeordnet werden, sofern das Einschlussvermögen des Endlagersystems nicht wesentlich auf technischen und geotechnischen Barrieren beruht. Wenn das Endlagersystem hingegen wesentlich auf technischen und geotechnischen Barrieren beruht, ist ein ewG nicht erforderlich. Der Einlagerungsbereich umfasst in diesem Fall auch Bereiche des Gebirges, die die Funktionsfähigkeit und den Erhalt der technischen und geotechnischen Barrieren gewährleisten. Daher werden dem Einlagerungsbereich entsprechende integritätserhaltende Sicherheitsfunktionen zugeordnet.

In diesem Vorhaben wird davon ausgegangen, dass für alle zu vergleichenden Standorte (vorläufige) Sicherheitsuntersuchungen durchgeführt wurden und dass das Ergebnis dieser Sicherheitsuntersuchungen nicht gegen prinzipielle Genehmigungsfähigkeit der zu vergleichenden Standorte spricht. Diese Annahme ist auch bereits in VerSi I getroffen worden /FIS 10/ und muss entsprechend auch für das zu vergleichende Endlagersystem im Wirtsgestein Kristallin gelten. In den jetzigen und zukünftigen Sicherheitsanforderungen werden deshalb Nachweise gefordert (werden), welche den Erhalt der integritätserhaltenden Sicherheitsfunktionen zeigen.

Demnach müssen auch alle Nachweise, die in den noch neu zu fassenden Sicherheitsanforderungen formuliert werden, erfüllt bzw. in vorläufiger Hinsicht erfüllt sein.

Damit das Vorhaben VerSi II für Kristallin durchgeführt werden kann, werden bezüglich der Nachweise der zukünftigen Sicherheitsanforderungen Annahmen getroffen, die den Nachweis der Langzeitsicherheit für ein postuliertes Endlagersystem im Kristallin betreffen und sich an /BMU 10/ anlehnen.

Für potentielle Standorte im Kristallingestein in Deutschland werden folgende Annahmen für solche Standorte getroffen:

1. Das Wirtsgestein Kristallin, sowie für die Genehmigungsfähigkeit des Endlagers darüber hinaus evtl. notwendigen Gebirgsbereiche (ggf. inklusive Teile des Deckgebirges), bleiben im Nachweiszeitraum mit den geforderten Eigenschaften erhalten.
2. Der Erhalt der rückhaltenden Eigenschaften der (geo)technischen Komponenten kann für den gesamten Nachweiszeitraum gezeigt werden.
3. Es kann für wahrscheinliche Entwicklungen gezeigt werden, dass für eine Person eine geringere als die eine zusätzliche effektive Dosis von 0,01 mSv/a (bzw. 0,1 mSv/a für weniger wahrscheinliche Entwicklungen) im Nachweiszeitraum auftritt.

### **3.1.1.7 Einschluss der Radionuklide**

Ein wichtiger Unterschied zwischen /BMU 10/ und /STA 17a/ ist in der Begrifflichkeit des Einschlusses erkennbar. Während in /BMU 10/ der Einschluss so definiert ist, dass die Radionuklide im Wesentlichen am Einlagerungsort verbleiben, fehlt in /STA 17a/ eine Definition von „Einschluss“ oder „sicherer Einschluss“, obwohl dies in /STA 17a/ ein zentraler Begriff ist.

Nach §26 (1) StandAG sind (die noch zu verfassenden) Sicherheitsanforderungen die wesentliche Grundlage, um den sicheren Einschluss von Radionukliden zu bewerten. In §26 (2) Absatz 1 wird wiederum zwischen ewG-basierten und einlagerungsbereichsbasierten Sicherheitskonzepten unterschieden. Für beide Konzepte ist zu gewährleisten, dass die Schadstoffe (radioaktive und sonstige) konzentriert und eingeschlossen werden.

## **Konsequenzen und Annahmen für VerSi II**

Im Sinne der „alten“ Sicherheitsanforderungen und hinsichtlich einer Abgrenzung zum sog. „vollständigen Einschluss“, wie er zum Beispiel im Sicherheitskonzept der VSG /MÖN 12/ gebraucht wurde, wird im vorliegenden Vorhaben davon ausgegangen, dass der „sichere Einschluss“ nicht bedeutet, dass sämtliche Radionuklide im Endlager verbleiben (dies wäre ein vollständiger Einschluss), sondern dass ein allenfalls geringer Anteil von Radionukliden das Endlager verlassen darf. Es ist dabei anzumerken, dass es für die zulässige Größe dieses Anteils zurzeit noch keine regulatorischen Vorgaben gibt, solange die Schutzziele eingehalten werden. Wie in Kapitel 3.3.2 in Bezug auf das Verdünnungsverbot ausgeführt wird, ist eine solche regulatorische Vorgabe jedoch zu empfehlen, da Dosisgrenzwerte allein nicht ausreichen, um einen sicheren Einschluss im Sinne der Rückhaltung nachzuweisen.

Im Rahmen des Vorhabens VerSi II wird davon ausgegangen, dass der sichere Einschluss und die Einhaltung der Schutzziele für alle betrachteten Endlagerkonzepte durch die durchgeführten Sicherheitsanalysen gezeigt werden konnte und die endgelagerten Radionuklide im Wesentlichen am Einlagerungsort verbleiben, unabhängig davon ob es sich um ein ewG-basiertes oder im Wesentlichen auf technischen und geotechnischen Barrieren beruhendes Sicherheitskonzept handelt.

In der aktuellen Fassung des /STA 17a/ ist als Zweck des Gesetzes in §1 ein Zeitraum von einer Million Jahren angegeben für den (u. a.) der dauerhafte Schutz von Mensch und Umwelt gewährleistet werden soll. Eine explizite Festlegung des Nachweiszeitraums ist im StandAG nicht angegeben. Allerdings wird im Text des Gesetzes häufig der „Nachweiszeitraum von einer Million Jahren“ erwähnt.

Auch in Schweden wird der Sicherheitsnachweis über insgesamt 1 Million Jahre geführt /SKB 11a/. Allerdings ist eine detaillierte Risikoanalyse nur für die ersten tausend Jahre und eine quantitative Risikoanalyse nur für ungefähr 100.000 Jahre notwendig /SKB 11a/. Nach /SKB 11a/ muss trotzdem für eine Million Jahre gezeigt werden, dass eine Freisetzung aus den technischen und geologischen Barrieren begrenzt ist.



## **Konsequenzen und Annahmen für VerSi II**

Für das Vorhaben VerSi II wird für alle Wirtsgesteine und Sicherheitskonzepte einem Nachweiszeitraum von einer Million Jahren ausgegangen, wie es auch in den noch geltenden Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ der Fall ist.

### **3.1.2 Kristallingebiete in Deutschland**

Im Nachfolgenden wird überprüft, ob die geologischen und hydrochemischen Randbedingungen in den deutschen Kristallingebieten in etwa vergleichbar mit denen in Schweden sind oder aber gravierende Unterschiede bestehen, die offensichtlich gegen die Verwendung des KBS-3 Konzepts als Referenzkonzept für VerSi II sprechen.

Kristallin wird durch eine hohe Stabilität sowie Temperaturbelastbarkeit charakterisiert. Dabei bietet es eine geringe Lösungsanfälligkeit und im ungeklüfteten Zustand eine sehr geringe Durchlässigkeit /BRA 08/. Ist das Gestein jedoch geklüftet, wie dies in der Regel der Fall ist, ist es durchlässig für Fluide, weshalb der Einschluss von Abfällen zusätzlich durch geotechnische Barrieren gewährleistet werden muss.

Die deutschen Kristallinvorkommen der variszischen Orogenese weisen ein Alter von ca. 300 Mio. Jahre auf. Tektonische Prozesse haben diese Kristallinvorkommen im Laufe der Zeit deutlich beansprucht und teufenabhängig geklüftet. Im Vergleich hierzu ist die Klüftung im Kristallin des Baltischen Schildes, wie etwa in Schweden, Finnland oder Kanada, obwohl dieses seit 1,2 bis 3 Milliarden Jahren besteht, geringer /PAP 99/, /ROT 09/.

Ob ein Kristallinvorkommen als Standort für radioaktive Abfälle geeignet ist, hängt unter anderem von der tektonischen Situation, der Ausdehnung sowie Mächtigkeit und Tiefenlage des Kristallins ab. Untersuchungen im Rahmen der Standortsuche für ein Endlager für radioaktive Abfälle gibt es zu diesem Gesteinstyp in Deutschland bisher nur wenige. Meist kann sich nur auf eine geringe Datendichte bezogen werden, die im Rahmen von Lagerstättenerkundungen gewonnen wurden. Durch /BRÄ 94/ wurden nicht-salinare Formationen ohne geringpermeable Überdeckung in Deutschland im Rahmen einer Vorauswahl aufgelistet /JOB 16/, die nach Ansetzen von geologischen und geotechnischen Ausschlusskriterien übrig geblieben waren.

Die Autoren des Berichtes /BRÄ 94/ weisen darauf hin, dass auf Angaben zur hydraulischen Durchlässigkeit zur Zeit der Studie „bewusst verzichtet [wurde], da Werte ohne spezielle Standortuntersuchungen unvollständige Aussagen darstellen und zu falschen Schlüssen bei der Beurteilung von Kristallinvorkommen führen könnten /BRÄ 94/“.

Die Studie kam zu dem Schluss, dass die folgenden Kristallin-Standorte im Zuge des Standortauswahlverfahrens weiter betrachtet werden sollten, da die berücksichtigten Randbedingungen auf eine Eignung als Endlagerstandort hinweisen und genauere Untersuchungen zu einer endgültigen Schlussfolgerung erforderlich sind /BRÄ 94/, /JOB 16/. In /BRÄ 94/ wurden folgende Kristallinvorkommen in Deutschland als untersuchungswürdig eingestuft:

Bayerisches Kristallin:

- Teilbereich des Fichtelgebirges (Bayern ca. 360 km<sup>2</sup>)
- Nördlicher Oberpfälzerwald (Bayern ca. 385 km<sup>2</sup>)
- Saldenburg-Granit (Bayern ca. 137 km<sup>2</sup>)

Erzgebirge/Vogtländisches Schiefergebirge:

- Graugneiskomplex (Sachsen ca. 1.347 km<sup>2</sup>)
- Granulitgebirge
- Granulitkomplex (Sachsen ca. 530 km<sup>2</sup>)

Lausitzer Scholle:

- Granodiorit von Radeberg-Löbau (Sachsen ca. 1.038 km<sup>2</sup>)
- Granodiorit von Pulsnitz (Sachsen ca. 716 km<sup>2</sup>)
- Granodiorit von Zawidow (Sachsen ca. 279 km<sup>2</sup>)

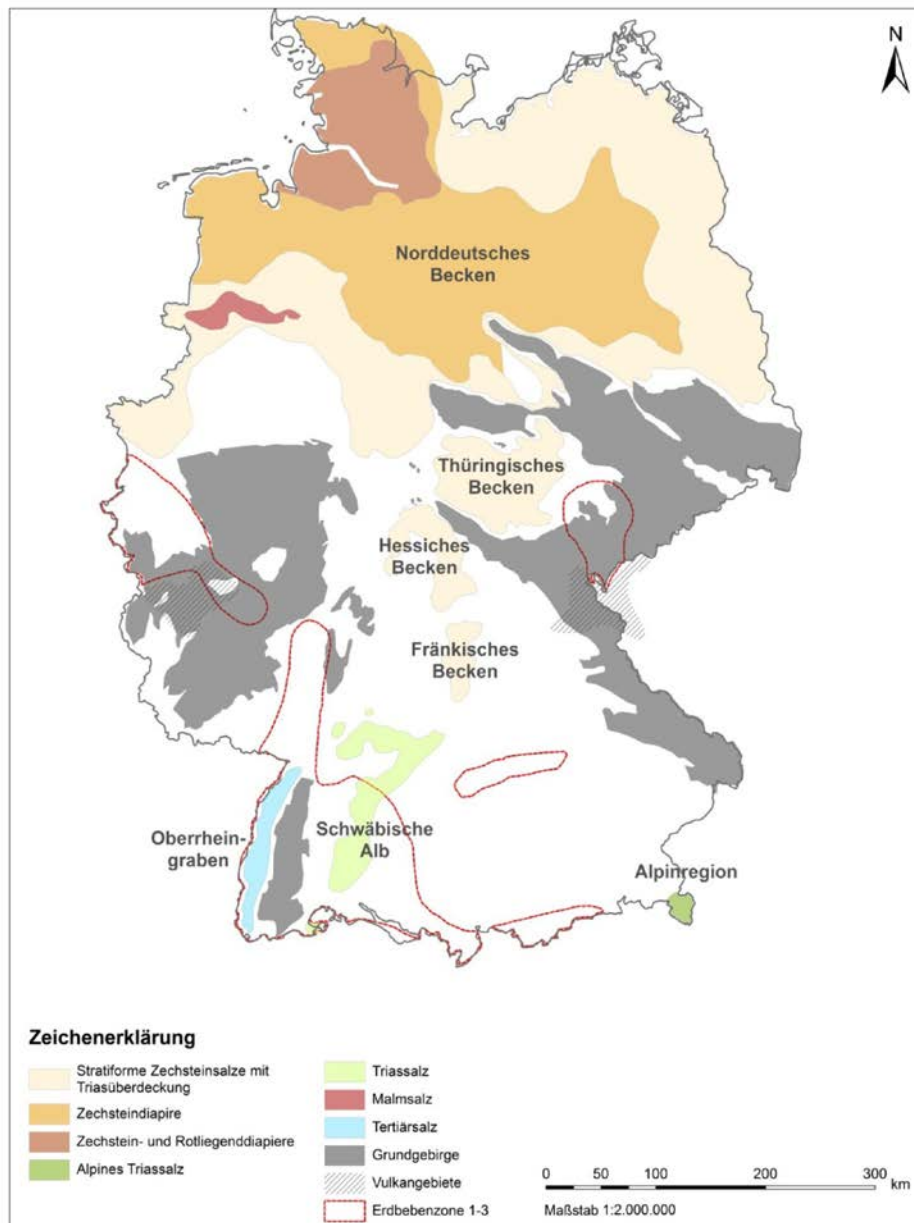
Halle-Wittenberger Scholle:

- Granodiorit von Pretzsch (Sachsen-Anhalt ca. 164 km<sup>2</sup>)
- Granodiorit von Prettin (Sachsen-Anhalt, Brandenburg, Sachsen ca. 221 km<sup>2</sup>)

Große Kristallingebiete sind in Deutschland zudem unter einer Sedimentbedeckung von ca. 1.000 m zu finden. Zu nennen sind hier Gebiete im Moldanubikum, einem ca. 100 km breiten Gebiet, das sich zwischen dem Schwarzwald und dem Bayerischen Wald erstreckt, oder der Mitteldeutschen Kristallzone /JOB 16/.

Befinden sich Kristallinvorkommen unter einer Sedimentbedeckung, so könnten die dort befindlichen Endlagersysteme (abhängig vom Sicherheitskonzept) von den Schutzwirkungen der darüber liegenden Schichten profitieren. Eine geringpermeable Überdeckung bietet beispielsweise mit ihrer geringeren Durchlässigkeit Schutz vor Fluiden. Eine entsprechende Mächtigkeit der sedimentären Überdeckung trägt zum zusätzlichen Schutz vor Erosion bei. Der Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd) hat eine maximale Tiefe für ein Endlager von 1.500 m festgelegt /AKE 02/, /SCH 15/.

Vorkommen mit geringpermeabler Salzüberdeckung wurden durch /SCH 15/ beschrieben und bewertet. Außerhalb von Erdbebenzonen und tektonisch beanspruchten Bereichen können Kristallinvorkommen mit flachlagernder Salzüberdeckung in lokalen Senken sowie im Randbereich des norddeutschen Beckens gefunden werden. Wie Abb. 3.1 entnommen werden kann, befinden sich in Mitteldeutschland muldenförmige Kristallinvorkommen, in denen saline Sedimente eingelagert sind. Zu nennen sind hier das Thüringische, Hessische und Fränkische Becken /SCH 15/.



**Abb. 3.1** Gebiete mit salinärer Überdeckung in Deutschland mit Berücksichtigung von Erdbebenzonen /SCH 15/

Im Rahmen umfassender Untersuchungen der Eigenschaften möglicher Wirtsgesteine wurden durch /APP 02/ Daten zur Durchlässigkeit in Gneisen und Graniten zusammengetragen. Hierbei handelt es sich um eine Fusion von Daten internationaler Analysen, in die Untersuchungsergebnisse an deutschen Standorten (v. a. Schwarzwald und Tiefbohrungen in der Oberpfalz) mit eingeflossen sind.

**Tab. 3.1**  $k_f$ -Werte für Gneise in den einzelnen Untersuchungsgebieten /APP 02/

Untersuchungsgebiet	n	mittlere Testtiefe (m u. G.)	$k_f$ -Werte (m/s)			
			Minimalwert	Maximalwert	Geometr. Mittelwert	Medianwert
Oberpfalz	18	238 - 9.066	$4,70 \cdot 10^{-15}$	$7,50 \cdot 10^{-09}$	$4,75 \cdot 10^{-12}$	$4,89 \cdot 10^{-12}$
Schwarzwald	86	15 - 509	$3,50 \cdot 10^{-10}$	$8,68 \cdot 10^{-05}$	$2,08 \cdot 10^{-07}$	$3,74 \cdot 10^{-07}$
Urach	16	3.327 - 3.374	$7,61 \cdot 10^{-10}$	$1,82 \cdot 10^{-07}$	$1,05 \cdot 10^{-08}$	$1,06 \cdot 10^{-08}$
Olkiluoto	34	227 - 935	$4,00 \cdot 10^{-10}$	$2,60 \cdot 10^{-05}$	$8,96 \cdot 10^{-08}$	$3,60 \cdot 10^{-08}$
Romuvaara	80	160 - 950	$1,00 \cdot 10^{-10}$	$2,60 \cdot 10^{-06}$	$7,85 \cdot 10^{-09}$	$4,90 \cdot 10^{-09}$
Stärnö	10	238 - 374	$1,30 \cdot 10^{-10}$	$6,10 \cdot 10^{-08}$	$6,19 \cdot 10^{-09}$	$7,35 \cdot 10^{-09}$
Nordschweiz	212	253 - 2.464	$1,00 \cdot 10^{-13}$	$4,00 \cdot 10^{-06}$	$1,42 \cdot 10^{-10}$	$3,00 \cdot 10^{-11}$
Schweizer Dr.	3	-	$2,00 \cdot 10^{-09}$	$3,50 \cdot 10^{-08}$	$7,88 \cdot 10^{-09}$	$7,00 \cdot 10^{-09}$
Cajon-Pass	3	1.867 - 2.076	$4,90 \cdot 10^{-12}$	$1,77 \cdot 10^{-09}$	$5,22 \cdot 10^{-11}$	$1,64 \cdot 10^{-11}$
Maryland	7	530 - 915	$7,00 \cdot 10^{-10}$	$1,50 \cdot 10^{-07}$	$2,60 \cdot 10^{-08}$	$4,60 \cdot 10^{-08}$
Savannah-R.	3	450 - 450	$1,40 \cdot 10^{-10}$	$3,30 \cdot 10^{-07}$	$1,95 \cdot 10^{-08}$	$1,60 \cdot 10^{-07}$

Tab. 3.1 zeigt die unterschiedlichen und gemittelten sowie minimalen und maximalen  $k_f$ -Werte der geologischen Formationen mit Tiefenangabe und Anzahl der erfassten Bohrungen. Neben Bohrungsanalysen aus Europa werden auch Daten aus Amerika wie dem Canjon-Pass, aus Maryland und Savannah-River in der Tabelle zusammengetragen. In der Oberpfalz wurden Tiefen von 238 bis 9.066 m analysiert, während sich die Untersuchungen im Schwarzwald mit 15 bis maximal 509 m auf geringere Tiefen beziehen. Dabei weist der geometrische Mittelwert mit  $4,75 \cdot 10^{-12}$  m/s der Untersuchungen in der Oberpfalz auf eine deutlich geringere Durchlässigkeit hin, als dies im Schwarzwald mit  $2,08 \cdot 10^{-7}$  m/s der Fall ist.

**Tab. 3.2** Nach Tiefenbereich differenzierte  $k_f$ -Werte für Gneis /APP 02/

Tiefenbereich (m u. G.)	Anzahl Messwerte	$k_f$ -Werte (m/s)			
		Minimalwert	Maximalwert	Geometr. Mittelwert	Medianwert
<300	154	$6,00 \cdot 10^{-13}$	$8,68 \cdot 10^{-05}$	$6,65 \cdot 10^{-08}$	$5,85 \cdot 10^{-08}$
300 - 1.500	271	$4,70 \cdot 10^{-15}$	$1,20 \cdot 10^{-05}$	$4,27 \cdot 10^{-10}$	$3,00 \cdot 10^{-10}$
>1.500	44	$9,81 \cdot 10^{-14}$	$1,82 \cdot 10^{-07}$	$3,62 \cdot 10^{-10}$	$1,60 \cdot 10^{-10}$
alle *)	472	$4,70 \cdot 10^{-15}$	$8,68 \cdot 10^{-05}$	$2,11 \cdot 10^{-09}$	$3,99 \cdot 10^{-09}$

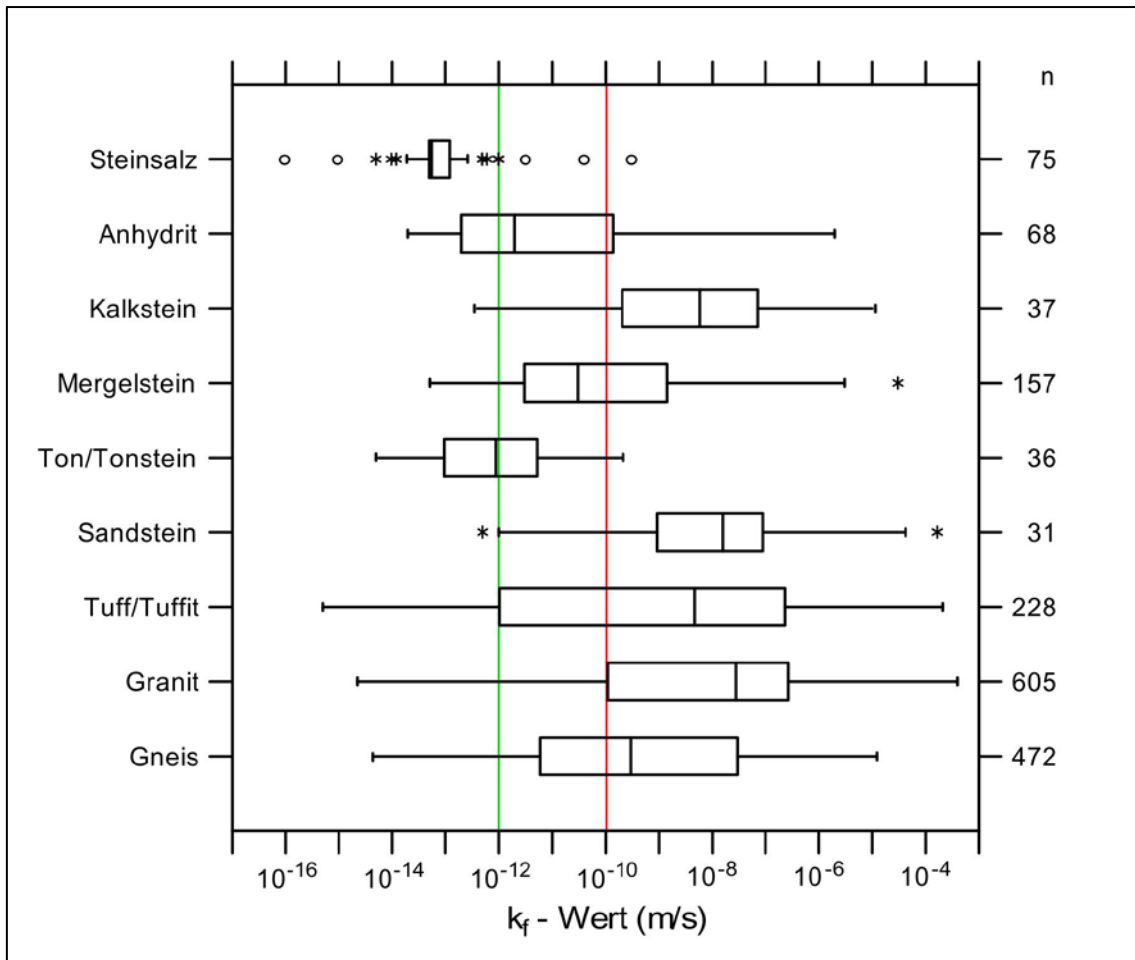
\*) enthält auch Werte ohne Tiefenangaben

Tab. 3.2 fasst die internationalen Daten für Gneis ausschließlich für den Tiefenbereich 300 bis 1.500 m zusammen. Auf Basis der internationalen Datengrundlagen ergibt sich

eine Bandbreite von  $1 \cdot 10^{-13}$  bis  $7 \cdot 10^{-7}$  m/s für intakte Gneise. Gestörte Gneise weisen Werte von  $5 \cdot 10^{-12}$  bis  $1,2 \cdot 10^{-5}$  m/s auf.

Für den Tiefenbereich von 300 bis 1.500 m sind in Abb. 3.2 Durchlässigkeiten verschiedener Gesteinstypen im Vergleich dargestellt. Die Boxplots zeigen die mittlere Verteilung der  $k_f$ -Werte mit ihrem Medianwert für die Gesteinstypen. Jeweils gegenüberliegend zur Bezeichnung des Gesteinstyps befindet sich die Anzahl „n“ der vorhandenen Datensätze. Während die  $k_f$ -Werte für Steinsalz, ohne Berücksichtigung der Ausreiser, in einem Bereich von etwa  $10^{-12}$  bis  $10^{-14}$  m/s liegen, erstrecken sich die Werte für Gneis und Granit auf einen weiteren Bereich mit  $10^{-4}$  bis  $10^{-15}$  m/s.

Als Kriterium für einen „bedingt günstigen“ bzw. „günstigen“ ewG wird vom AkEnd eine Durchlässigkeit von  $10^{-10}$  bzw.  $10^{-12}$  m/s vorgeschlagen. Dies kann von Kristallin bei einer zusammenfassenden Betrachtung der internationalen Standorte nicht durchgehend erfüllt werden /APP 02/. Es muss aber darauf hingewiesen werden, dass auch innerhalb der weniger günstig eingestuften Gesteinskörper Vorkommen existieren können, die die geforderte geringe Gebirgsdurchlässigkeit erfüllen könnten. Da es sich um eine Sammlung von Daten einiger weniger internationaler Standorte handelt, wären in Deutschland diesbezüglich weitere Erkundungen erforderlich. Auch die geologische Gesamtsituation sowie das Endlagerkonzept ist von Bedeutung /APP 02/, /BRA 08/.



**Abb. 3.2** Boxplots mit  $k_f$ -Werten der untersuchten Gesteinstypen /APP 02/

Links von der grünen Linie liegen „günstige“ Durchlässigkeiten vor, während der Bereich zwischen der grünen und roten Linie „bedingt günstige“ Durchlässigkeiten darstellt. Dargestellt sind die Daten für einen Tiefenbereich von 300 - 1.500 m u. G. O. K.

Die auf internationaler Ebene zur Verfügung stehenden Daten zur Durchlässigkeit von Kristallin in einer Tiefenlage von 300 bis 1.500 m zeigen auf, dass die durch den Ak-End aufgestellten Kriterien nicht sicher erfüllt werden können. Hinzu kommt, dass die deutschen Kristallinvorkommen anderen tektonischen Belastungen ausgesetzt sind als die viel älteren Vorkommen in Finnland oder Schweden. Allerdings könnten einzelne Gebiete trotzdem die Kriterien in günstiger Weise erfüllen. Auch hat das Endlagerkonzept eine Bedeutung für die gesamte Bewertung des Standortes, da für das Kristallin, anders als für Salz, die technischen Barrieren über lange Zeiträume von Bedeutung sind /PAP 99/, /APP 02/, /BRA 08/.

## **Konsequenzen für VerSi II**

Auch wenn die tektonische Überprägung der deutschen Kristallinvorkommen allgemein höher ausfällt als im Kristallin des Baltischen Schildes, wie etwa in Schweden, Finnland oder Kanada, bestehen keine eindeutigen Hinweise auf notwendige Modifikationen des schwedisch-finnischen KBS-3-Konzeptes (siehe Kap.3.2.1) aufgrund einer abweichenden Beschaffenheit der deutschen Kristallinvorkommen. Das KBS-3-Konzept kann daher als Referenzkonzept für das vorliegende Vorhaben verwendet werden.

### **3.1.3 Tiefes Grundwasser in Deutschland**

Die Beschaffenheit des „tiefen Grundwassers“ in Deutschland ist neben der Eigenschaft als Transportmedium insbesondere für Korrosionsverhalten bzw. -beständigkeit der Behälter und Buffer von Bedeutung (siehe dazu auch Anhang A.1 zur Kupferkorrosion). Die beiden Berichte /BRA 01/ und /BRA 02/, die für den Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd) erstellt wurden, enthalten eine ausführliche Darstellung der Geologie, Hydrogeologie und hydrochemische Verhältnisse des Tiefenwassers in ausgewählten Regionen in Deutschland, sowie eine Ausarbeitung zur Fragestellung, ob eine teufenabhängige Zunahme der Grundwasser-Mineralisation als Indikator für „keine oder langsame Grundwasserbewegung“ in der Endlagerteufe herangezogen werden kann /BRA 02/.

Der Begriff „tiefes Grundwasser“ ist in der Literatur nicht eindeutig definiert. Für „tiefes“ Grundwasser werden z. B. oft auch die Begriffe Formationswasser, Grundwasser oder Tiefenwasser verwendet. Die Bezeichnung „Mineralwasser“ hat nichts mit der Tiefe zu tun. Mineralwässer kommen auch oberflächennah vor. Die Bezeichnung „Tiefenwasser“ wird im StandAG im Zusammenhang mit dem ewG und dessen Lage verwendet.

Im Nachfolgenden wird der Begriff „Tiefengrundwasser“ nach /MÜH 97/ als synonym für „tiefes Grundwasser“ verwendet und eine Tiefe unterhalb von 300 m verstanden. Diese Tiefe ergibt sich aus der Mindestanforderung des StandAG für die Lage eines ewG.

Die Beschaffenheit des tiefen Grundwassers ist im Allgemeinen abhängig von der Beschaffenheit der Gesteine im Untergrund, der Verweilzeit, der Temperatur der Menge und Zusammensetzung des versickernden Niederschlags und von der Zusammensetzung des Wassers selbst, sowie von den im Untergrund ablaufenden geochemischen



Prozessen. Hierzu gehören z. B. Hydrolyse, Auflösung, Ausfällung, Sorption, Ionenaustausch- und Redoxprozesse. Auch biologische Vorgänge wie z. B. mikrobieller Stoffumsatz können im Untergrund vorkommen. Im tiefen Untergrund nimmt die Mineralisation der Wässer im Allgemeinen zu. Bei langsamen Fließgeschwindigkeiten und langen Kontaktzeiten mit den umgebenen Gesteinen stellt sich ein thermodynamisches Gleichgewicht ein. Bei Änderung des lokalen Fließfeldes durch Störungen kann auch ein Ungleichgewicht vorliegen.

Die Abb. 3.3 zeigt schematisch die großregionalen Zirkulationssysteme des Grundwassers mit den dominierenden Anionen. Zu erkennen ist je nach Tiefe und Kontaktzeit die Änderung der dominierenden Anionen im Grundwasser. In einigen 100 Metern Tiefe (ca. 300 m nach /HÖL 69/) ist meteorisches Wasser noch am aktiven Wasserkreislauf beteiligt. Hier ist der Einfluss der Atmosphäre daran erkennbar, dass das Grundwasser  $HCO_3^-$  dominiert ist. Je tiefer das Grundwasser ist, desto geringer ist der Einfluss des atmosphärischen  $CO_2$ . Dies kann an der geringeren  $HCO_3^-$  Konzentration erkannt werden.

Mit zunehmender Tiefe wird die Zirkulation erschwert, der Wasseraustausch ist verzögert und die Mineralisation des Wassers nimmt zu (siehe z. B. Abb. 3.6). Sulfate werden durch Lösungsprozesse aus den Gesteinen herausgelöst. Nach /HÖL 69/ reicht die Tiefe der  $SO_4^{2-}$  dominierten Wässer in Tafelgebieten bis ca. 500 – 600 m und in Faltungsgebieten bis ca. 2.000 m. In der darunterliegenden Zone mit stagnierenden Wässern – dem Bereich der Tiefengrundwässer – und einem sehr verzögerten Wasseraustausch herrschen in Tafelgebieten hoch mineralisierte  $Cl^-$  Wässer vor. /HÖL 69/ begründet diese Vorkommen durch sehr alte, über geologische Zeiträume unbeeinflusste Wässer aus denen die alkalischen Bestandteile weitestgehend entfernt wurden. In Faltungsgebieten können dagegen wechselnde hydrochemische Bedingungen vorkommen.

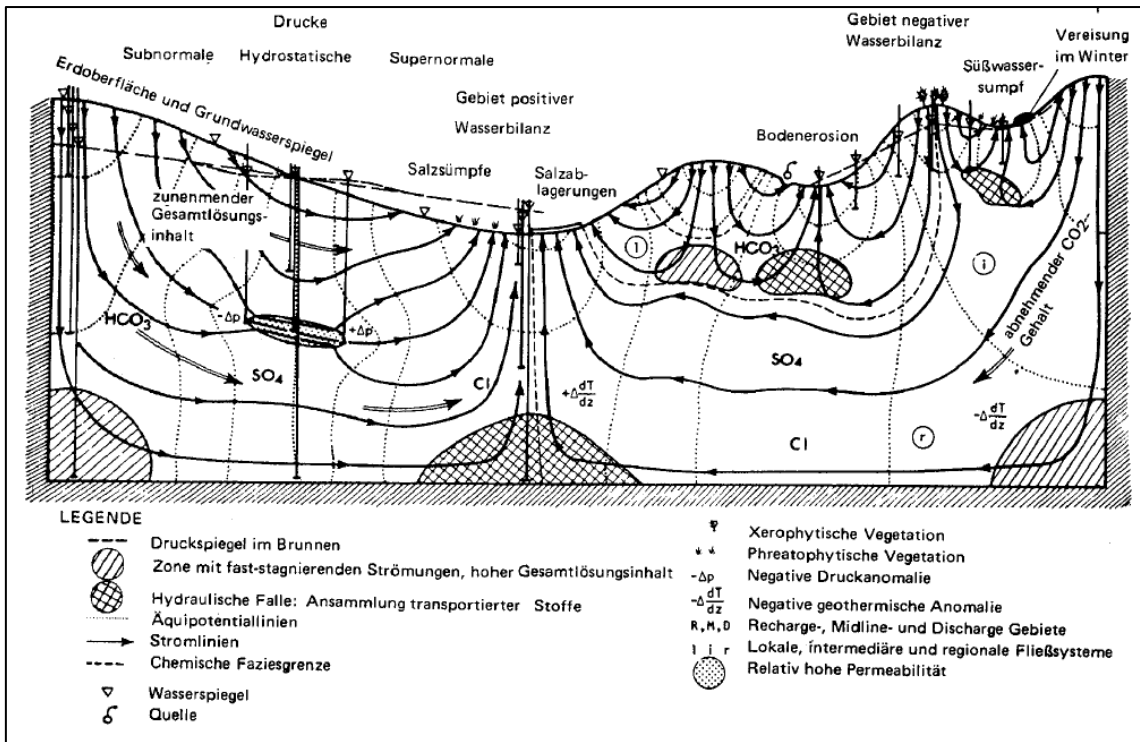


Abb. 3.3 Großräumige Grundwasser-Zirkulationssysteme /DVWK 87/

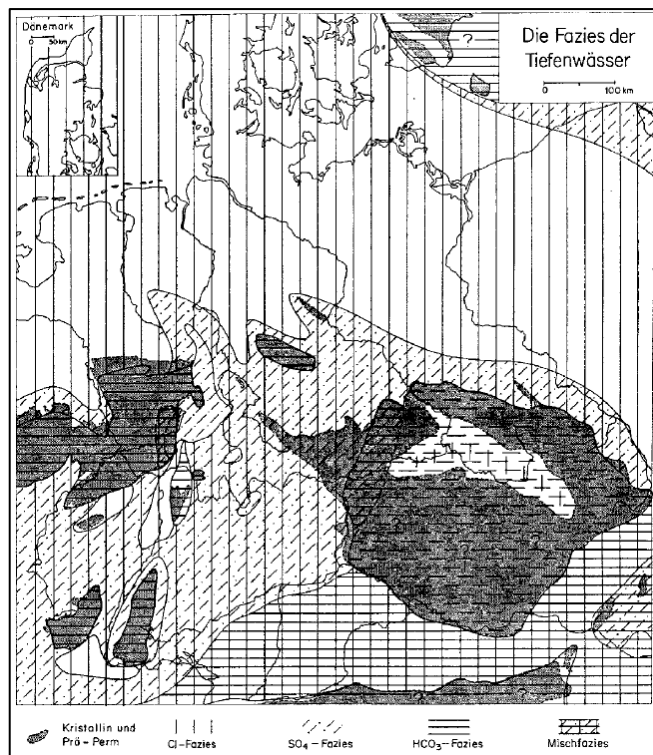
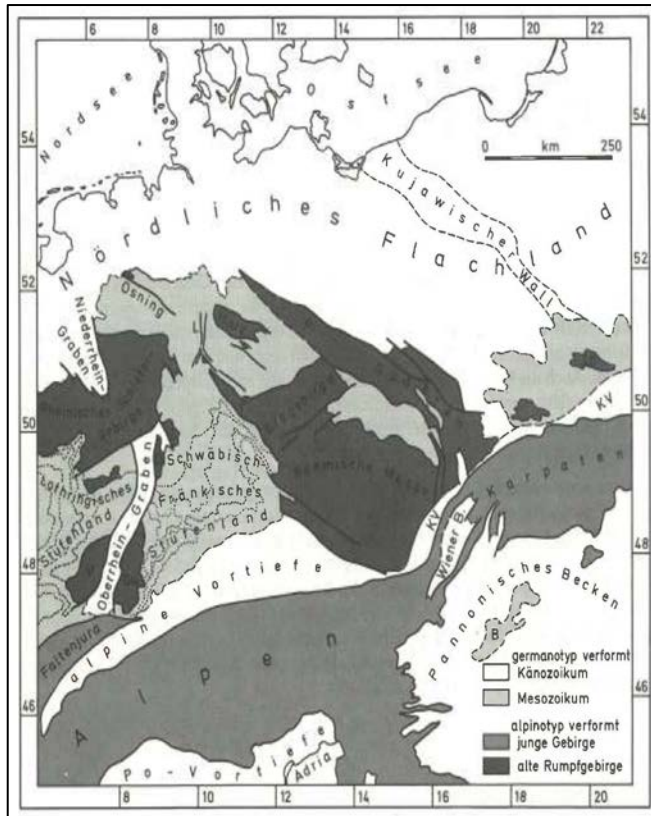
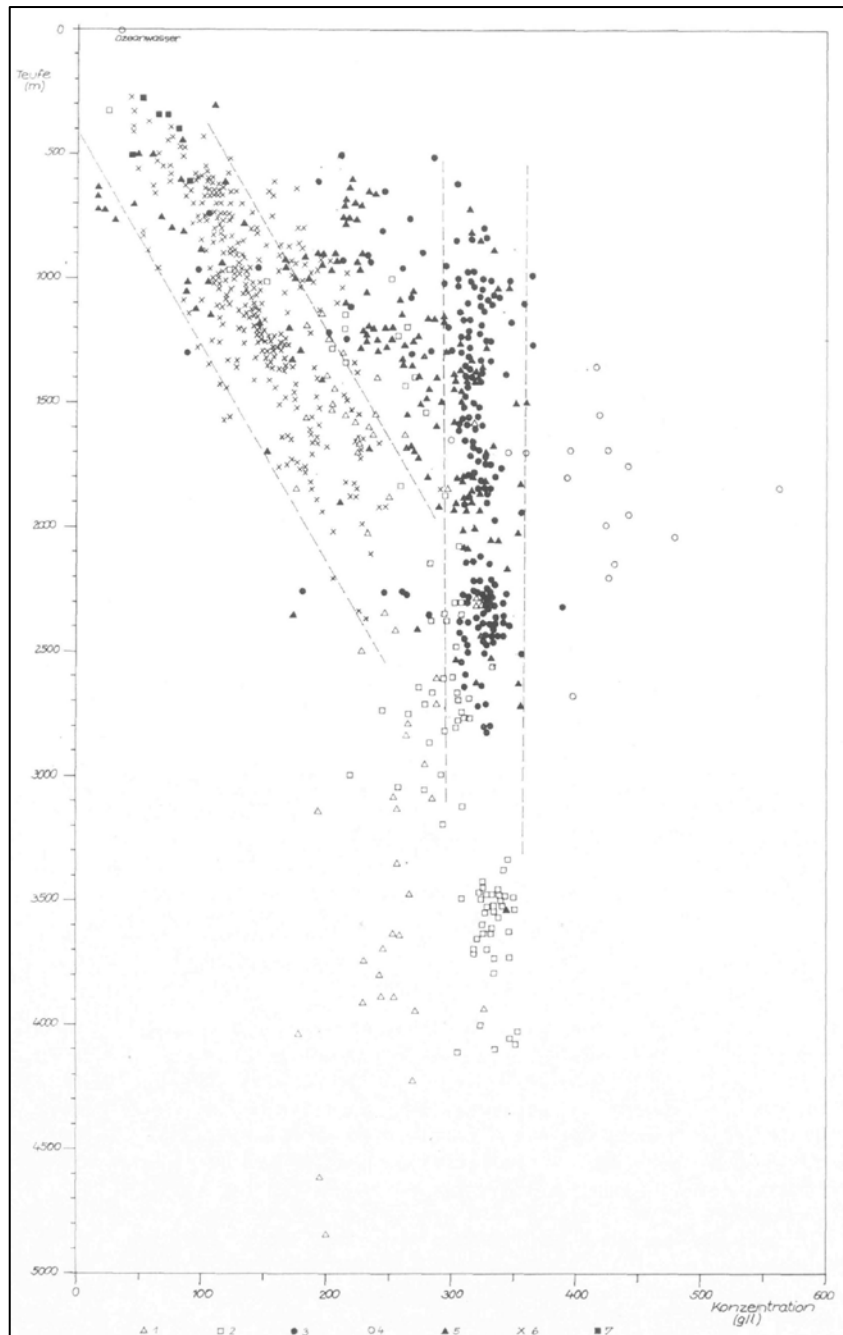


Abb. 3.4 Übersichtskarte der Tiefenwasser-Fazies /HÖL 69/



**Abb. 3.5** Geologisch-tektonische Großstrukturkarte von Mitteleuropa /CAR 75/



**Abb. 3.6** Zunahme der Gesamtkonzentration gelöster Bestandteile in Schichtwässern des Nordteils der DDR und des Thüringer Beckens mit der Tiefenlage /MÜL 75/

Die Fazies der Tiefengrundwässer in Bereichen unter 600 m Tiefe in Deutschland (Abb. 3.4) ist von den tektonischen Großstrukturen (Abb. 3.5) abhängig. So sind Cl-dominierte Wässer hauptsächlich in der Norddeutschen Tiefebene zu finden. In den Mittelgebirgen werden überwiegend Hydrogencarbonat- und Sulfat-Wässer angetrof-

fen. Die übrigen Gebiete unter 600 m Tiefe werden durch Misch-Fazies gekennzeichnet.

Die Grundwasserbeschaffenheit wird anhand von analytisch bestimmbar Haupt- und Nebenbestandteilen beschrieben. Diese sind z. B. Anionen, Kationen und gelöste Gase, Temperatur, Leitfähigkeit und der pH-Wert. Gelegentlich wird auch das Redox-Potential bestimmt und angegeben. Anhand der Gesamtkonzentration gelöster Stoffe wird eine generelle Einteilung der Grundwässer vorgenommen (Tab. 3.3).

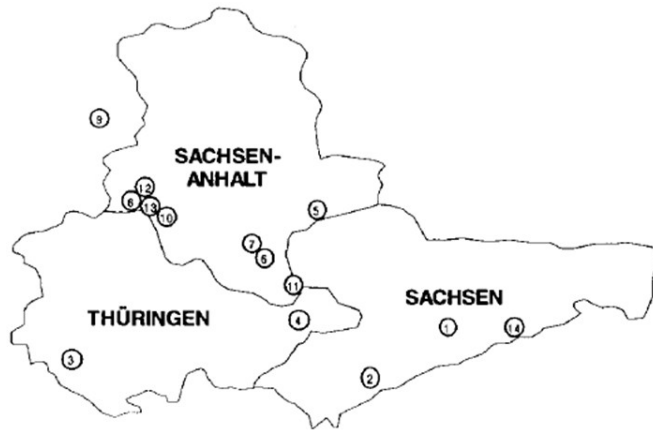
**Tab. 3.3** Einteilung von Grundwässern nach der Gesamtkonzentration gelöster Stoffe /MAT 94/

Grundwasser	Konzentration
Süßwasser	< 1.000 mg·L <sup>-1</sup>
Brackwasser	1.000 – 10.000 mg·L <sup>-1</sup>
Salzwasser	10.000 – 100.000 mg·L <sup>-1</sup>
Sole	< 100.000 mg·L <sup>-1</sup>

Die chemische Zusammensetzung von Grubenwässern (Tiefengrundwässer) an verschiedenen Standorten in nicht-salinaren Festgesteinen (u. a. Kristallingesteine) in Thüringen, Sachsen und Sachsen-Anhalt wurde beispielsweise von /MÜH 97/ untersucht. Die entsprechenden Standorte zeigt Abb. 3.7.

Die Mittelwerte, Maximalwerte und Minimalwerte der gemessenen Konzentrationen der Anionen und Kationen der Grubenwässer nach /MÜH 97/ sind in Tab. 3.4 (Anionen) und Tab. 3.5 (Kationen) dargestellt. Der pH-Wert der Grubenwässer reicht von sauer (pH 2,9) bis neutral (pH 7,8).

Der pH-Wert liegt mit Ausnahme des Minimalwertes im Bereich des Indikators, der nach /SKB 11a/ für eine chemisch günstige Bedingung definiert wurde. Die maximal gemessene Cl-Konzentration liegt unterhalb des Indikators nach /SKB 11a/ (siehe auch Tab. 3.6).



**Abb. 3.7** Standorte der Beprobungen /MÜH 97/

(1) Freiberg (Erzgebirge), (2) Ehrenfriedersdorf (Erzgebirge), (3) Bad Liebenstein (Südrand des Thüringer Walds), (4) Ronneburg (Thüringen), (5) Bitterfeld / Wulfen (Sachsen-Anhalt), (6) Bad Dürrenberg (Ostrand des Thüringer Beckens), (7) Bad Lauchstedt (Sachsen-Anhalt), (8) Straßberg (Harz), (9) Remlingen (Harzvorland), (10) Elbingerode (Harz), (11) Profen (Sachsen-Anhalt), (12) Alexisbad (Harz), (13) Gernrode (Harz), (14) Königstein (Sachsen)

**Tab. 3.4** pH-Wert und Konzentrationsbereiche ausgewählter Anionen [ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ] für Grubenwässer /MÜH 97/

	pH	Cl	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{NO}_3^-$	$\text{NO}_2^-$
Mittelwert	5,71	1.985,87	775,78	189,41	12,12	0,58
Maximalwert	7,80	64.831,00	4.953,00	962,00	136,00	2,14
Minimalwert	2,90	4,88	6,87	1,90	1,50	0,03
Indikator	$4 \leq \text{pH} \leq 11$	$< 70.900$				

**Tab. 3.5** Konzentrationsbereiche ausgewählter Kationen [ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ] für Grubenwässer /MÜH 97/

	Na	K	Ca	Mg	Fe
Mittelwert	1.247,40	22,93	267,83	50,62	29,10
Maximalwert	41.400,00	521,50	1.772,00	309,50	345,20
Minimalwert	1,11	1,72	8,28	1,29	0,02

**Tab. 3.6** „Chemically favourable conditions“ /SKB 11a/.

Eigenschaft / Parameter	Indikator / Wert
Reduzierende Bedingungen	Abwesenheit von gelöstem Sauerstoff Anwesenheit von Reduktionsmitteln (Fe(II), S <sup>2-</sup> ) Redox-Potential
Ionenstärke	Ionenstärke soll weder zu hoch noch zu niedrig sein. $\sum_q [M^{q+}]^{GW} > 4 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ Oberes Limit für NaCl: 35 g·L <sup>-1</sup>
Kolloide	Geringe Konzentration, wenn $\sum_q [M^{q+}]^{GW} > 4 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$
HS <sup>-</sup> , H <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , C <sub>org</sub> , K <sup>+</sup> und Fe	Konzentration ist limitiert, aber keine detaillierten Angaben zu Wert oder Bandbreite
pH-Wert im Grundwasser	$pH^{GW} < 11$
Verhinderung der Korrosion durch Cl <sup>-</sup>	$pH^{GW} > 4, [Cl^-]^{GW} < 2 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$

### Konsequenzen für VerSi II

Die Tiefengrundwässer in Deutschland weisen je nach Gebiet eine unterschiedliche Zusammensetzung auf und können grob anhand der dominierenden Anionen eingeteilt werden (siehe Abb. 3.4). Die Zusammensetzung des Tiefengrundwassers immer auch von der lokalen geologischen Formation beeinflusst. Daher muss für jeden potentiellen Endlagerstandort das Tiefengrundwasser einer Analyse und Bewertung unterzogen werden.

Für die Korrosion der Endlagerbehälter spielt die Zusammensetzung der Wässer im Nahfeld eine wichtige Rolle. Auch muss berücksichtigt werden, dass das am Standort vorliegende Tiefengrundwasser auch durch chemische Vorgänge wie z. B. Ionenaustauschprozesse mit Versatz- und Ausbaumaterialien eine Veränderung erfährt. Diese Veränderungen müssen bei der Betrachtung des Korrosionsverhaltens des Endlagerbehälters ebenfalls berücksichtigt werden.

Zwar bestehen große lokale Schwankungen in der hydrochemischen Zusammensetzung der Tiefengrundwässer, es bestehen jedoch keine Hinweise darauf, dass es in

Deutschland keine Tiefenwasservorkommen geben könnte, deren Zusammensetzung die Indikatoren nach /SKB 11a/ nicht erfüllen könnten. Insofern spricht auch hier nichts gegen die Verwendung des KBS-3-Konzepts als Referenzkonzept für VerSi II.

## **3.2 Endlagerungskonzept für kristalline Wirtsgesteine**

### **3.2.1 Das KBS-3-Konzept**

Vorläufige Untersuchungen zur Machbarkeit eines Endlagerkonzeptes im Kristallin wurden in /JOB 16/, /BER 17/ durchgeführt. Als Grundlage diente das schwedische KBS-3-Konzept, welches eine Einlagerung von kupferummantelnden Behältern in vertikalen Bohrlöchern vorsieht /SKB 11a/.

Für die VerSi-Abwägungsmethode wird ein Endlagerkonzept benötigt, um die sicherheitstechnisch relevanten Komponenten zu identifizieren und diese mit Sicherheitsfunktionen belegen zu können. Zur Überprüfung der Anwendbarkeit der VerSi-Abwägungsmethode auf kristalline Wirtsgesteine wird daher das weit entwickelte schwedische KBS-3-Konzept für ein Referenz-Endlagersystem im Kristallin verwendet. In den Kapiteln 3.1.2 und 3.1.3 wurde dargelegt, dass hinsichtlich des Charakters der deutschen Kristallinvorkommen und der deutschen Tiefenwässer keine deutlichen Hinweise für eine fehlende grundsätzliche Eignung der KBS-3-Konzepte für deutsche Kristallinvorkommen vorliegen.

Das KBS-3-Konzept sieht eine Endlagerung der Abfallgebinde in ca. 6,7 m tiefen vertikalen Einlagerungsbohrlöchern im Granit vor /SKB 11a/. Das Wirtsgestein Granit ist klüftig und wasserführend. Aus diesem Grunde ist die Einlagerung der radioaktiven Abfälle in Kupferbehälter geplant, die eine hohe Korrosionsresistenz aufweisen. Somit besitzen die Behälter eine hohe Relevanz zur Isolation des Radionuklidinventares. Die Behälter werden von Bentonit (Bentonit-Buffer) umschlossen. Dieser soll mechanischen Schutz bieten und hydraulisch abdichten. Der Gehalt der für die Behälterkorrosion schädlichen Inhaltsstoffe (z. B. Pyrit) im Buffer sollte so gering wie möglich sein. Zudem soll der Buffer bei einem potentiellen Ausfall der Behälter den Radionuklidtransport retardieren. Die Einlagerungsbohrlöcher sollen in Bereichen erstellt werden, welche nur gering gelüftet sind.



Im KBS-3-Verschlusskonzept ist der Behälter im Verbund mit dem umgebenden Bentonit-Buffer somit die wesentliche einschlusswirksame Barriere. Alle anderen Versatz- und Verschlussmaßnahmen dienen zum einen der Erhaltung der Behälterintegrität und zum anderen der Retardation des Radionuklidtransportes bei einem potentiellen Behälterausfall. Es werden folgende sicherheitskonzeptionelle Anforderungen an das KBS-3-Endlagerdesign bzw. den Standort gestellt /SKB 11a/:

- Die minimale Tiefe für das KBS-3-Konzept wurde auf > 400 m festgelegt.
- Die Grundwasserzusammensetzung im Endlagerbereich soll vor der Auffahrung der Hohlräume die Kriterien hinsichtlich chemisch günstiger Bedingungen erfüllen.
- Die horizontalen Abstände der Einlagerungsbohrlöcher werden auf Grundlage der thermischen Dimensionierung festgelegt.
- Einlagerungsbohrlöcher dürfen nicht näher als 100 m zu Deformationszonen mit einer Länge von mehr als 3 km liegen.
- Die Bohrlochüberfahrungsstrecken werden parallel zur Richtung der maximalen horizontalen Spannung aufgefahren. Die Einlagerungsbereiche sollten in Bereichen liegen, in denen kein Scherversatz auftritt, der die Integrität der Behälter beeinträchtigen könnte.
- Vor dem Einbringen des Behälters muss die integrale effektive Transmissivität des Ringraumes im Einlagerungsbohrloch weniger als  $10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  betragen. Unter der Voraussetzung aktueller Bohrtechnik zur Erstellung der Einlagerungsbohrlöcher, ist die Auflockerungszone (EDZ) um das Einlagerungsbohrloch auf wenige Zentimeter begrenzt.
- Die Temperatur in dem Bentonit-Buffer darf einen Wert von  $100^\circ\text{C}$  nicht übersteigen. Die maximale Wärmeleistung des Behälters ist auf 1.700 W begrenzt.
- Auflockerungszonen in den Bohrlochüberfahrungsstrecken sollten begrenzt sein und nicht zu einer effektiven Durchlässigkeit führen, die höher liegt als  $10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$  und einen erheblichen Teil (d. h. mindestens 20 – 30 m) der Strecke miteinander verbinden.
- Unterhalb der oberen (Schacht-)Abdichtung muss die integrale effektive hydraulische Leitfähigkeit (EDZ + Versatz) in Strecken, Rampen und Schächten, weniger als  $10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$  betragen. Dieser Wert braucht in Abschnitten, wo z. B. Strecken durch sehr transmissive Zonen führen, nicht eingehalten zu werden. Es gibt keine Be-

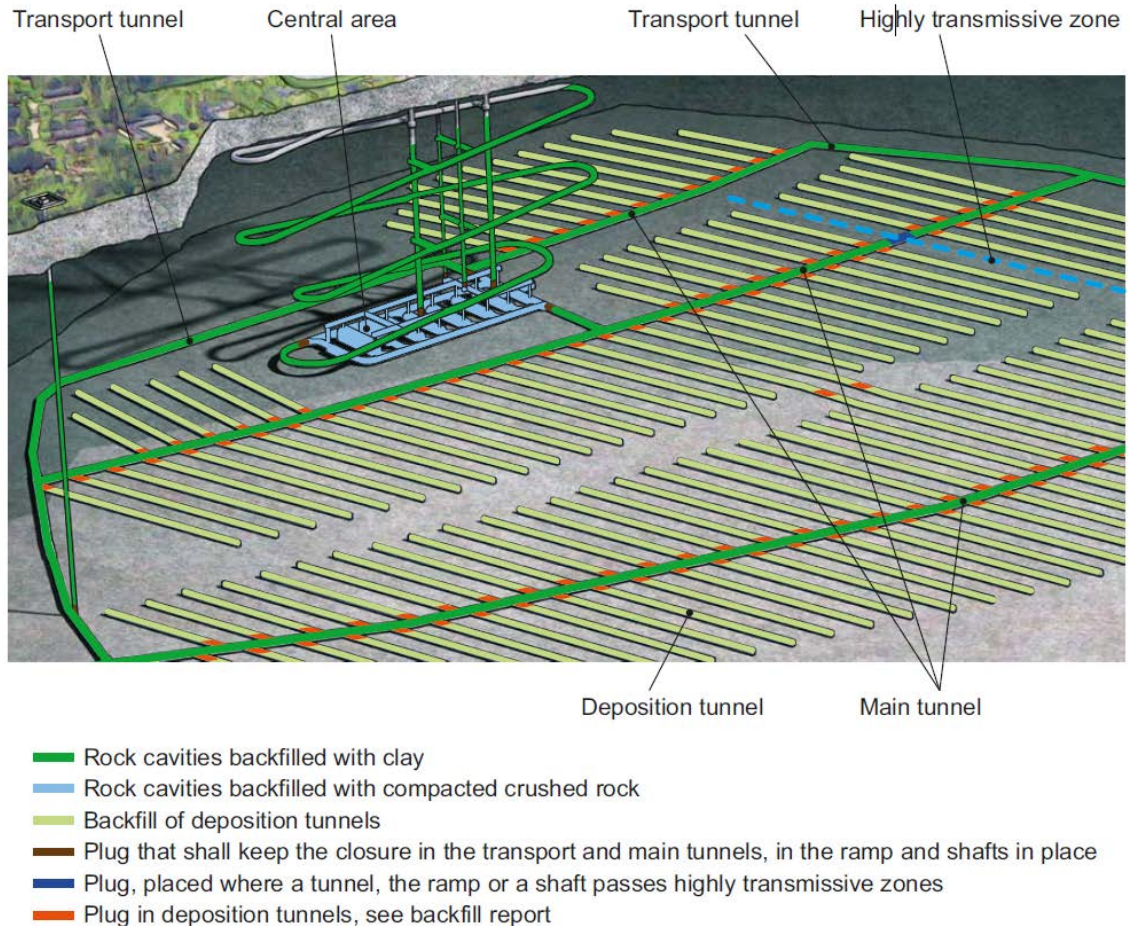
schränkung der hydraulischen Leitfähigkeit im zentralen Bereich (Infrastrukturbereich).

Es wird davon ausgegangen, dass sehr große und sehr transmissive Klüfte durch Detailuntersuchungen mit einem Radius größer als 250 m und einer effektiven Durchlässigkeit größer als  $10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  detektiert werden können. Diese Bereiche werden als Einlagerungsbereiche ausgeschlossen.

Es wird in /SKB 11a/ das so genannte „Extended Full Perimeter Intersection Criterion (EFPC)“ ausgewiesen. Dieses Kriterium verlangt, dass ein Einlagerungsbohrloch nicht durch eine Kluft angeschnitten werden darf, welche gleichzeitig auch den vollen Umfang der Bohrlochüberfahrungsstrecke durchtrennt. Zudem werden Bereiche, in denen mehr als vier Einlagerungsbohrlöcher von derselben Kluft durchzogen werden, ausgeschlossen.

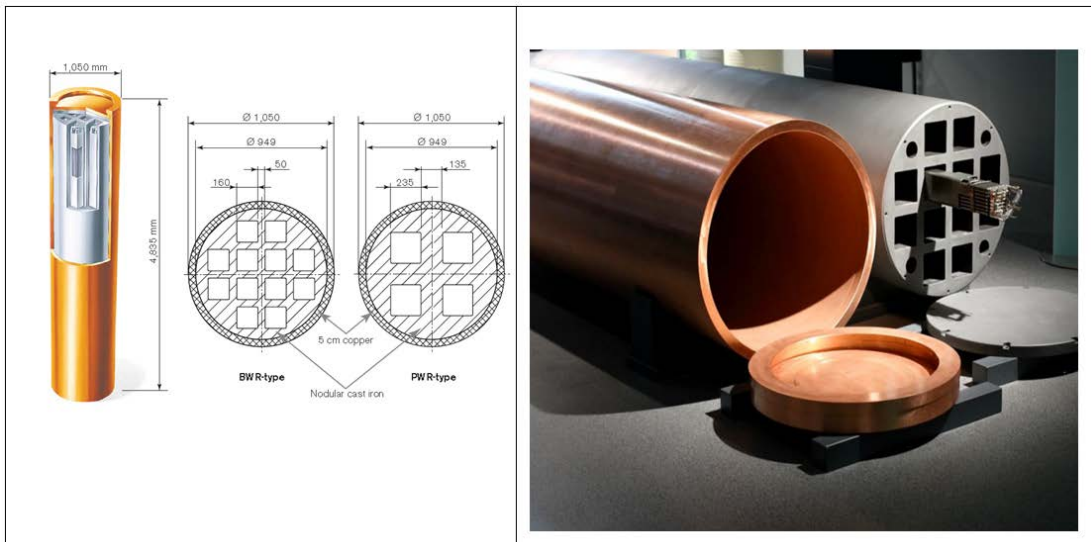
Im Endlagerbergwerk sind folgende Verschlussmaßnahmen geplant (Abb. 3.8):

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



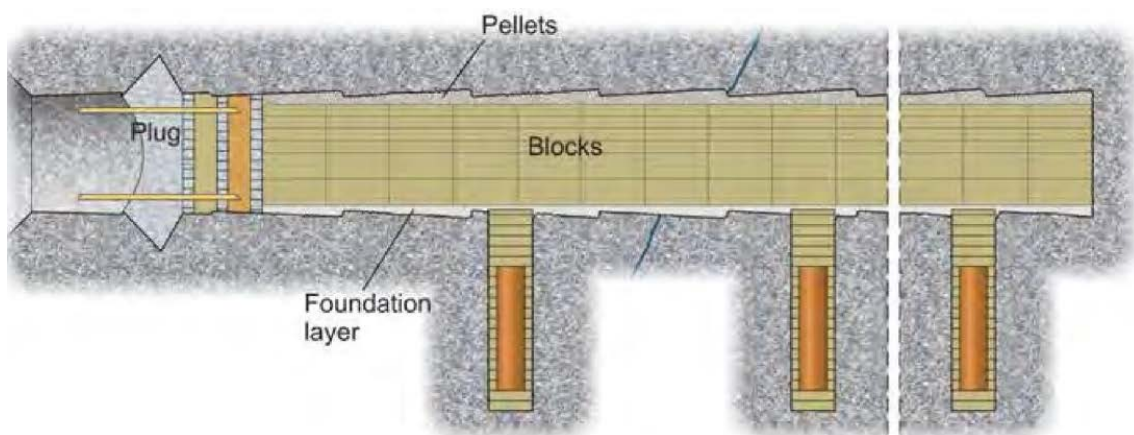
**Abb. 3.8** Das Verschlusskonzept des KBS-3-Konzeptes /SKB 11a/

Der Endlagerbehälter besteht aus zwei wesentlichen Komponenten: Dem inneren Brennelementbehälter aus Gussstahl und der äußeren Umhüllung aus Kupfer. Der Behälter aus Gussstahl dient zur Aufnahme von entweder 12 Brennelementen aus Siedewasserreaktoren oder 4 Brennelementen aus Druckwasserreaktoren (Abb. 3.9). Er hat im Zusammenwirken mit der äußeren Umhüllung die Aufgabe, zu erwartende isostatische Lasten und Scherbewegungen schadlos aufzunehmen /BEU 16/. Die äußere Umhüllung des Behälters aus Kupfer bildet mit einer Wandstärke von 5 cm die Hauptbarriere. Hauptaufgabe der gasdichten äußeren Umhüllung aus Kupfer ist es, den Einschluss der Radionuklide über einen möglichst langen Zeitraum zu gewährleisten /BEU 16/.



**Abb. 3.9** Aufbau eines KBS-3 Endlagerbehälters /BEU 16/, /SKB 11a/

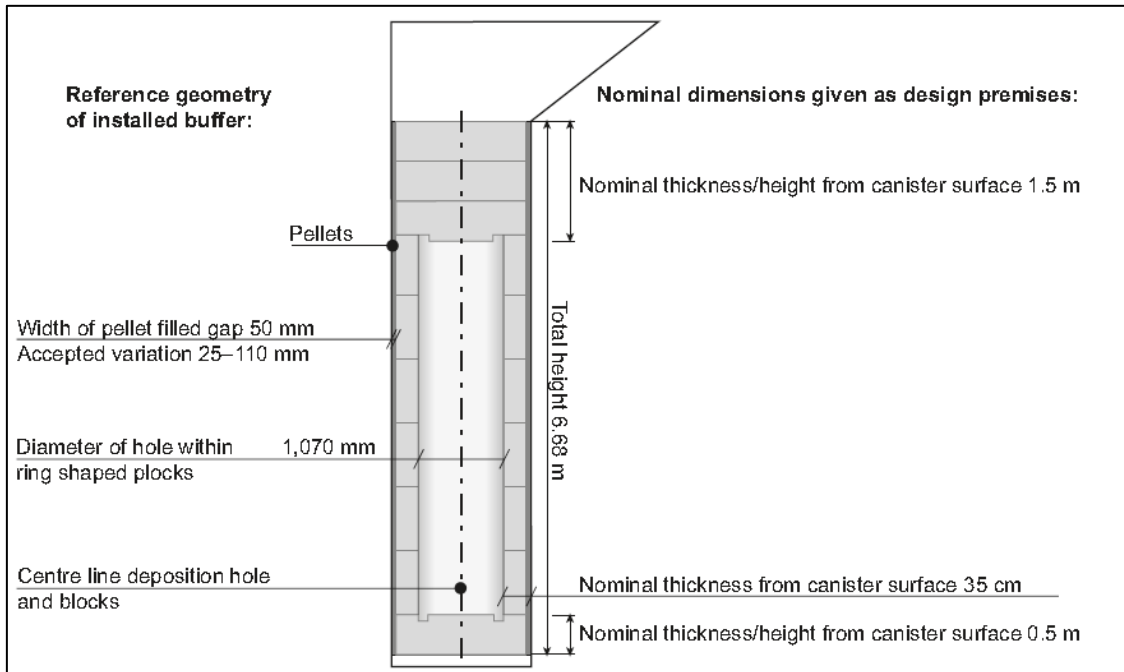
Die Abb. 3.10 zeigt einen schematischen Längsschnitt durch eine Bohrlochüberfahrungsstrecke. Die Behälter in den Einlagerungsbohrlöchern werden von einem Bentonit-Buffer umschlossen. Die Bohrlochüberfahrungsstrecken werden ebenfalls mit Bentonit verfüllt. Die Bohrlochüberfahrungsstrecke wird gegenüber der Transportstrecke mit einem „Plug“ verschlossen.



**Abb. 3.10** Schematischer Querschnitt durch eine Bohrlochüberfahrungsstrecke /POS 12/

Laut /SKB 11a/ ist die Hauptfunktion des Buffers den Lösungstransport zum Abfallbehälter und mögliche Radionuklidfreisetzungen aus dem Abfallbehälter zu begrenzen. Dies soll durch eine geringe hydraulische Durchlässigkeit des Buffers erreicht werden. Somit ist Diffusion der Haupttransportprozess. Der Buffer quillt bei der Aufsättigung mit Lösung, wodurch er sich selbst abdichten soll. Zudem soll der Buffer den Behälter in

dem Bohrloch in Position halten, Scherbewegungen des Wirtsgesteines abdämpfen, mikrobielle Aktivität auf der Behälteroberfläche limitieren und bei einem potentiellen Ausfall der Behälterintegrität den Kolloidtransport beschränken. Die Abb. 3.11 zeigt einen Querschnitt durch ein Einlagerungsbohrloch.



**Abb. 3.11** Darstellung des den Endlagerbehälter umgebenden Buffers /SKB 11a/

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

Die Hauptfunktionen der „Plugs“ (Abb. 3.10) sind zum einen die Bohrlochüberfahrungsstrecke gegen die Zugangs- und Transportstrecken abzuschließen und zum anderen als Widerlager gegen den Quelldruck des Bentonitversatzes in der Bohrlochüberfahrungsstrecke zu agieren. Die Plugs an den Rampen bzw. dem Infrastrukturbereich sollen den Versatz in den Rampen in Position halten. Sie sollen jedoch nur mechanisch abdichten nicht hydraulisch. Aufgrund der potentiellen Durchlässigkeit des Kristallins sind zusätzliche Abdichtungen per se obsolet.

Der Versatz der Haupt- und Transportstrecken wird analog zu dem Versatz der Bohrlochüberfahrungsstrecke mit Blöcken und Pellets erfolgen, wobei das Material und die Dichte unterschiedlich sind.

Die Funktion des Versatzes der Hohlräume im Zentralbereich besteht darin, mögliche Bewegungen des umgebenden Gesteins zu verhindern. Das KBS-3-Konzept sieht die Verwendung von Granitversatz vor, welches in horizontalen Schichten platziert und dann verdichtet werden soll.

Die Rampen und Schächte werden mit Ton bis zu 200 m Tiefe unterhalb der oberen Abdichtung verfüllt. Die Tiefenlage der oberen Abdichtung wird hinsichtlich der Anwesenheit von wasserleitenden Strukturen und der erwarteten Tiefe von Permafrost in Forsmark bestimmt.

### **3.2.2 Abfallspektrum**

In diesem Kapitel werden die endzulagernden radioaktiven Abfälle aus Deutschland und Schweden und die jeweiligen Behälterkonzepte beschrieben. Diese Informationen sind wichtig zur Überprüfung einer Übertragbarkeit des KBS-3-Konzeptes (vor allem des Behälterkonzeptes) auf deutsche Verhältnisse (siehe Kap. 3.2.3).

#### **Abfallspektrum Deutschland**

Nach /KOM 16/ endet spätestens am 31. Dezember 2022 mit dem Abschalten des letzten Kernkraftwerkes in Deutschland auch die Produktion hoch radioaktiver Abfälle nahezu vollständig. Die Prognosen gehen von rund 30.000 Kubikmetern aus, die endgelagert werden müssen. Bis zu diesem Zeitpunkt werden bestrahlte Brennelemente mit einem Kernbrennstoffgehalt von insgesamt ca. 17.000 Tonnen erzeugt. Dies entspricht nach /BMUB 15b/ insgesamt 10.500 Mg SM in Form bestrahlter Brennelemente aus den Leistungsreaktoren (einschließlich Bestand). Aus den Versuchs-, Demonstrations- und Forschungsreaktoren wird eine Abfallmenge im Bereich von 10 bis 12 Mg SM (Schwermetall) erwartet. Zudem kommen noch die Abfälle aus der Wiederaufarbeitung hinzu.

Die radioaktiven Abfälle werden nach verschiedenen Arten bzw. nach ihrer Herkunft unterschieden. Es gibt nach /DBE 16/:

- ausgediente Brennelemente aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken sowie Forschungsreaktoren (Brennelemente aus AVR, THTR, KNK II, Otto-Hahn und BER II). Diese Abfälle weisen eine geringe Wärmeproduktion auf. Deshalb ist keine besondere thermische Auslegung der Behälter nötig. Die Wärmeleistung der Brennelemente des Forschungsreaktors FRM II kann nicht vernachlässigt werden.
- verglaste Spülwässer (CSD-B) und verpresste Strukturteile aus der Zerlegung der Brennelemente und technologische Abfälle (CSD-C) sind Gebinde aus der Wiederaufarbeitung mit einer geringen Wärmeproduktion. Auch für sie muss keine thermische Auslegung erfolgen.
- verglaste Spaltprodukte aus der Wiederaufarbeitung (CSD-V), deren Wärmeentwicklung nicht vernachlässigbar ist. Für sie muss eine thermische Auslegungsbeziehung erfolgen.
- ausgediente Brennelemente der Leistungsreaktoren, wie die Brennelemente aus Reaktoren russischer Bauart (WWER) und die Brennelemente aus Reaktoren westlicher Bauart (DWR- und SWR-Brennelemente). Für sie muss ebenfalls eine thermische Auslegungsberechnung erfolgen.

In /DBE 16/ wurde für eine vorläufige Flächenberechnung eines Endlagers im Granit die Behälteranzahl errechnet (Tab. 3.7). Zwischen den Brennelementen aus DWR-, SWR und WWER-Reaktoren bestehen geometrische Unterschiede. Für die Beladung der Behälter wird deshalb ein Umrechnungsfaktor – ein Äquivalenzfaktor – verwendet, mit dem die Anzahl der SWR- und WWER-Brennelemente bestimmt wird, die den gleichen Platzbedarf wie ein DWR-Brennelement haben. Der Äquivalenzfaktor beträgt für SWR-Brennelemente 3 und für WWER-Brennelemente 2,5.

**Tab. 3.7** Behälteranzahl, Anteil am gesamten Behälteraufkommen /DBE 16/

Abfallart	Beladung	Anzahl Behälter	Gesamtanteil in %
AVR, THTR, KNK, Otto Hahn, BER		481	3,25
CSD-B	3	47	0,32
CSD-C	3	1.368	9,25
WWER	6,1*2,5 <sup>1</sup>	332	2,25
CSD-V	2	1.868	12,63
DWR + SWR	1,8	10.656	72,07
FRM II		33	0,22
Gesamt Behälteranzahl		14.785	

<sup>1</sup> Äquivalenzfaktor

### Abfallspektrum Schweden

Das schwedische KBS-3-Konzept sieht vor, hoch radioaktive Abfälle aus dem Betrieb der zwölf schwedischen Kernkraftwerke in ein Endlager am Standort Forsmark endzulagern. Das geplante Endlager ist ausschließlich für die Endlagerung von Brennelementen vorgesehen. Für die Endlagerung von schwach- und mittel- oder langlebigen radioaktiven Abfällen sind andere Standorte vorgesehen. Die schwedischen Kernkraftwerke sind vom Typ Siedewasserreaktor (SWR) und Druckwasserreaktor (DWR). Insgesamt gibt es 12 Reaktoren: Zwei SWR bei Barsebäck, drei SWR bei Forsmark, ein SWR und drei DWR bei Ringhals und drei DWR bei Oskarshamn /SKB 10a/.

Es gibt auch kleinere Mengen anderer Abfälle aus der Forschung und des frühen Atomkraftprogramms, die in Forsmark eingelagert werden sollen. Diese Abfälle werden als „sonstige Abfälle“ bezeichnet /SKB 10a/. In den frühen Jahren des schwedischen Atomkraftprogramms wurden abgebrannte Kernbrennstoffe wiederaufbereitet. Es gab auch einen Reaktor für die Wärmeerzeugung (Ågesta) und einen Forschungsreaktor in Schweden. Zudem entstanden kleine Mengen an Brennstoffrückständen aus Untersuchungen an der s. g. Studsvik-Anlage. Infolgedessen werden auch geringe Mengen MOX-haltiger Brennstoffe in Forsmark eingelagert /SKB 10a/. Die Anzahl der einzulagernden Behälter hängt ab von:

- der Anzahl der Brennelemente in den Behältern,



- der Anzahl an Brennelementen insgesamt,
- dem Abbrand der Brennelemente,
- der zulässigen Zerfallsleistung im Behälter.

In Schweden wird mit ca. 54.000 abgebrannten Brennelementen (12.000 Tonnen abgebrannter Kernbrennstoff) bis zum Laufzeitende aller Reaktoren im Jahr 2045 gerechnet (Tab. 3.8).

**Tab. 3.8** Abfallart und Anzahl der abgebrannten Brennelemente /SKB 10a/

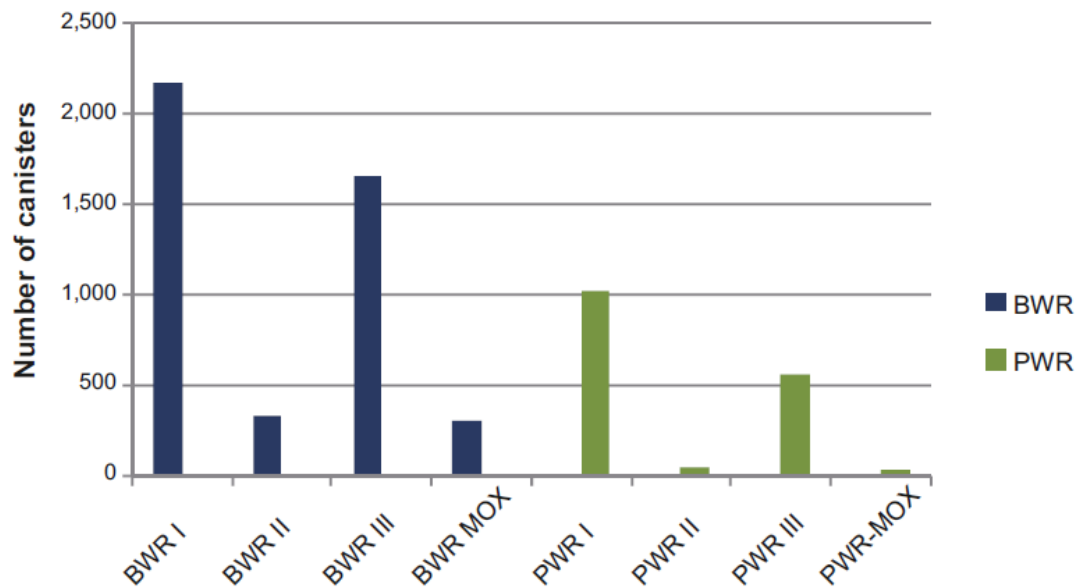
Abfallart	Beschreibung	Anzahl der Brennelemente
SWR UOX	Brennelemente aus Siedewasserreaktoren	47.415
DWR UOX	Brennelemente aus Druckwasserreaktoren	6.016
Ågesta	In Ågesta war in den Jahren 1963-1974 ein unter Druck stehender Schwerwasserreaktor (PHRW) in Betrieb. Der Reaktor belieferte einen Vorort in Stockholm mit Fernwärme und mit geringen Strommengen.	222
SWR MOX	Mischoxide aus Siedewasserreaktoren	267
DWR MOX	Mischoxide aus Druckwasserreaktoren	33
Gesamtanzahl für SWR Behälter		47.904
Gesamtanzahl für DWR Behälter		6.049
Gesamtanzahl		53.953

Die zulässige Zerfallsleistung in einem Behälter darf nach KBS-Konzept nicht zu einer Temperatur von  $> 100^{\circ} \text{C}$  im Buffer führen. Das KBS-3-Konzept basiert deshalb auf einer maximalen thermischen Zerfallsleistung in einem Behälter von 1.700 W /SKB 10a/. Um diese Vorgabe einzuhalten werden Behälter mit Brennelementen kombiniert, die verschiedene Abbrandstadien aufweisen. Aufgrund der Vielzahl an Brennelementen mit unterschiedlichen Abbrandstadien werden einige Behälter nicht komplett gefüllt. Die maximale Anzahl von SWR- und DWR-Brennelementen in einem Behälter beträgt zwölf bzw. vier /SKB 10a/. Es werden folgende Behältertypen nach ihrer Beladung unterschieden (Abb. 3.12):

- SWR I: größter Anteil der SWR Behälter (2.208)

- SWR II: Abfälle mit dem größten Abbrand (321)
- SWR III: nicht komplett gefüllte SWR Behälter (1.655)
- SWR-MOX: SWR Behälter, jeweils beladen mit einem MOX-Brennelement (267)
- DWR I: größter Anteil der DWR Behälter (1.024)
- DWR II: Abfälle mit dem größten Abbrand (38)
- DWR III: nicht komplett gefüllte DWR Behälter (557)
- DWR-MOX: SWR Behälter, jeweils beladen mit einem MOX-Brennelement (33)

Nach dem KBS-3-Konzept errechnet sich nach den obigen Angaben eine Menge von insgesamt ca. 6.000 einzulagernden Behältern /SKB 11a/



**Abb. 3.12** Anzahl der verschiedenen Behältertypen /SKB 11a/

### 3.2.3 Anwendbarkeit des KBS-3-Konzeptes auf deutsche Verhältnisse

Das KBS-3-Konzept sieht eine Endlagerung der Brennelemente in Kupferbehältern (Korrosionswiderstand) mit einem Gusseiseneinsatz (gewährleistet mechanische Stabilität) vor /RAI 12/ (siehe Kap. 3.2.1). Nach /DBE 16/ ist der Behälter aus dem KBS-3-Konzept vergleichbar mit der deutschen BSK-3-Kokille. Nach /JOB 16/ ist das KBS-3-Behälterkonzept aber nicht direkt übertragbar, da in Deutschland MOX-Brennelemente mit höherer Wärmeleistung endgelagert werden:

*„Ein großer Unterschied zu den Konzepten in Finnland und Schweden besteht für Deutschland darin, dass auch MOX-Brennelemente bei der Einlagerung zu berücksichtigen sind, die eine sehr starke Wärmeentwicklung aufweisen. Unterstellt man analog zum schwedisch/finnischen Konzept eine Grenztemperatur von 100°C an der Behälteroberfläche, ist eine Einlagerung ganzer MOX-Brennelemente aufgrund ihrer hohen Wärmeleistung definitiv nicht möglich.“*

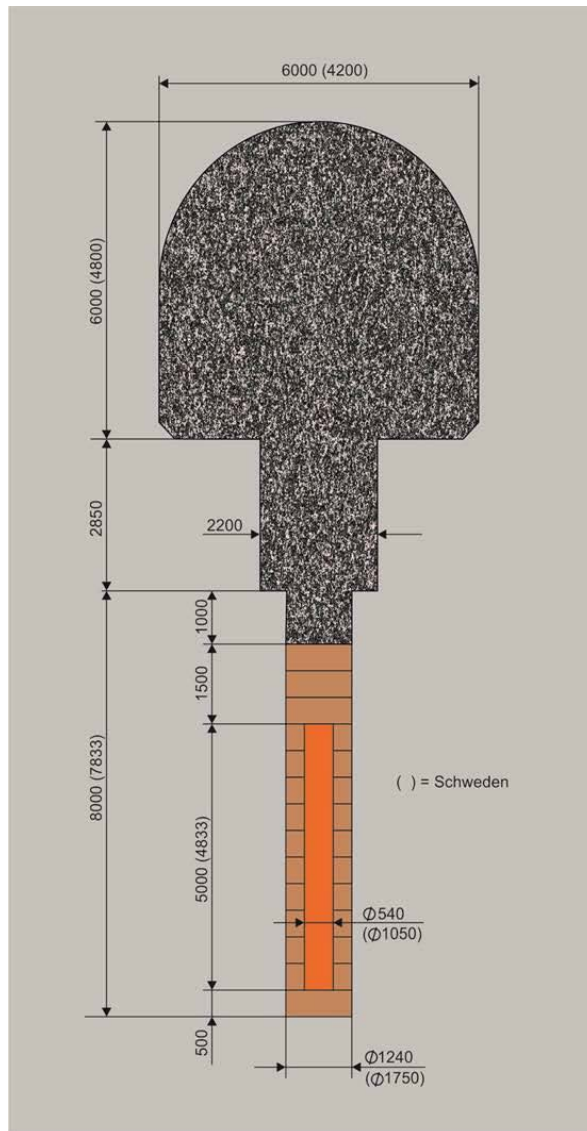
In Schweden (siehe /SKB 10a/) werden abweichend von der obigen Aussage MOX-Brennelemente für die Endlagerung berücksichtigt, allerdings in deutlich geringerer Menge als in Deutschland. Aufgrund der starken Wärmeentwicklung sieht das KBS-3-Konzept vor, dass pro Behälter immer nur maximal ein MOX-Brennelement enthalten ist.

Mit /DBE 16/, /BER 17/ sind Machbarkeitsstudien erstellt worden, die zeigen, wie das KBS-3-Behälterkonzept für deutsche Verhältnisse übertragen werden kann. Dieses Konzept sieht eine kupferummantelte BSK-3-Kokille (BSK-Cu genannt) vor. Der BSK-3 Behälter wurde ursprünglich für Salz konzipiert, kann aber an ein Endlagerkonzept im Kristallin angepasst werden.

Nach /DBE 16/ können die radioaktiven Abfälle aus der Wiederaufarbeitung und die ausgedienten Brennelemente aus den Leistungsreaktoren in den BSK-3-Cu in vertikalen Kurzbohrlöchern eingelagert werden. Die BSK-3-Cu Behälter können alternativ mit CSD-B, CSD-C und CSD-V Kokillen beladen werden bzw. mit Brennstäben aus WWER-BE und DWR-BE, wobei die Brennstäbe der MOX-Brennelemente in einem solchen Verhältnis untergemischt werden, dass zulässige Temperaturen nicht überschritten werden /DBE 16/.

Nach /DBE 16/ können die ausgedienten Brennelemente der Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerke in CASTOR<sup>®</sup>-Behältern in horizontalen Strecken eingelagert werden. Es wird jedoch nicht näher darauf eingegangen, wie das Streckenlagerungskonzept für die CASTOR<sup>®</sup>-Behälter realisiert werden soll. Es muss geprüft werden, ob die Langzeitsicherheit für eine direkte Endlagerung der CASTOR<sup>®</sup>-Behälter im Kristallin gewährleistet werden kann, auch wenn diese keine Kupferummantelung besitzen. Eine Entwicklung anderer Behälterkonzepte, die eine Isolation der Radionuklide auch bei erhöhter Korrosion sicherstellen kann, ist denkbar.

In der Abb. 3.13 ist das Konzept eines Einlagerungsbohrloches für eine entsprechende BSK-3-Kokille dargestellt. Zum Vergleich sind die Abmessungen des KBS-3-Konzeptes in Klammern angegeben. Die Abmessungen des Buffers wurden identisch zu dem KBS-3-Konzept gewählt /JOB 16/.



**Abb. 3.13** Einlagerungsschema von Endlagergebänden in vertikalen Kurzbohrlöchern /DBE 16/

Die Berechnungen der thermischen Auslegung in /DBE 16/ führten bei einer Auslegungstemperatur von 100°C auf einen Gesamtflächenbedarf des Endlagers von 3,56 km<sup>2</sup>.

Nach /JOB 16/ muss für eine Übertragbarkeit des KBS-3-Konzeptes auf Deutschland die Behälterstandzeit der BSK-3-Kokille erhöht werden. In Deutschland muss der

Langzeitsicherheitsnachweis laut Sicherheitsanforderungen bis 1 Mio. Jahren geführt werden. Ohne Kupferummantelung wird für die BSK-3-Kokille eine Standzeit von ca. 1.000 Jahren angenommen. Eine Erhöhung der Behälterstandzeit kann durch eine entsprechend ausgelegte Kupferummantelung der Behälter erreicht werden.

Nach /SKB 11a/, /SSM 08/ sollte die Risikoanalyse für das KBS-3-Konzept mindestens ca. 100.000 Jahre oder den Zeitraum eines Vereisungszyklus betragen. Die Risikoanalyse sollte danach auf einen Zeitraum ausgedehnt werden, in dem Informationen über Prozessentwicklungen mögliche Hinweise zur Verbesserung des Sicherheitskonzeptes liefern, allerdings längstens für einen Zeitraum von bis zu einer Million Jahren.

Nach /RAI 12/ muss die Lebensdauer der Behälter unter Referenzbedingungen mindestens einige Hunderttausend Jahre betragen. Untersuchungen zur Korrosion zeigen, dass die Korrosionstiefe durch Sulfidquellen nicht über einige Millimeter über einen Zeitraum von 1.000.000 Jahre hinausgeht.

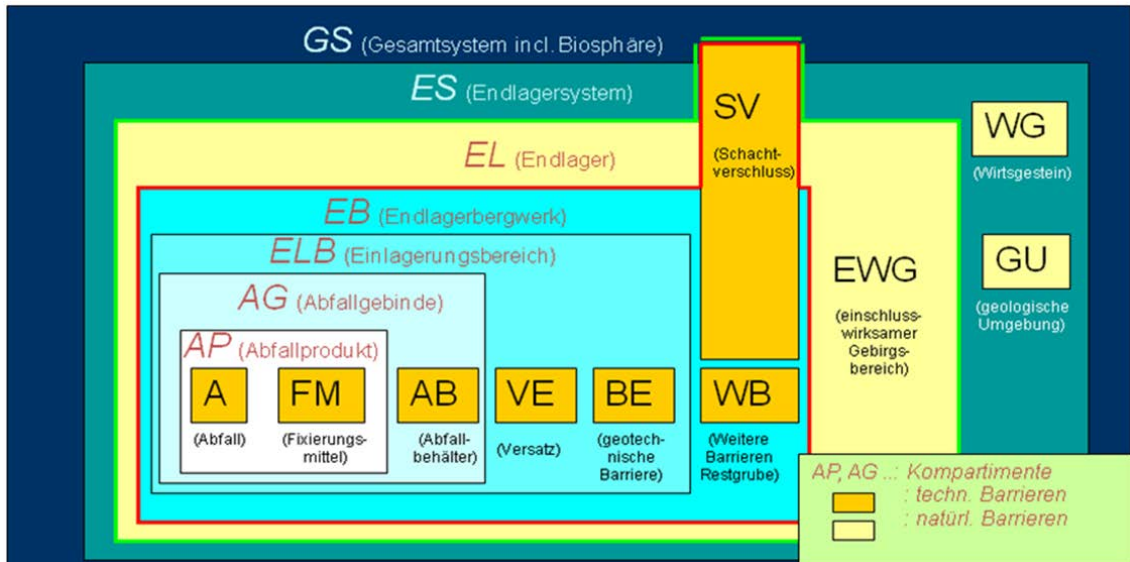
In /SKB 11a/ wird für die Referenzentwicklung des Endlagers angegeben, wie hoch die Wahrscheinlichkeit von Behälterausfällen für bestimmte Zeiträume ist. Detaillierte Analysen zeigen, dass die Wahrscheinlichkeit von Behälterausfällen während der ersten 1.000 Jahre als vernachlässigbar bewertet werden kann. In einer Zeitspanne von einer Million Jahre gibt es jedoch ein geringes Risiko für Behälterausfälle. Bei pessimistischen Annahmen zu Buffererosion, Kupferkorrosion und mechanischer Lastfälle, wird, abhängig vom jeweiligen Szenario, von einigen wenigen Behälterausfällen ausgegangen. Aufgrund der hohen Behälteranzahl in Deutschland (ca. 15.000, /DBE 16/), kann nicht ausgeschlossen werden, dass eine geringe Anzahl von Behältern aufgrund von Fertigungsdefiziten während des Nachweiszeitraumes ausfallen werden. Deshalb wird in /JOB 16/ entsprechend dem aktuellen Stand der Technik eine Ausfallmenge von 0,1 % der Behälter (ca. 15 Stück) nach Endlagerverschluss angenommen.

### **3.3 Allgemeine Erweiterungen der VerSi-Methode**

#### **3.3.1 Modifikation des VerSi-Komponentenmodells**

Im Vorläufervorhaben VerSi I wurde ausgehend von den verwendeten standortspezifischen Sicherheits- und Endlagerkonzepten eine Systematisierung des Netzwerkes an Sicherheitsfunktionen eines Endlagersystems entlang seiner einzelnen Komponenten

und Kompartimente vorgenommen. Diese Strukturierung, an der sich im Vorhaben VerSi I sämtliche weitere Verfahrensschritte orientierten, ist schematisch in Abb. 3.14 dargestellt.



**Abb. 3.14** Schematische Darstellung der Kompartimente und Komponenten eines Endlagersystems im Vorhaben VerSi I

Die rote Linie umfährt das Endlagerbergwerk, der einschlusswirksame Gebirgsbereich wird von der grünen Linie begrenzt. WG = weiteres Wirtsgestein außerhalb des ewG /FIS 10/.

Betrachtet wurde dabei ein System gestaffelter sicherheitsrelevanter Komponenten, bestehend aus technischen und natürlichen Barrieren, die innerhalb ineinander verschachtelter Kompartimente liegen, nämlich:

- das **Abfallprodukt**, welches aus den radioaktiven Abfällen und dem Fixierungsmittel besteht und damit den Behälterinhalt darstellt,
- das **Abfallgebände**, d. h. der Behälter und das in ihm eingeschlossene Abfallprodukt,
  - den **Einlagerungsbereich**, der neben den Abfallgebänden den Versatz der Bohrlochüberfahrungsstrecken und deren Abdichtungen umfasst,
- das **Endlagerbergwerk**, welches aus den versetzten und abgedichteten Einlagerungsbereichen und infrastrukturell genutzten Hohlräumen (Zugangs- und Bewetterungsstrecken) sowie den abgedichteten Schächten besteht,

- das **Endlager**, welches sich aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG) mit dem Endlagerbergwerk zusammensetzt und in dem die rückhaltenden Sicherheitsfunktionen wirken,
- das **Endlagersystem**, welches zusätzlich den nicht zum ewG gehörigen Anteil des Wirtsgesteins sowie das Deckgebirge (geologische Umgebung) enthält. Aufgabe dieses Kompartiments ist der Schutz des ewG gegenüber mechanischen, hydraulischen oder geochemischen Einflüssen von außen durch integritätswahrende Sicherheitsfunktionen.

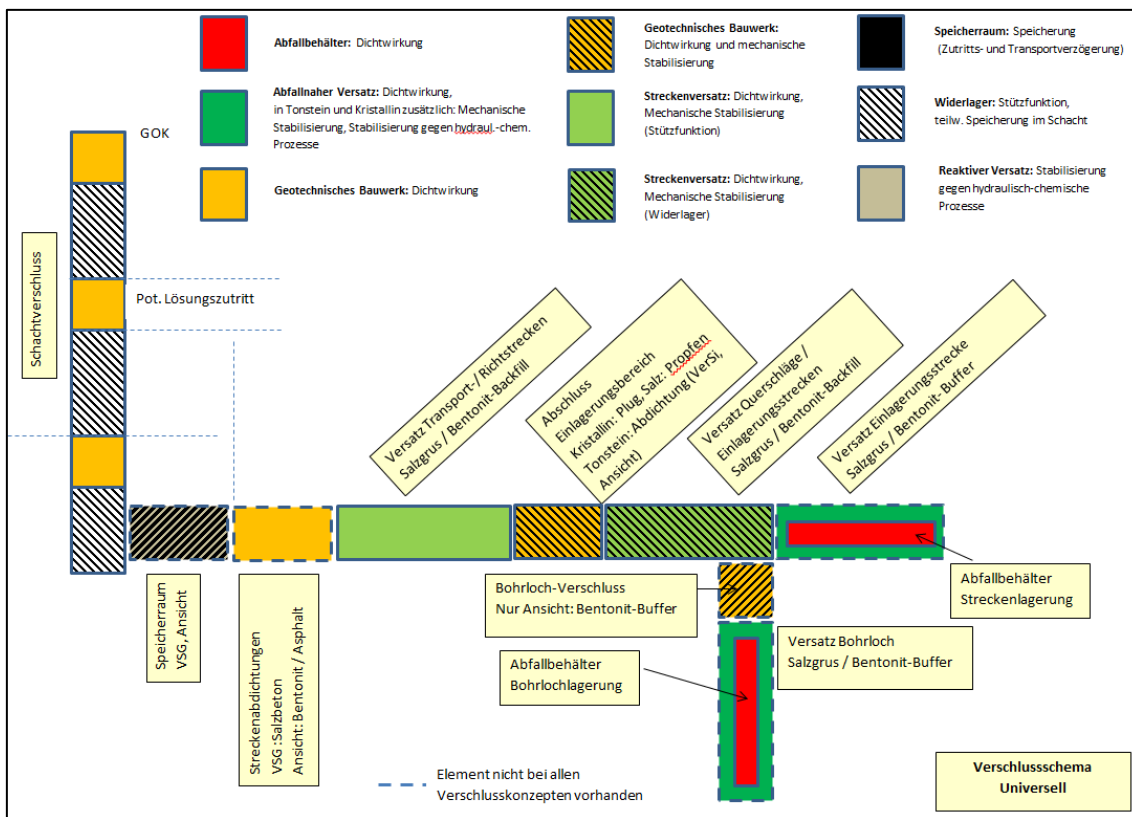
Anzumerken ist, dass es sich hierbei um Begriffe handelt, die im Vorhaben VerSi I verwendet wurden. Teilweise bestehen Abweichungen zu den Definitionen im StandAG /STA 17a/. Dies betrifft den Begriff des Einlagerungsbereiches, der in /STA 17a/ räumlich weiter gefasst ist und des Deckgebirges, welches nach /STA 17a/ auch den oberhalb des ewG angrenzenden Teil des weiteren Wirtsgesteins umfasst.

Eingerahmt sind diese Kompartimente in das **Gesamtsystem**, welches im Wesentlichen die oberhalb des Deckgebirges anschließende Biosphäre und ggf. noch neben bzw. unterhalb des Endlagers anschließende geologische Formationen umfasst. Da hierzu bei beiden Sicherheitskonzepten für Tonstein und Steinsalz im Vorhaben VerSi I keine sicherheitsrelevanten Anforderungen angesetzt wurden, ist dieses Kompartiment nur der Vollständigkeit halber in Abb. 3.14 dargestellt, es spielte jedoch keine Rolle bei der Abwägungsmethode.

Zu Beginn der Arbeiten zur Erweiterung der Abwägungsmethode auf Kristallinstandorte im Vorhaben VerSi II wurde klar, dass dieses System, welches aus zwei horizontalen Einlagerungskonzepten und standortspezifischen Verschlusskonzepten abgeleitet worden war, eine zu geringe Flexibilität aufweist, um alle, für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in Deutschland in Frage kommenden Verschlusskonzepte abzubilden. So können aktuelle Verschlusskonzepte, wie diejenigen, die in den Vorhaben ANSICHT /JOB 17/ oder CHRISTA /JOB 16/ entwickelt wurden, in dieser Form nicht abgebildet werden, da es weitere Komponenten gibt, bzw. solche, die in Abb. 3.14 dargestellt sind, fehlen. Auch ist das in Abb. 3.14 dargestellte Schema inkompatibel zum KBS-3-Verschlussystem, welches als Referenzsystem im Vorhaben VerSi II dient.

Um möglichst alle nicht nur in Deutschland, sondern im internationalen Raum projektierten Verschlussysteme zum Zwecke des Systemvergleichs abbilden zu können,

wurde ein Komponentenmodell entwickelt, dessen Komponenten nicht nur lokationsbezogen sondern auch funktionsbezogen sind. Funktionsbezogen bedeutet, dass die entsprechenden Komponenten entsprechend ihrer dominanten Sicherheitsfunktion (Dichtwirkung, geomechanische Stabilisierung, Speicherung etc.) definiert wurden. Durch die entsprechende Auswahl und Anordnung dieser modularen Komponenten können verschiedene Verschlussysteme für unterschiedliche Wirtsgesteine und Einlagerungsarten beschrieben werden (Abb. 3.15). In Tab. 3.9 sind die Komponenten aus der Abb. 3.15 näher erläutert. Die Beschreibung der Sicherheitsfunktionen befindet sich im Kapitel 3.4.



**Abb. 3.15** Schematische Darstellung des im Vorhaben VerSi II entwickelten lokations- und funktionsbezogenen Verschlusskomponentenmodells. Universal-darstellung für verschiedene wirtsgesteinsspezifische Einlagerungs- und Verschlusskonzepte

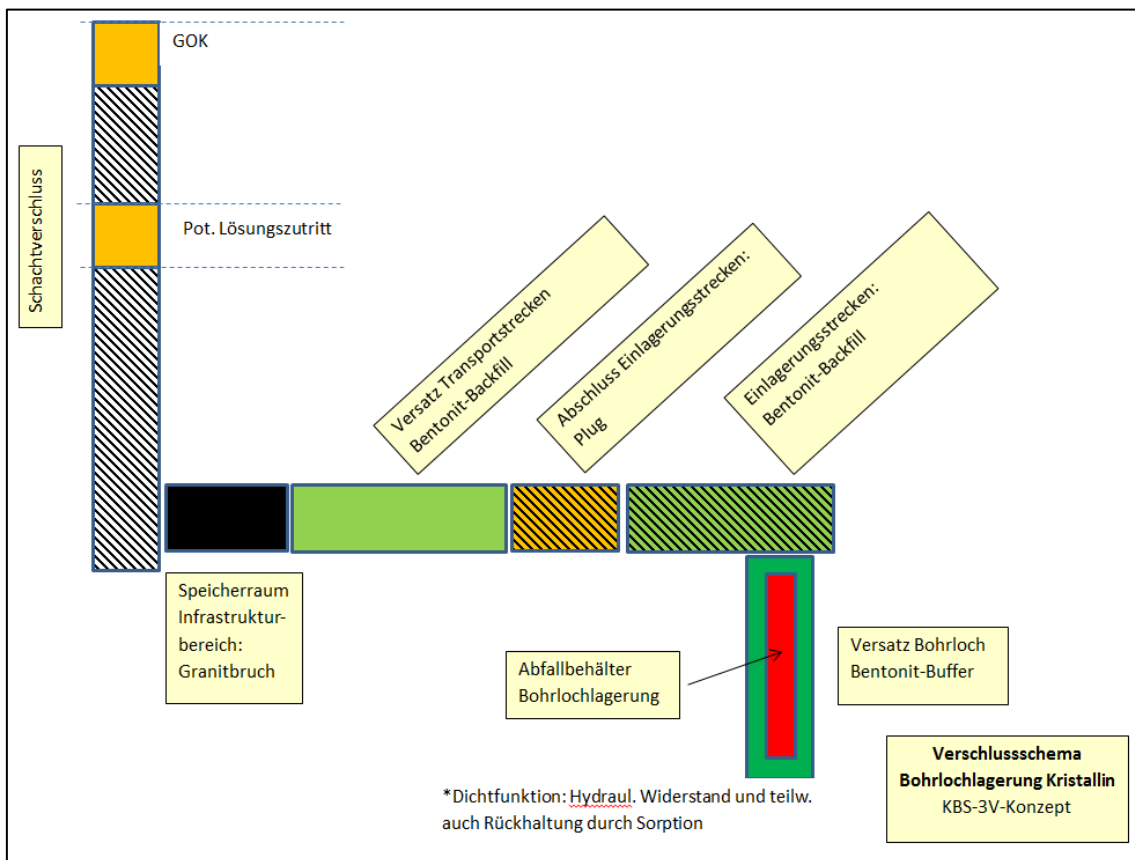


**Tab. 3.9** Erläuterung der Verschlusskomponenten und deren Schutzfunktion

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

Es ist festzustellen, dass die verschiedensten Endlager-Verschlusskonzepte durch eine relativ geringe Anzahl an Komponententypen dargestellt werden können. Es handelt sich um 7 Hauptkomponenten und 2 Kombinationskomponenten mit zusätzlicher Widerlagerfunktion.

Das im Vorhaben VerSi II als Referenzkonzept verwendete KBS-3-Verschlusskonzept (vgl. Kap. 3.2.1) ist in Abb. 3.16 dargestellt. Die in VerSi II definierten Sicherheitsfunktionen werden diesen Komponenten zugeordnet (Kap. 3.4.2)



**Abb. 3.16** Schematische Darstellung des schwedischen KBS-3-Konzeptes durch lokations- und funktionsbezogenen Komponenten (Legende s. Abb. 3.15)

### 3.3.2 Rolle der Geosphäre bei Sicherheitskonzepten für Kristallin

Vor Inkrafttreten des StandAG wurden im Vorhaben CHRISTA Überlegungen zur möglichen ewG-Konfigurationen im Kristallin angestellt /JOB 16/. Ermittelt wurden

Konfigurationen, welche die derzeit gültigen Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ theoretisch erfüllen könnten:

- Kristallingestein mit Überdeckung durch barrierewirksame Gesteinsschichten („Typ Bb“, entsprechend der Nomenklatur des AkEnd /AKE 02/).
- Ausweisung mehrerer ewG-Bereiche im Kristallin mit geringer oder hydraulisch unwirksamer Klüftung („Typ ‚multipler ewG‘“) /JOB 16/.

Mit der Verabschiedung des StandAG /STA 17a/ ist die Ausweisung eines einschlusswirksamen Gebirgsbereichs für Endlagersysteme in kristallinem Wirtsgestein, die wesentlich auf technischen oder geotechnischen Barrieren beruhen, nicht erforderlich. An die Stelle des ewG tritt in diesem Fall der Einlagerungsbereich, die Mindestanforderungen sowie Abwägungskriterien sind nun nach StandAG (§23 (4) und (5) sowie §24 (2)) größtenteils auf den Einlagerungsbereich anzuwenden.

### **Dispersion als Sicherheitsfunktion der Geosphäre**

Die für den Radionuklidtransport relevanten Eigenschaften und Zustände der Geosphäre betreffen nach Anlage 1 und 6 des StandAG die Grundwasserströmung, das Grundwasserangebot, die Gebirgsdurchlässigkeiten und die Diffusionsgeschwindigkeiten<sup>3</sup>. Wie nachfolgend dargelegt wird, ist jedoch auch der Vorgang der Dispersion von Radionukliden in geklüfteten Medien grundsätzlich ein sicherheitstechnisch relevanter Vorgang.

Die Dispersion verteilt Radionuklide auf ein größeres Fluidvolumen. Prozesse, die hierzu beitragen, sind die Sorption, die Matrixdiffusion (diffusiver Austausch zwischen Klüften und Gestein), die mechanische Dispersion (Auffächerung von Stoffkonzentrationen aufgrund unterschiedlich gewundener Fließpfade) und die Diffusion innerhalb der Klüfte. All diese Verteilungsprozesse bewirken im Grunde genommen eine Verdünnung der Radionuklidfracht.

---

<sup>3</sup> Der im StandAG verwendete Begriff der Diffusionsgeschwindigkeit ist irreführend. Teilchendiffusion entsteht durch die zufällige Wanderung von Partikeln, die unterschiedliche Geschwindigkeitsbeträge und -richtungen besitzen. Treffer wäre von einem diffusiven Fluss zu sprechen, der jedoch deshalb eine ungünstige Bewertungsgröße ist, weil er von den Konzentrationsgradienten abhängt, die lokal sehr unterschiedlich ausfallen können, so dass ein Rückschluss auf den großräumigen diffusiven Partikelfluss nicht möglich ist. Die Bezugnahme auf den effektiven Diffusionskoeffizienten im StandAG zur Bemessung der Diffusionsvorgänge erscheint jedoch zielführend.

Die Bedeutung der Dispersion wird anhand des Problems des „einschlusswirksamen Bereichs“ (ewB) deutlich, das von der ESK für Kristallinstandorte diskutiert wurde /ESK 16/. Beim ewB-Konzept werden die ewG-spezifischen Anforderungen der Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ – insbesondere für den optionalen vereinfachten Nachweis – nicht mehr auf das Wirtsgestein, sondern auf die technischen Barrieren angewendet. Dem Wirtsgestein würde in diesem Fall keinerlei Barrierewirksamkeit zugewiesen.

Beim ewB-Konzept würde beim vereinfachten Nachweis im Sinne von /BMU 10/ die Geringfügigkeit am äußeren Rand der technischen Barrieren nachgewiesen, weil diese die Rolle des ewG übernehmen. Wie im Vorhaben CHRISTA dargelegt wurde (/JOB 16/, S. 14f), ist jedoch auch in wahrscheinlichen Szenarien mit einem vorzeitigen Versagen einiger der die Behälter umschließenden Buffer zu rechnen. Am Rand der Buffer (der bei den Überlegungen in /ESK 16/ mit dem Rand des ewB übereinstimmt) käme es dann voraussichtlich zu einer Überschreitung der gemäß /BMU 10/ anzuwendenden Dosisgrenzwerte. Damit scheitert das ewB-Konzept, sofern man die Buffer-Dimensionierung in akzeptablen Grenzen halten will.

Problematisch am ewB-Konzept ist, dass es keine Möglichkeit bietet, lokale Konzentrationsspitzen von Radionukliden durch dispersive Prozesse in der Geosphäre zu dämpfen, da kein Dispersionsraum zur Verfügung gestellt wird. Ein solcher Dispersionsraum läge vor, wenn man die Radionuklidkonzentrationen in größerer Entfernung vom Endlager ermitteln würde, etwa am Rande eines ausgedehnten Einlagerungsbereiches oder in der Biosphäre.

Sicherheitsnachweise, welche die Geringfügigkeit in der Biosphäre überprüfen, nehmen stets von einem Dispersionsraum Kredit. Dies ist auch beim schwedischen Sicherheitskonzept der Fall. Hier wird die Geringfügigkeit der Radionuklidkonzentrationen nicht am Rande der Buffer, sondern in der Biosphäre geprüft /SKB 11a/. Zwischen den Buffern und der Biosphäre liegt ein Abstand von ca. 470 m, der im Fall des Versagens einzelner Behälter für eine Verzögerung und Dispersion der Radionuklide und damit für eine Abschwächung von Konzentrationsspitzen sorgt.

Falls ein Sicherheitsnachweis in dieser Weise von einem Dispersionsraum Kredit nimmt (z. B. von der Dispersion im Deckgebirge), dann sollte der Dispersionsraum explizit ausgewiesen und seine Funktion kenntlich gemacht werden. Dies dient der Transparenz des Nachweisverfahrens.

Im Rahmen der VerSi-Abwägungsmethode wäre die Sicherheitsfunktion des Dispersionsraumes die Dispersion der Radionuklide. Auch wenn die Prozesse, welche eine Dispersion bewirken oft rückhaltende Prozesse sind (Sorption, Matrixdiffusion), so besitzt der Dispersionsraum bei Kristallinkonzepten dennoch keine rückhaltende Sicherheitsfunktion, da er weder zu den wesentlichen rückhaltenden Barrieren gehört noch gehören soll (diese sind die technischen Barrieren). Der Einschluss der Radionuklide muss bei Kristallinkonzepten gemäß StandAG durch die technischen Barrieren erfolgen.

Um neben den integritätsbewahrenden und rückhaltenden Sicherheitsfunktionen keine weitere Funktionsklasse zu eröffnen, wird die Sicherheitsfunktion des Dispersionsraumes im Folgenden den rückhaltenden Sicherheitsfunktionen zugeordnet. Im Abwägungsverfahren ist ihre Relevanz als gering einzustufen, weil der Dispersionsraum zwar für den Sicherheitsnachweis wichtig ist, aber keine wesentliche rückhaltende Barriere darstellt.

### **Rolle des Verdünnungsprozesses in Sicherheitskonzepten**

Wenn ein Dispersionsraum eingeführt werden soll, dann ist zu beachten, dass die Strahlenschutzverordnung /SSV 17/ ein generelles Verdünnungsverbot enthält. Dies scheint der Einführung einer solchen Sicherheitsfunktion zunächst formal entgegen zu stehen. Zudem scheint eine Verdünnung auch dem internationalen Konsens, Endlager nach dem Konzept des „confine and isolate“ zu implementieren (/IAEA 11/, S. 2), zu widersprechen.

Um diesen Konflikt aufzulösen, muss zunächst festgestellt werden, dass dispersive Verdünnungsvorgänge auch ohne eine diesbezüglich explizite sicherheitskonzeptionelle Anforderung in allen Endlagersystemen omnipräsent sind und im Rahmen der Konsequenzenanalysen auch berücksichtigt werden. Auch bei Endlagersystemen in Tonstein und Salinar treten die Vorgänge der Sorption, Diffusion und mechanischen Dispersion auf, entweder im ewG oder in den technischen Barrieren. Besonders ausgeprägt sind dispersive Verdünnungsprozesse bei Endlagern des ewG-Typs Bb (permeables Gebirge mit geringpermeabler Überdeckung). Hier sind unterhalb der geringpermeablen Überdeckung theoretisch längere Transportstrecken zulässig, was zwangsläufig mit einer starken dispersionsbedingten Verdünnung einhergeht. Eine zu strikte Auslegung des Verdünnungsverbotes würde also die Möglichkeit der Endlagerung *für alle Wirtsgesteine* grundsätzlich in Frage stellen.

Verdünnung ist nicht in jedem Umfang unbedenklich. Ziel des Verdünnungsverbotes ist es, eine Entsorgung durch bloße Verdünnung unterhalb der Freigrenzen zu verhindern. Ein Endlagersystem, das trotz Wahrung aller Dosisgrenzwerte auf Verdünnung in oberflächennahe Grundwassersysteme setzt, erfüllt nicht den Grundsatz des „confine and isolate“.

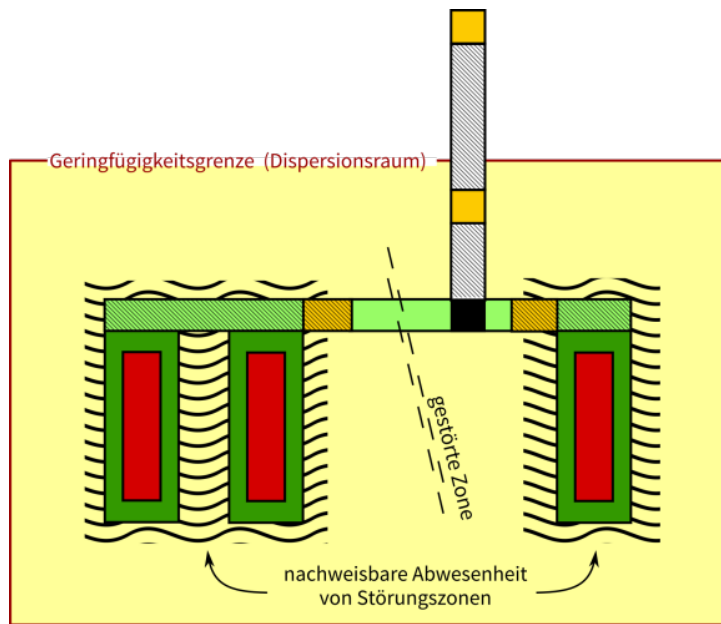
Insofern wäre nachzuweisen, dass auch im Fall des Versagens einzelner Behälter der Hauptteil der Radionuklide endlagernah eingeschlossen bleibt und nur geringfügige Mengen an Radionukliden diesen Raum verlassen. Nur wenn dies der Fall ist, kann der Grundsatz des „confine and isolate“ als erfüllt angesehen und die Anforderung des sicheren Einschlusses gemäß /STA 17a/ erfüllt werden (siehe dazu auch Kapitel 3.1.1).

Dabei ist (ggf. regulatorisch) der Begriff des sicheren Einschlusses noch weiter zu konkretisieren, unter anderem dahingehend, welcher Anteil an Radionukliden quantitativ innerhalb des Nachweiszeitraumes endlagernah verbleiben muss.

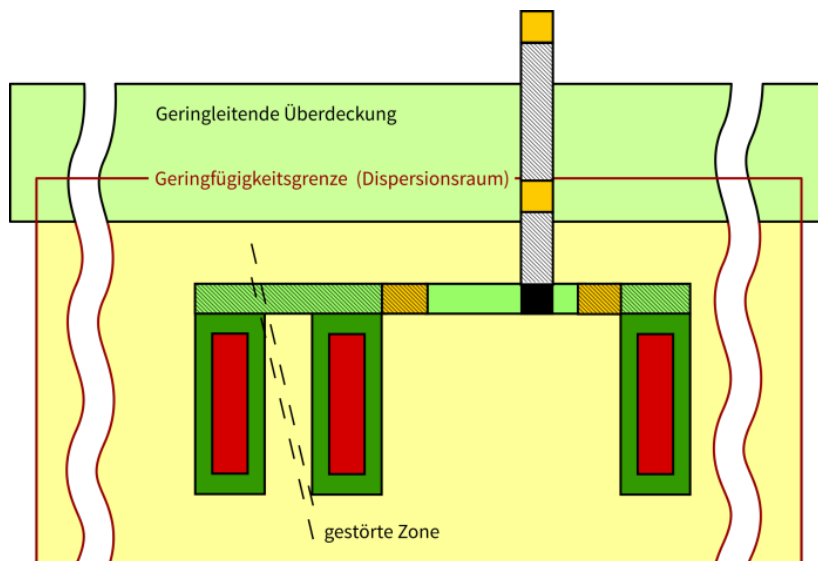
### **Dispersionsraum und Einlagerungsbereich**

Sofern man keine weitere Endlagerkomponente einführen möchte, empfiehlt es sich, den im StandAG genannten Einlagerungsbereich als Dispersionsraum auszulegen. Der Dispersionsraum dient dabei der großräumigen Mittelung lokaler Radionuklid-Konzentrationsspitzen, um Geringfügigkeitsgrenzwerte einhalten zu können. Der Einlagerungsbereich müsste dann so groß gewählt werden, dass er die Funktion eines Dispersionsraumes erfüllen kann. Geringfügigkeit wäre dann am Rande des Einlagerungsbereiches nachzuweisen (räumliche „Geringfügigkeitsgrenze“).

Abb. 3.17 zeigt die Lage des Dispersionsraumes im Falle des KBS-3-Konzeptes. Das Konzept des Dispersionsraumes ist jedoch auch für Gesteine mit geringpermeabler Überdeckung anwendbar, wobei wegen des Geringfügigkeitsnachweises ein Teil der geringpermeablen Überdeckung innerhalb des Dispersionsraumes liegen sollte (Abb. 3.18). Hierauf wird gesondert in Kapitel 3.6 eingegangen.



**Abb. 3.17** Lage des Dispersionsraumes beim KBS3-Konzept



**Abb. 3.18** Mögliche Lage eines Dispersionsraumes im Falle eines Endlagersystems mit geringpermeabler Überdeckung (s. Kap. 3.6).

### Behandlung des Dispersionsraumes in VerSi II

Die VerSi-Abwägungsmethode wird dahingehend erweitert, dass der Dispersionsraum als eigenständige Endlagerkomponente „Einlagerungsbereich“ geführt wird, dem neben integritätsbewahrenden Sicherheitsfunktionen die Sicherheitsfunktion „Dispersion“

zugeordnet wird. Die Sicherheitsfunktion wird den rückhaltenden Sicherheitsfunktionen zugeordnet, weil es in der Regel rückhaltende Prozesse sind, die eine Dispersion verursachen. Wie oben bereits erwähnt, bedeutet dies nicht, dass der Dispersionsraum eine rückhaltende Barriere wäre.

Es ist grundsätzlich auch möglich, zusätzlich eine Gebirgszone im unmittelbaren, besser erkundbaren Saumbereich der Buffer auszuweisen, an die ggf. hydraulische Anforderungen gestellt werden. Eine solche, ausgewiesene Saumzone könnte Einschlusswirkung besitzen oder sie könnte – wie im schwedischen Konzept – die Strömungsgeschwindigkeiten drosseln, um die Buffer vor Erosion zu schützen. Die Saumzone würde dann im Abwägungsverfahren als zusätzliche Komponente Berücksichtigung finden.

### **3.3.3 Relevanz- und Robustheitsklassifizierung**

Die Revision des VerSi-I-Verfahrens zur Relevanz- und Robustheitsklassifizierung legte eine Weiterentwicklung des Verfahrens in mehreren Punkten nahe, die nachfolgend erläutert werden.

#### **3.3.3.1 Komponentenspezifische Sicherheitsfunktionen**

##### **VerSi I**

Die im Vorhaben VerSi I entwickelte Abwägungsmethode der Relevanz- und Robustheitsklassifizierung bezog sich auf Sicherheitsfunktionen, die sowohl einem sog. Kompartiment als auch einer sog. Komponente (inkl. eines Teilsystems) zugeordnet waren. Dabei waren Art und Anzahl der Kompartimente und Komponenten für die in VerSi I betrachteten Wirtsgesteine Tonstein und Salz jeweils identisch. Weiterhin wurde der Abwägungsmethode eine für beide Endlagersysteme identische Anzahl von Sicherheitsfunktionen zu Grunde gelegt, die sich entsprechend den unterschiedlichen Sicherheitskonzepten allerdings in ihrer Relevanz unterschieden. Diese Sicherheitsfunktionen wurden einer Robustheitsbewertung unterzogen.

##### **VerSi II**

Mit der Modifikation des VerSi-Komponentenmodells nach Kap. 3.3.1 wurde die Anzahl der Komponenten geändert sowie die Bedeutung der Komponenten neu definiert, da-



mit die Methode zu allen in Frage kommenden Endlagersystemen kompatibel ist. Entscheidend an dieser Stelle ist, dass nach der modifizierten Methode (VerSi II) für verschiedene Endlagersysteme eine unterschiedliche Anzahl von Komponenten möglich ist.

Die Neudefinition der Komponenten erfolgte im Wesentlichen aufgrund der Ihnen zuzuordnenden wesentlichen Sicherheitsfunktionen (siehe Kap. 3.3.1). Entscheidend für das weitere Verfahren bzw. die Abwägungsmethode ist, dass Sicherheitsfunktion und Komponente einander zugeordnet werden müssen, wie es auch bereits im Vorhaben VerSi I der Fall war /FIS 10/. Eine Sicherheitsfunktion ohne zugeordnete Komponente ist nach dieser Vorgehensweise für das Sicherheitskonzept eines Endlagersystems bedeutungslos, ebenso wie eine Komponente ohne zugeordnete Sicherheitsfunktion für das Sicherheitskonzept bedeutungslos ist. In der Konsequenz heißt das, dass eine Bewertung der Robustheit und Relevanz nur mit diesen einander zugeordneten Sicherheitsfunktionen und Komponenten möglich ist. Diese werden im Folgenden komponentenspezifische Sicherheitsfunktionen genannt.

### **3.3.3.2 Verzicht auf Rangzahlen**

Ein wesentlicher Teil der Methode, die im Vorhaben VerSi I entwickelt wurde, besteht in der Bewertung der Relevanz und der Robustheit der Komponenten des Endlagersystems (sowie der ihnen zugeordneten Sicherheitsfunktionen). Die Robustheit dient als Vergleichsmaßstab oberhalb der Erfüllung eines regulatorischen Sicherheitsniveaus, da davon ausgegangen wird, dass keine Erkenntnisse bestehen, die gegen eine Genehmigungsfähigkeit des Endlagersystems sprechen /FIS 10/.

Wie in /FIS 10/ dargestellt, ist diese Methode eine verbal-argumentative Bewertung, die als Konsequenz eine Ordinalskala zur Beurteilung der Robustheit und der Relevanz verwendet. In /FIS 10/ werden dabei für die Ausprägung der Merkmale „Robustheit“ bzw. „Relevanz“ die Rangzahlen 1 bis 5 benutzt.

Es hat sich im Zuge der Arbeiten in VerSi II herausgestellt, dass die Verwendung von Rangzahlen die Gefahr birgt, dass die Zahlenwerte unzulässigerweise miteinander verrechnet werden. Dies sollte jedoch im Sinne der VerSi I-Methode vermieden werden, weil Standortentscheidungen nicht anhand numerischer Rechenvorschriften (z. B. durch Errechnung einer „Durchschnittsnote“), sondern auf der Grundlage eines tiefge-

henden Systemverständnisses und durch Abwägung verschiedener (auch nicht-numerischer) Argumente durchgeführt werden sollte.

Obwohl im Abschlussbericht zu VerSi I deutlich ausgeführt ist, dass Robustheits- und Relevanzeinstufungen nicht miteinander verrechnet werden dürfen, verleitet vor allem die Darstellung in Matrizen- oder Tabellenform den Anwender zu Verrechnungen von Robustheits- oder Relevanzwerten.

Um die Gefahr unzulässiger Verrechnungen zu mindern, bietet sich die Verwendung nicht-numerischer Merkmalsausprägungen an. Anstelle der Ausprägungen 1 bis 5 für die Spektren „niedrige Robustheit bis hohe Robustheit“ und „niedrige Relevanz bis hohe Relevanz“ werden daher im Rahmen von VerSi II die Ausprägungen „A“, „B“, „C“, „D“ und „E“ verwendet (siehe Tab. 3.10).

**Tab. 3.10** Ordinale Buchstabenskala für Robustheit und Relevanz

Skala	Robustheit	Relevanz
A	hoch	hoch
B	eher hoch	eher hoch
C	mittel	mittel
D	eher niedrig	eher niedrig
E	niedrig	niedrig

### 3.3.3.3 Einführung einer Pivot-Tabelle

Die Verwendung einer anderen Skala ändert, wie nachfolgend dargestellt, verschiedene Verfahrensschritte der Abwägungsmethode

#### Verfahrensschritte nach VerSi I

Rangzahlen wurden im Vorhaben VerSi I in zahlreichen Verfahrensschritten der Methode eingesetzt. In Tab. 3.11 ist ein Beispiel für den 3. Verfahrensschritt (Relevanzwichtung der Sicherheitsfunktionen) gezeigt, so wie er im Rahmen der Abwägungsmethode von VerSi I genutzt wurde. Erkennbar ist die Nutzung einer numerischen, rangbasierten ordinalen Skala.

**Tab. 3.11** Relevanzwichtig nach VerSi I (geändert aus /FIS 10/, Anhang 2)

Lfd. Nr. Sicherheitsfunktion	Relevanz Ordinale Rangzahlen: 1: keine Relevanz bis 5: sehr hohe Relevanz ("unverzichtbar")			
	< 10 ka		> 10 ka	
Teilsystem Abfallgebinde				
Komponenten Behälter	Tonstein	Salz	Tonstein	Salz
7	(5)	(2)	(1)	(1)
8	(3)	(3)	(1)	(1)
10	(3)	(4)	(1)	(1)

Im Verfahrensschritt 5 wird in 5 Teilschritten (5a – 5e) die Robustheit rückhaltender Sicherheitsfunktionen bewertet. In einigen Schritten bzw. Teilschritten erfolgt eine sog. Einstufung (auf der Grundlage von Expertenmeinungen, /FIS 10/), die bislang (VerSi I) auf einer ordinalen Skala von 1 – 5 durchgeführt wurde. Diese Einstufungen werden auf der Basis von Expertenmeinungen zusammengesetzt („Aggregation“) und insgesamt bewertet, ebenso auf einer ordinalen Rangskala von 1 – 5.

Insgesamt steht am Ende des Verfahrensschritts 5 jeweils die Einstufung einer rückhaltenden Sicherheitsfunktion („RSF“) für zwei unterschiedliche Zeiträume (unter und über 10.000 Jahren) mittels der Skala von 1 – 5.

In Verfahrensschritt 6 wurden im Vorhaben VerSi I die Robustheits- und Relevanzwerte mittels einer sog. *Matrix zur Ableitung von Robustheitsdefiziten* miteinander korreliert. Diese ist in Tab. 3.12 dargestellt. Erkennbar ist, dass der wesentliche Teil der Korrelation darin besteht, die Differenz der jeweiligen Rangzahlen der Relevanz und Robustheit einer bestimmten Sicherheitsfunktion X zu bilden. Dadurch wurden (in VerSi I) so genannte *Robustheitsdefizite* identifiziert. Ein Robustheitsdefizit kleiner -1 wird als Indikator gewertet, dieses Robustheitsdefizit bzw. die dazugehörige Sicherheitsfunktion X genauer zu analysieren.

**Tab. 3.12** Ableitung von Robustheitsdefiziten durch Subtraktion der Relevanz-Rangzahlen von den Robustheits-Rangzahlen nach VerSi I (nach /FIS 10/)

Sicherheitsfunktion X		Relevanz der Sicherheitsfunktion				
		5 = sehr hohe Relevanz	4 = hohe Relevanz	3 = mittlere Relevanz	2 = geringe Relevanz	1 = sehr geringe Relevanz
Robustheit der Sicherheitsfunktion	5 = sehr hohe Robustheit	0	+1	+2	+3	Nicht vergleichsrelevant
	4 = hohe Robustheit	-1	0	+1	+2	Nicht vergleichsrelevant
	3 = mäßige Robustheit	-2	-1	0	+1	Nicht vergleichsrelevant
	2 = geringe Robustheit	-3	-2	-1	0	Nicht vergleichsrelevant
	1 = sehr geringe Robustheit	-4	-3	-2	-1	Nicht vergleichsrelevant

Nach der Korrelation konnten in der ursprünglichen Abwägungsmethode nach VerSi I Robustheit, Relevanz und Korrelation jeweils für wesentliche Zeiträume in Tabellenform dargestellt werden (siehe Tab. 3.13). Diese Tabelle stellt im Rahmen des Vorhabens VerSi I einen wesentlichen Teil der Hauptergebnisse der Abwägungsmethode dar.

**Tab. 3.13** Ergebnistabelle Relevanz/Robustheit und deren Korrelation (geändert nach /FIS 10/) für ein Wirtsgestein nach VerSi I

Sicherheitsfunktion Nr.	Relevanz der Sicherheitsfunktion				Robustheit der Sicherheitsfunktion				Korrelation Robustheit/Relevanz			
	< 10 ka		> 10 ka		< 10 ka		> 10 ka		< 10 ka		> 10 ka	
11	5	2	1	1	4	4	1	1	-1	2	0	0
12	2	1	1	1	4	1	1	1	1	0	0	0
13	2	1	1	1	3	1	1	1	1	0	0	0

## VerSi II

Wie bereits erwähnt (Kap. 3.3.3.2), ist der Vergleich identischer Sicherheitsfunktionen zwischen den unterschiedlichen Sicherheitskonzepten (bzw. Wirtsgesteinen) nicht unbedingt zielführend. Außerdem führt im Vorhaben VerSi II die konsequente Nutzung einer buchstabenbasierten ordinalen Rangskala dazu, dass die Bildung der Differenz zwischen Robustheit und Relevanz verhindert wird. Hierdurch wird der in VerSi I vorgeschlagene Verzicht auf eine numerische Verrechnung von Bewertungsgrößen konsequent umgesetzt.

Um trotzdem Robustheitsdefizite ausweisen zu können und Robustheit und Relevanz sinnvoll miteinander zu korrelieren, wird die Verwendung einer Pivot-Tabelle /WIK 17a/ vorgeschlagen. Eine Pivot-Tabelle aggregiert eine Vielzahl von Informationen in übersichtlicher Weise. Dazu ist es erforderlich, dass mindestens die Information über die Bewertung (Relevanz und Robustheit) der Sicherheitsfunktionen, die dazugehörige Sicherheitsfunktion sowie eine wesentliche Information, die das Endlagersystem betrifft (zum Beispiel Wirtsgestein oder Endlagerkonzept), in ein geeignetes Tabellenkalkulations- oder Datenbankprogramm<sup>4</sup> übertragen werden.

---

<sup>4</sup> Im konkreten Beispiel wird an dieser Stelle die Datenbanksoftware Microsoft Access genutzt.

Um die Korrelation anhand einer solchen Pivot-Tabelle zu zeigen, sei beispielhaft an dieser Stelle angenommen, dass die Daten eines Beispieldatensatzes, der in Tab. 3.14 (bzw. Anhang B) in einem entsprechenden Programm zu Verfügung stehen.

**Tab. 3.14** Auszug des Beispieldatensatzes von 25 (Wirtsgestein Z) bzw. 30 (Wirtsgestein X) Sicherheitsfunktionen mit Bewertung

Sicherheitsfunktion	Relevanz	Robustheit	Wirtsgestein
Sicherheitsfunktion 1	A	A	Z
Sicherheitsfunktion 2	A	B	Z
...			Z
Sicherheitsfunktion 24	E	D	Z
Sicherheitsfunktion 25	E	E	Z
Sicherheitsfunktion 1	C	E	X
Sicherheitsfunktion 2	C	B	X
...			X
Sicherheitsfunktion 29	B	D	X
Sicherheitsfunktion 30	B	A	X

Für den zu ändernden Verfahrensschritt 6 wird folgende Vorgehensweise vorgeschlagen: Analog zur grafischen Darstellung in Tab. 3.12 wird in einer Pivot-Tabelle die Robustheit von Sicherheitsfunktionen in jeder Reihe sortiert aufgetragen (siehe Tab. 3.15). Dabei sollen an oberster Stelle die Ränge mit der niedrigsten Robustheit stehen. In jeder Spalte wird die Relevanz der Sicherheitsfunktion sortiert aufgetragen, so dass die höchsten Relevanzwerte auf der linken Seite stehen. In die sich ergebenden Felder wird die komponentenspezifische Sicherheitsfunktion (Nummer oder Name der Komponente und der Sicherheitsfunktion) eingetragen. Im Ergebnis stehen in der Pivot-Tabelle dann nicht nur die Robustheits-/Relevanz-Korrelation einer Sicherheitsfunktion, sondern diejenigen aller vorhandenen Sicherheitsfunktionen auf einem Blick. Ein Vorteil dieser Darstellung ist, dass die Konstellationen, die auf potenzielle Robustheitsdefizite hinweisen, bereits sortiert vorliegen. In der linken oberen Ecke der Pivot-Tabelle befindet sich die Sicherheitsfunktion mit dem höchsten potentiellen Robustheitsdefizit, also mit einer sehr hohen Relevanz und einer sehr geringen Robustheit<sup>5</sup>. Nach VerSi I zeigen die rot markierten Bereiche in Tab. 3.15 potenzielle Robustheitsdefizite auf, die weiter analysiert werden sollten.

**Tab. 3.15** Pivot-Tabelle zur Ableitung von Robustheitsdefiziten (aus dem Beispieldatensatz) für ein Wirtsgestein

Wirtsgestein Z		Relevanz				
		A	B	C	D	E
Robustheit	E	5	10	15	20	25
	D	4	9	14	19	24
	C	3	8	13	18	23
	B	2	7	12	17	22
	A	1	6	11	16	21

Die Einträge in den Feldern entsprechen den Nummern der Sicherheitsfunktionen aus Tab. 3.14

<sup>5</sup> Bei Durchführung der Methode für einen realen Fall wäre es ungewöhnlich, sollte sich in diesem Feld tatsächlich eine Sicherheitsfunktion befinden. Dies würde für ein erheblich defizitäres Sicherheitskonzept sprechen.

### 3.3.3.4 Gegenüberstellung der Wirtsgesteine und/oder der Endlagerkonzepte

#### VerSi I

Im Rahmen der Abwägungsmethode, wie sie in VerSi I entwickelt wurde, würde an dieser Stelle in tabellarischer Form die Korrelation der Sicherheitsfunktionen für die unterschiedlichen Wirtsgesteine gegenübergestellt. Dies ist in Tab. 3.16 dargestellt.

**Tab. 3.16** Ergebnistabelle Relevanz/Robustheit der Sicherheitsfunktionen (SF) und deren Korrelation (geändert nach /FIS 10/) für verschiedene Wirtsgesteine aus VerSi I

SF Nr.	Relevanz der Sicherheitsfunktion				Robustheit der Sicherheitsfunktion				Korrelation Robustheit/Relevanz			
	< 10 ka		> 10 ka		< 10 ka		> 10 ka		< 10 ka		> 10 ka	
	Tonstein	Salz	Tonstein	Salz	Tonstein	Salz	Tonstein	Salz	Tonstein	Salz	Tonstein	Salz
11	5	2	1	1	4	4	1	1	-1	2	0	0
12	2	1	1	1	4	1	1	1	1	0	0	0
13	2	1	1	1	3	1	1	1	1	0	0	0

#### VerSi II

Durch den Wegfall der Korrelationsmatrix einer einzelnen Sicherheitsfunktion ist auch eine Darstellung analog Tab. 3.16 nun nicht mehr möglich. Dies ist erwünscht, weil die Gegenüberstellung der Wirtsgesteine der Tab. 3.16 zu einem wirtsgesteinsübergreifenden Vergleich von identischen Sicherheitsfunktionen verleitet. Sicherheitsfunktionen und Komponenten für unterschiedliche Wirtsgesteine sollten nicht miteinander verglichen werden, weil auf der Ebene gleichnamiger Sicherheitsfunktionen oder Komponenten meist keine wirtsgesteinsübergreifende Vergleichbarkeit gegeben ist.

Die im Vorhaben VerSi II vorgestellte Pivot-Tabelle ordnet die Wirtsgesteine nicht nach Sicherheitsfunktionen, sondern nach Relevanz-Robustheits-Kombinationen (z. B. „Relevanz A/Robustheit E“; siehe Tab. 3.17). Hierdurch ist auf den ersten Blick erkennbar,



welches Endlagersystem bei seinen relevantesten Sicherheitsfunktionen die größten Defizite besitzt, eine Information, die im Zusammenspiel mit weiteren Argumenten bei der Standortauswahl entscheidungsführend sein kann. Gleichzeitig zeigt die Ordnung nach Relevanz-Robustheits-Kombinationen die strukturellen Unterschiede der verschiedenen Endlagersystem auf, d. h. es wird sichtbar, auf welchen Sicherheitsfunktionen das jeweilige System maßgeblich beruht, um einen sicheren Einschluss zu erzielen. Dies fördert das grundsätzliche Verständnis der betreffenden Endlagersysteme.

In Tab. 3.17 ist beispielsweise zu erkennen, dass die Sicherheitsfunktionen Nr. 5 für das Wirtsgestein „Z“ und Nr. 16 für das Wirtsgestein „X“ das maximal mögliche Robustheitsdefizit zeigen. Diese Darstellungsweise ermöglicht es also, sowohl Schwachstellen als auch Stärken von Endlagersystemen in unterschiedlichen Wirtsgesteinen auf einen Blick zu erkennen und zu vergleichen. (siehe hierzu auch das folgende Kapitel 3.3.4.)

**Tab. 3.17** Pivot-Tabelle zum Vergleich von Robustheitsdefiziten (aus dem Beispieldatensatz) für verschiedene Wirtsgesteine (SF = komponentenspezifische Sicherheitsfunktion und WG = Wirtsgestein)

		Relevanz									
		A		B		C		D		E	
		SF	WG	SF	WG	SF	WG	SF	WG	SF	WG
Robustheit	E	5	Z	10	Z	15	Z	20	Z	25	Z
		16	X	21	X	1	X	6	X	11	X
				26	X						
	D	4	Z	9	Z	14	Z	19	Z	24	Z
		19	X	24	X	4	X	9	X	14	X
				29	X						
	C	3	Z	8	Z	13	Z	18	Z	23	Z
		18	X	23	X	3	X	8	X	13	X
				28	X						
	B	2	Z	7	Z	12	Z	17	Z	22	Z
		17	X	22	X	2	X	7	X	12	X
				27	X						
	A	1	Z	6	Z	11	Z	16	Z	21	Z
		20	X	25	X	5	X	10	X	15	X
				30	X						

Im Gegensatz zum VerSi-I-Verfahren ist es nicht mehr erforderlich, dass bei den zu vergleichenden Endlagersystemen die Art und Anzahl von Sicherheitsfunktionen auf allen Seiten identisch ist, da, wie beschrieben, eine starre Ordnung der Bewertungsergebnisse nach Sicherheitsfunktionen entfällt. Somit kann der Satz an Sicherheitsfunktionen für jedes Endlagersystem individuell gestaltet und in der Pivot-Tabelle dargestellt werden (siehe Tab. 3.17, Spalte Relevanz B und Reihe Robustheit E für das Wirtsgestein X).

### 3.3.4 Weitere Möglichkeiten der datenbankgestützten Analyse

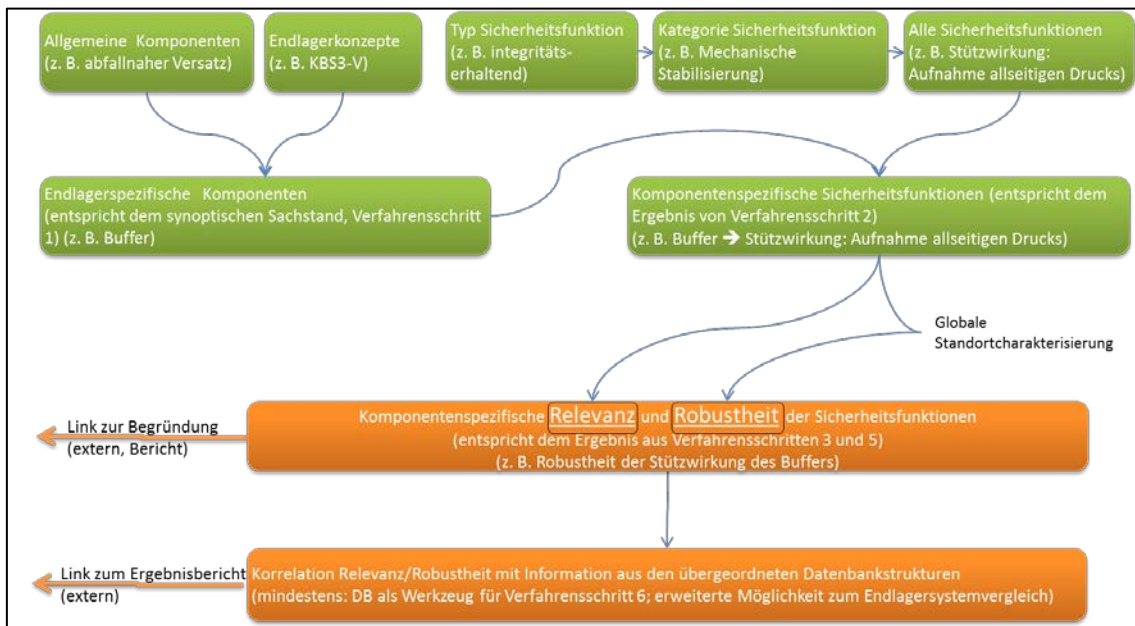
Die im vorherigen Kapitel dargestellte Datenorganisation zur Erstellung einer Pivot-Tabelle lässt sich um zusätzliche Informationen erweitern, so dass eine Datenbank entsteht, die sich nicht nur zur Identifikation von Robustheitsdefiziten eignet, sondern weitere Funktionalitäten bietet, die für die Analyse der betreffenden Endlagersysteme genutzt werden können. Beispielsweise könnten durch das Einpflegen der Wirkungszeiträume der Barrieren in die Datenbank Übersichten erstellt werden, welche die lang- und kurzwirkenden Barrieren eines Endlagersystems darstellen. Dadurch entsteht ein Werkzeug, das dabei hilft, Aufbau und Wirkungsweise eines Sicherheitskonzeptes genauer zu verstehen.

In Abb. 3.19 ist exemplarisch dargestellt, wie der Inhalt einer Datenbank, der deutlich umfassender ist, als die einfache Wichtung und Korrelation aus Kap. 3.3.3., strukturiert sein könnte. Dabei sind Inhalte der Datenbank, die nach /FIS 10/ der indikativen/objektiven Sachstandsebene entsprechen, in grüner Farbe, und die Inhalte der normativen/subjektiven Bewertungsebene in oranger Farbe gekennzeichnet. Der Unterschied ist für die Datenbank relevant, da Inhalte der objektiven Ebene nicht veränderbar sein sollten, während Inhalte der subjektiven Ebene von der subjektiven Einschätzung des Anwenders/Bearbeiters abhängen (dies ist z. B. die Bewertung der Robustheit/Relevanz). Diese Unterscheidung ist für einen tatsächlichen Einsatz einer solchen Datenbank wichtig, da mehrere voneinander unabhängige Gruppen (z. B. verschiedene Stakeholder) die Datenbank nutzen können. Basierend auf dem unveränderbaren Teil der indikativen/objektiven Ebene können diese Gruppen dann zu unabhängigen subjektiven Bewertungen kommen.

Die vorgeschlagene Struktur der Datenbank orientiert sich dabei eng an die hier vorgeschlagene modifizierte Version der Abwägungsmethode. Beispielsweise entspricht das Feld „Allgemeine Komponenten“ in Abb. 3.19 der vorgestellten Modifikation des VerSi-Komponentenmodells aus Kap. 3.3.1. Die Pfeile bedeuten, dass ein untergeordnetes Feld mindestens aus den Inhalten der übergeordneten Felder besteht.

In einem weiteren Beispiel kann der „Buffer“ in einer Tabelle „Endlagerspezifische Komponenten“ zahlreiche Eigenschaften haben, die auch in der Datenbank niedergelegt sein könnten. Um Endlagersysteme vergleichbar zu machen ist es notwendig, mindestens einige Eigenschaften zu vergeben. Für den Buffer bedeutet dies, dass er

mindestens einer allgemeinen Komponenten (in diesem Kontext „abfallnaher Versatz“) sowie einem Endlagerkonzept (in diesem Beispiel „KBS-3“) zugeordnet werden muss.



**Abb. 3.19** Beispielhafte Struktur einer Datenbank mit relevanten Informationen zum Endlagersystemvergleich auf Basis der Abwägungsmethode (in grün: objektive Inhalte, in orange: subjektive Inhalte)

Gleiches gilt für die Sicherheitsfunktionen: Jede Sicherheitsfunktion im Feld „Alle Sicherheitsfunktionen“ in Abb. 3.19 lässt sich einer Kategorie und diese wiederum einem Typ zuordnen. Im Feld „Komponentenspezifische Sicherheitsfunktionen“ finden sich schließlich die Informationen, die insgesamt wichtige Eigenschaften des Endlagersystems beschreiben, nämlich mindestens die mit jeder Komponente assoziierten Sicherheitsfunktionen. Für einen auf jeder Ebene umfassenden Informationsgehalt wäre es wichtig, dass in der dargestellten Datenbankstruktur übergeordnete Informationen vererbbar und miteinander verbunden sind. Beispielsweise sollte es nicht möglich sein im Feld „Komponentenspezifische Sicherheitsfunktionen“ dem „Buffer“ das Endlagerkonzept eines Salzstandortes zuzuordnen.

Innerhalb der orangefarbenen Felder kommt zum Endlagersystem keine neue Information hinzu. An der Stelle soll lediglich die Bewertung und Korrelation stattfinden, die je nach verabredeter ordinaler Skala stattfinden kann.

Die vorgestellte Struktur einer solchen Datenbank ist ein Vorschlag. Auf Basis dieses Vorschlags wurde ein Beispieldatensatz (keine einsatzfähige Datenbank) erstellt, dessen erweiterter Inhalt dem letzten Feld in Abb. 3.19 entspricht (siehe Tab. 3.18).

**Tab. 3.18** Auszug des Beispieldatensatzes von 25 (Wirtsgestein Z) bzw. 30 (Wirtsgestein X) Sicherheitsfunktionen mit Bewertung und ergänzenden Informationen

SF	Komponenten	Relevanz	Robustheit	Wirkungsphase	Typ SF	Kategorie SF	Endlagerkonzept	WG
1	Canister	A	A	lang	ISF	MS	1	Z
2	Canister	A	B	lang	RSF	PS	1	Z
...								
24	Buffer	E	D	kurz	RSF	VG	1	Z
25	Einlagerungsbereich	E	E	kurz	ISF	DW	1	Z
1	ewG	C	E	lang	ISF	MS	2	X
2	ewG	C	B	lang	RSF	PS	2	X
...								
29	Ver-satzma-terial 2	B	D	kurz	RSF	MS	2	X
30	Ver-satzma-terial 2	B	A	kurz	ISF	PS	2	X

Auf Basis dieses Datensatzes kann beispielhaft gezeigt werden, in welcher Weise Eigenschaften unterschiedlicher Endlagersysteme analysiert und miteinander verglichen werden können. Bereits im Vorhaben VerSi I wurde auf die unterschiedlichen Wirkungsphasen von Barrieren eingegangen, es wurden dementsprechend zwei Zeiträume unterschieden. Im Beispieldatensatz wurden diese Wirkungsphasen vereinfacht „kurz“ und „lang“ genannt. Es ist nun möglich einfach nachzuvollziehen, welche Barrieren (bzw. Komponenten) in den beiden Endlagersystemen zu welchen Zeiträumen wirken, einfach in dem man Reihen und Spalten in der Pivot-Tabelle sinnvoll wählt. Dies ist in Tab. 3.19 dargestellt. Die Datenbank kann in diesem Beispiel als einfaches und schnelles Nachschlagewerk verstanden werden.

**Tab. 3.19** Pivot-Tabelle zum systemübergreifenden Vergleich der Wirkungsphasen von Barrieren für den Beispieldatensatz (gekürzt)

	Wirkungsphase			
	kurz		lang	
Endlagerkonzept	Komponenten	SF	Komponenten	SF
1	Buffer	13-24	Canister	1-12
	Einlagerungsbereich	25		
2	Abdichtbauwerk	13-24	ewG	1-4
	Versatzmaterial 2	25-30	Versatzmaterial 1	5-12

In Kombination mit der Bewertung der Sicherheitsfunktionen (siehe Kap. 3.3.3) kann so auch dargestellt werden, welche anderen Eigenschaften das Endlagersystem auszeichnen. Beispielsweise zeigt sich im Beispieldatensatz für das Endlagerkonzept 1, dass die Sicherheitsfunktionen mit geringem Wirkungszeitraum tendenziell eine geringe Relevanz besitzen (siehe Tab. 3.20).

**Tab. 3.20** Pivot-Tabelle zur Relevanz und Robustheit der Wirkungsphasen von Sicherheitsfunktionen des Beispieldatensatzes

Endlagerkonzept 1	Relevanz				
	A	B	C	D	E
Robustheit	Wirkungsphase	Wirkungsphase	Wirkungsphase	Wirkungsphase	Wirkungsphase
E	lang	lang	Kurz	kurz	kurz
D	lang	lang	Kurz	kurz	kurz
C	lang	lang	Kurz	kurz	kurz
B	lang	lang	Lang	kurz	kurz
A	lang	lang	Lang	kurz	kurz

Die Anzahl der Beispiele lässt sich beliebig erweitern und ist davon abhängig, welche Informationen zu Komponenten und Sicherheitsfunktionen in der Datenbank hinterlegt sind. Eine weiterführende Betrachtung an einem konkreten Beispiel durchzuführen wäre der nächste Schritt, würde jedoch an dieser Stelle den vorgesehenen Rahmen des Vorhabens VerSi II sprengen.

### 3.3.5 Robustheitsvergleich für Endlagersysteme

#### Notwendigkeit eines Vergleichs auf Ebene des Gesamtsystems

Die derzeitige Abwägungsmethode ist für den Vergleich genehmigungsfähiger Endlager konzipiert, deren „Auslegungsanforderungen an die Barrieren der zu vergleichenden Endlagersysteme ungefähr die gleiche ‚Strenge‘ aufweisen“ (/FIS 10/, S. 17). Die Forderung nach „gleicher Strenge“ zielt auf einen „gerechten“ Endlagervergleich ab, denn ohne sie würde „ein Endlagersystem, an welches extrem strikte (ggf. übertriebene) Anforderungen gestellt werden, [...] im Vergleich trotz ggf. höherer Robustheit einem anderen Endlagersystem mit weniger strengen (angemessenen) Auslegungsanforderungen unterliegen“ /FIS 10/.

Die derzeitige Abwägungsmethode VerSi I will und kann Unterschiede in der Gesamt-Robustheit von Endlagersystemen (oder in der Strenge ihrer Auslegungsanforderungen) nicht sichtbar machen. Dass sie dazu nicht in der Lage ist, liegt einerseits daran, dass das Verfahren die Robustheit *nicht relativ zu anderen Endlagersystemen* bewertet, sondern *relativ zur eigenen Auslegung* (im Sinne einer Wahrscheinlichkeit, dass die relevanten Barrieren ihre Sicherheitsfunktion gemäß Auslegung erfüllen).

Darüber hinaus bewertet die Abwägungsmethode nur die Robustheit der Sicherheitsfunktionen einzelner Endlagerkomponenten und nicht die Robustheit des gesamten Endlagersystems. Robustheitsmerkmale *des Endlagersystems* (z. B. der Grad der Redundanzen oder die Verwendung diversitärer Komponenten) finden in der Abwägungsmethode keinen Eingang<sup>6</sup>.

Dies lässt sich am Beispiel eines Endlagersystems nachvollziehen, bei dem eine geringpermeable Überdeckung als Endlagerkomponente mit rückhaltender Sicherheitsfunktion definiert wird, obwohl die gering permeable Überdeckung im Sicherheitskonzept nicht belastet wird. Der infolge der Existenz dieser Komponente möglicherweise bestehende Robustheitsgewinn würde im bisherigen Abwägungsverfahren niemals zu

---

<sup>6</sup> Auch die Verfahrensschritte 5c und 5d (S. 66 ff), welche sich mit der Systemrobustheit beschäftigen, vermögen dies nicht zu tun: In Verfahrensschritt 5c wird die Systemrobustheit lediglich zur Bewertung der Robustheit einzelner Sicherheitsfunktionen herangezogen. Sie wird jedoch nicht selbst gewertet. In Verfahrensschritt 5d findet zwar eine „Gesamtbewertung“ statt, diese bezieht sich jedoch nicht auf die Gesamtheit des Endlagersystems, sondern auf die Gesamtheit der Robustheitskriterien einer einzelnen Sicherheitsfunktion.

einer Aufwertung des Endlagersystems gegenüber einem ansonsten gleichen Endlagersystem *ohne* geringpermeable Überdeckung führen.

Dennoch können *zwischen Endlagersystemen* Robustheitsunterschiede (oder andere qualitative Unterschiede) existieren, die für die Standortauswahl als relevant erachtet werden. Beispielsweise könnte man zu der Ansicht gelangen, dass ein Endlagersystem mit Tonüberdeckung einem ansonsten gleichartigen Endlagersystem ohne Tonüberdeckung aufgrund der Diversität der Barrieren vorzuziehen sei. Diese Ansicht ist nicht zwingend<sup>7</sup>, aber sie ist möglich, und daher sollte die Abwägungsmethode in der Lage sein, qualitative Unterschiede auch auf der Ebene des Gesamtsystems zu berücksichtigen, was derzeit noch nicht der Fall ist.

### **Robustheit als Bewertungsgröße**

Dem bisherigen Verständnis der VerSi-Abwägungsmethode folgend können sich qualitative Unterschiede zwischen Endlagersystemen niemals auf die *Sicherheit* des Endlagers beziehen. Das liegt daran, dass Endlagerstandorte, welche die Zulassung für das Auswahlverfahren erhalten haben, (entsprechend dem vorliegenden Kenntnisstand) potenziell genehmigungsfähig und damit im regulatorischen Sinne sicher sind. Ein „sicherer als sicher“ ist im regulatorischen Kontext nicht definiert. Im Einklang damit bewertet die VerSi-Methode also nicht die *Sicherheit* eines Endlagersystems, sondern die *Robustheit* seiner Barrieren bzw. die *Robustheit* ihrer Sicherheitsfunktionen. Auch wenn ein Endlager mit robusteren Barrieren bzw. Sicherheitsfunktionen im allgemeinen Sprachgebrauch „sicherer“ erscheint, wird eine solche Bezeichnung mit Rücksicht auf den regulatorischen Kontext durch die VerSi-Methode vermieden. Das VerSi-Verfahren bewertet demnach die Robustheit eines (durch seine prinzipielle Genehmigungsfähigkeit) voraussichtlich sicheren Endlagersystems, oder genauer gesagt, die Robustheit der Sicherheitsfunktionen seiner Komponenten.

---

<sup>7</sup> Eine Tonüberdeckung könnte einerseits als nicht zu wertende Sicherheitsreserve angesehen werden, da das System ja auch ohne Tonüberdeckung sicher ist. Andererseits könnte ein Endlagersystem mit Tonüberdeckung als robuster eingestuft werden.



## **Erweiterung der Abwägungsmethode für systemische Robustheitsmerkmale**

Endlagersysteme können Merkmale aufweisen, die bei einem Standortvergleich auf eine höhere Robustheit des einen oder anderen Endlagersystems schließen lassen. Solche Merkmale werden im Folgenden „systemische Robustheitsmerkmale“ genannt, weil sie sich nicht einzelnen Komponenten oder Sicherheitsfunktionen zuordnen lassen, sondern die Endlagersysteme in ihrer Gesamtheit betreffen.

Systemische Robustheitsmerkmale können außerhalb des Sicherheitskonzeptes vorliegen, etwa in Form von Sicherheitsreserven, die nicht im Sicherheitskonzept belastet werden. Dies könnte zum Beispiel eine geringpermeable Überdeckung sein, die nicht als Endlagerkomponente definiert wurde. Systemische Robustheitsmerkmale können aber auch aus dem Sicherheitskonzept selbst resultieren, zum Beispiel durch die Redundanz oder Diversität der vorgesehenen Barrieren.

Systemische Robustheitsmerkmale sollen nicht innerhalb der Robustheitsbewertung der bisherigen Abwägungsmethode bewertet werden, da diese sich nur mit der Robustheit einzelner Sicherheitsfunktionen beschäftigt. Zwar wäre eine wie auch immer geartete Wertung der systemischen Robustheitsmerkmale im Rahmen der bisherigen Robustheitsbewertung von Sicherheitsfunktionen möglich, aber sie wäre inhaltlich inadäquat: Die Robustheit des Gesamtsystems sollte als solche kenntlich bleiben und nicht versteckt als Robustheit einer Sicherheitsfunktion ausgewiesen werden.

Die Abwägungsmethode sollte dahingehend erweitert werden, dass systemische Robustheitsmerkmale eines Endlagersystems im synoptischen Sachstandsbericht dargestellt werden. In einem zusätzlichen, verbal-argumentativen Verfahrensschritt können dann die systemischen Robustheitsmerkmale der Endlagersysteme in den Standortvergleich einfließen.

Systemische Robustheitsmerkmale zeigen nicht die Gesamtrobustheit eines Endlagersystems an, sondern stellen einen Robustheits-„Bonus“ dar, der einem Endlagersystem jenseits der Robustheitsbewertung der Abwägungsmethode gewährt wird. Dieser Bonus kann bei einem Standortvergleich jedoch nur dann bewertet werden, wenn die zu vergleichenden Endlagersysteme weitgehend ähnlich sind, so dass man von einer gleichartigen Systemrobustheit ausgehen kann. Dies ist bei einem Vergleich von so unterschiedlichen Wirtsgesteinen wie Tonstein und Steinsalz nicht möglich. Wegen der Unterschiedlichkeit der Sicherheitskonzepte ist auch über das Verhältnis der Sys-

temrobustheiten nichts bekannt. Insofern ist es hier nicht möglich, Robustheitsboni sinnvoll in die Bewertung einzubeziehen.

Die Konsequenz ist, dass systemische Robustheitsmerkmale von Endlagersystemen beim Standortvergleich nur in Ausnahmefällen relevant werden dürften, da sie nur bei weitgehend ähnlichen Endlagersystemen bewertbar sind. Ein solcher Ausnahmefall wäre zum Beispiel gegeben, wenn zwei Endlagersysteme und Sicherheitskonzepte sich kaum unterscheiden, aber eines der Systeme eine geringpermeable Überdeckung besitzt.

### **3.4 Identifikation, Klassifizierung und Relevanzwichtung der Sicherheitsfunktionen**

Im Vorhaben VerSi I /FIS 10/ wurden Sicherheitsfunktionen für Komponenten für Endlagerkonzepte in den Wirtsgesteinen Steinsalz und Tonstein ausgewiesen. Im Vorhaben VerSi II soll diese Liste durch zusätzliche mögliche Sicherheitsfunktionen aus dem schwedischen KBS-3-Konzept ergänzt werden. Im Kap. 3.4.1 werden zunächst die Sicherheitsfunktionen des KBS-3-Konzeptes beschrieben. Danach erfolgt im Kap. 3.4.2 eine Anpassung bzw. Erweiterung der Sicherheitsfunktionsliste basierend auf VerSi I mit Ergänzungen des KBS-3-Konzeptes.

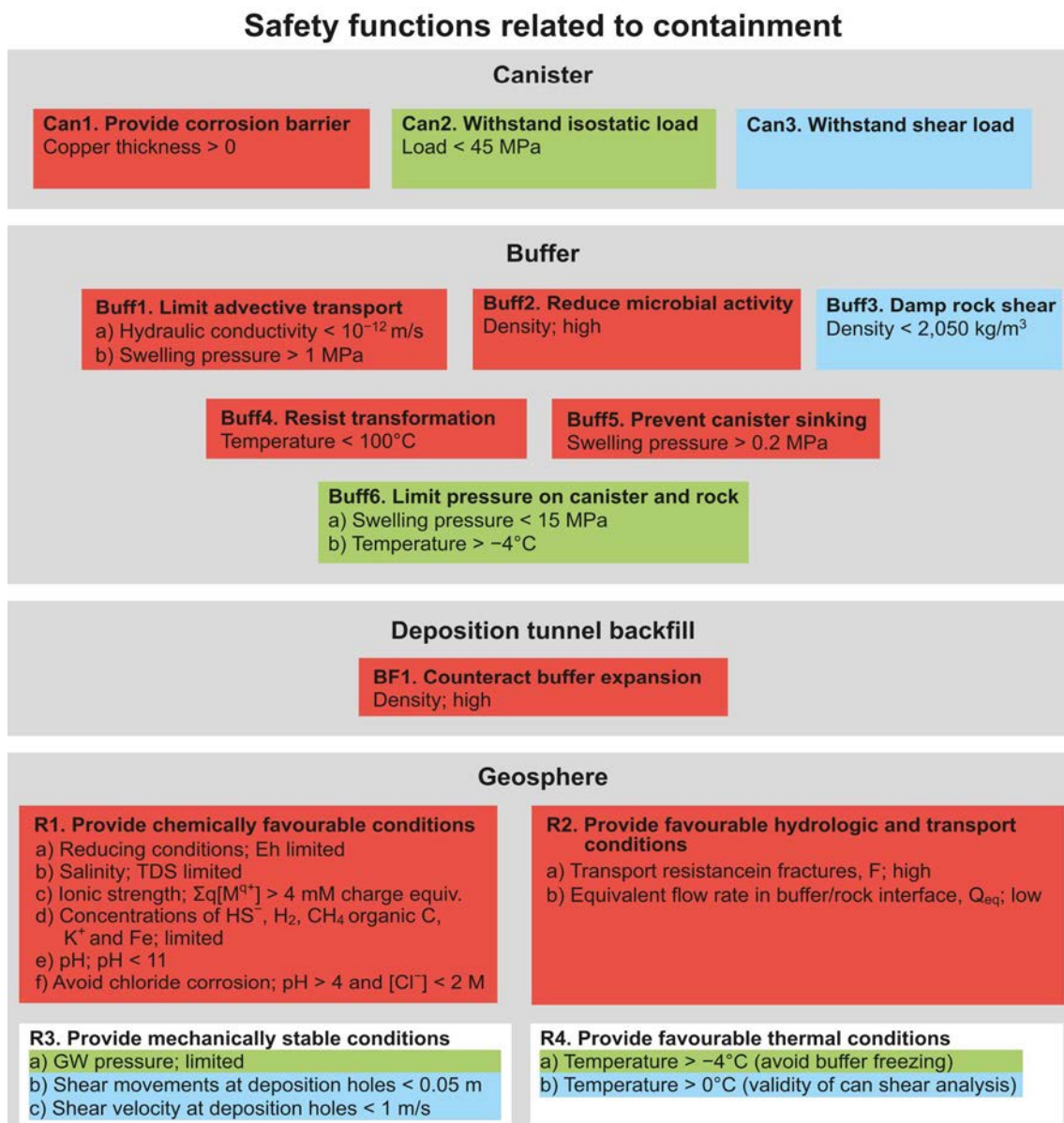
#### **3.4.1 Sicherheitsfunktionen des KBS-3-Konzeptes**

In /SKB 11a/ werden die Sicherheitsfunktionen in einschlusswirksame (containment) Sicherheitsfunktionen (Abb. 3.20) und rückhaltende (retardation) Sicherheitsfunktionen (Abb. 3.21) eingeteilt. Es wird davon ausgegangen, dass die rückhaltenden Sicherheitsfunktionen (nicht zu verwechseln mit den gleichnamigen RSF, die in VerSi betrachtet werden) erst wirksam werden, wenn ein oder mehrere Behälter ausfallen.

Einige Sicherheitsfunktionen in /SKB 11a/ werden beiden Kategorien zugeordnet. Zum Beispiel werden die Sicherheitsfunktionen 1 - 5 für den Buffer in beiden Kategorien aufgeführt (siehe Abb. 3.20 und Abb. 3.21). In den folgenden Kapiteln werden die komponenten-spezifischen Sicherheitsfunktionen näher beschrieben (für weitere Informationen siehe auch /BEU 16/)

### 3.4.1.1 Einschusswirksame Sicherheitsfunktionen

Im Folgenden werden die einschusswirksamen Sicherheitsfunktionen aus /SKB 11a/, welche in der Abb. 3.20 zusammengefasst sind, beschrieben. Die Sicherheitsfunktionen werden den einzelnen Komponenten zugewiesen, nämlich dem Behälter („canister“), dem Buffer und dem Versatz der Bohrlochüberfahrungsstrecke („deposition tunnel backfill“). Die Sicherheitsfunktionen der Geosphäre („geosphere“) werden gesondert im Kap. 3.4.1.3 behandelt.



**Abb. 3.20** Sicherheitsfunktionen des KBS-3-Konzeptes bezogen auf den Einschuss der Radionuklide /SKB 11a/

## Behälter („canister“)

Die Behälterintegrität wird nach /SKB 11a/ durch zwei wesentliche Beanspruchungen bzw. Prozesse beeinflusst. Zum einen durch mechanische Belastungen und zum anderen durch korrosiven Lösungsangriff.

Die Behälterintegrität kann durch korrosive Lösungen beeinflusst werden. In /SKB 11a/ wird die Sicherheitsfunktion **Can1** „provide corrosion barrier“ ausgewiesen. Die Forderung an die Behälterintegrität ist, dass die Dicke der Kupferschicht  $d_{min}^{Cu}$  immer größer null ist.

Für den Behälter werden zwei weitere Sicherheitsfunktionen ausgewiesen, die den mechanischen Schutz der Behälter gewährleisten sollen. Der Behälter muss gegen zu hohe isostatische Drücke (**Can2**: „withstand isostatic load“) ausgelegt sein. Die maximalen Drücke, welche auf die Behälter wirken, dürfen im KBS-3-Konzept 45 MPa nicht überschreiten. Zudem muss der Behälter einen ausreichenden Widerstand gegen Scherspannungen (**Can3**: „withstand shear load“) aufweisen. Die Kupferbehälter sind für einen maximalen Scherversatz von 5 cm, bei einer Schergeschwindigkeit von 1 m/s, ausgelegt.

## Buffer („buffer“)

Da der Buffer den Behälter schützen soll, muss der Buffer gewisse Eigenschaften erfüllen, damit die Kriterien für die Einhaltung der Sicherheitsfunktionen der Behälter erfüllt sind. Zudem ist das chemische Milieu im Nahfeld der Behälter bzw. in der Geosphäre wichtig für viele Prozesse (siehe Kap. 3.4.1.3). Die Behälterintegrität kann somit nur im Verbund mit den umgebenden Komponenten, insbesondere des Buffers, sichergestellt werden.

Die Hauptaufgabe des Buffers besteht in der Reduzierung des Lösungstransportes zum Endlagerbehälter (Sicherheitsfunktion **Buff1**: „limit advective transport“). Die hydraulische Durchlässigkeit des Buffers ist stark abhängig von seiner Dichte, der absorbierten Ionenspezies und der Ionenstärke des umgebenden Grundwassers. Die hydraulische Durchlässigkeit (Anforderung Buff1a: „hydraulic conductivity“) muss kleiner sein als  $10^{-12}$  m/s.

Zudem wird die „Dichtwirkung“ des Buffers durch dessen Selbstabdichtung durch Quellen bei Aufsättigung mit Lösung erreicht (Anforderung Buff1b: „swelling pressure“). Somit soll ein Formschluss sowohl mit dem Behälter als auch mit dem umgebenden Wirtsgestein erreicht werden. Um dies zu gewährleisten, muss der Buffer einen Quelldruck von  $> 1$  MPa entwickeln.

An die Umgebung des Buffers (Geosphere s. Abb. 3.20) werden in /SKB 11a/ Anforderungen gestellt, welche ein günstiges geochemisches Milieu um den Behälter gewährleisten sollen. Hierfür sollen die Inhaltsstoffe, die zur Korrosion des Kupferbehälters beitragen, minimiert werden. Vor allem Pyrit, welcher, wenn er oxidiert wird, korrodierendes Sulfid produziert, sollte so gering wie möglich im Buffer enthalten sein. Der Sulfidgehalt soll einen Wert von 0,5 Gew.-% nicht überschreiten. Dies würde einem Pyritgehalt von 1 Gew.-% entsprechen.

Die Sicherheitsfunktion **Buff2** „reduce microbial activity“ soll eine geringe mikrobielle Aktivität im Buffer gewährleisten. Sulfat reduzierende Bakterien produzieren Sulfid, welches zur Korrosion des Kupferbehälters beiträgt. Diese Bakterien sind initial im Bentonit enthalten. Da die Sulfatkonzentration der zutretenden Wässer nicht kontrolliert werden kann, muss die Aktivität der Mikroben innerhalb des Buffers reduziert werden. Versuche haben gezeigt, dass die Aktivität der Mikroben umso geringer ist, je höher die Dichte des Buffers ist.

Der Buffer soll den Abfallbehälter vor geomechanischen Einflüssen, insbesondere vor Scherbewegungen von Klüften schützen. Die Sicherheitsfunktion, welche diese Anforderungen stellt, ist **Buff3** „damp rock shear movements“. Die Scherfestigkeit des Buffers darf die Festigkeit nicht überschreiten, die bei der Überprüfung der Robustheit des Behälters gegen Scherbelastungen verwendet wird. Diese Bedingungen gelten für Temperaturbereich von  $-4$  bis  $100$  °C und eine Dichte von  $2.050$  kg/m<sup>3</sup>.

Die Sicherheitsfunktion **Buff4** „resist transformations“ legt die maximale Temperatur im Buffer fest. Laut Sicherheitsfunktion darf eine Temperatur von  $100$  °C nicht überschritten werden, damit keine Mineralumwandlungen im Buffer stattfinden, die sich negativ auf die sicherheitsrelevanten Eigenschaften (z. B. Sorptionsfähigkeit) auswirken.

Der Quelldruck des Buffers soll den Abfallbehälter im Einlagerungsbohrloch fixieren, damit dieser nicht absinkt und direkten Kontakt zum Wirtsgestein oder der Betonplatte am Boden erlangt, was hydraulische Wegsamkeiten zwischen dem Behälter und dem

Wirtsgestein generieren könnte. Die Anforderungen werden durch die Sicherheitsfunktion **Buff5**: „prevent canister sinking“ gestellt. Der Quelldruck muss hierzu größer als 0,2 MPa sein, darf aber die Integrität des Behälters nicht beeinträchtigen.

Die Anforderungen an den maximalen Quelldruck stellt die Sicherheitsfunktion **Buff6** „limit pressure on canister and rock“. Der Quelldruck sollte 15 MPa nicht überschreiten, um keine übermäßige isostatische Druckbelastung auf den Behälter zu erzeugen. Wenn das im Buffer enthaltene Wasser (bei gesättigten Porenraum) gefriert, dehnt sich dieses aus und beschädigt die Materialstruktur des Buffers. Deshalb soll die Temperatur nach Anforderung Buff6b, immer größer -4 °C sein.

Es gelten folgende allgemeine Anforderungen an einen gesättigten Buffer:

- Dichte im Intervall von 1.950 - 2.050 kg/m<sup>3</sup>
- Maximaler Quelldruck des Buffers darf 15 MPa nicht überschreiten
- Ein Montmorillonit-Gehalt von 75 - 90 Gewichtsprozent, bei trockenem Buffermaterial

Allgemein wird ein Quelldruck größer 2 MPa /SKB 11a/ gefordert. Damit wird die Anforderung an den Quelldruck, größer 1 MPa (Buff1b) und größer 0,2 MPa (Buff5) zu sein, erfüllt.

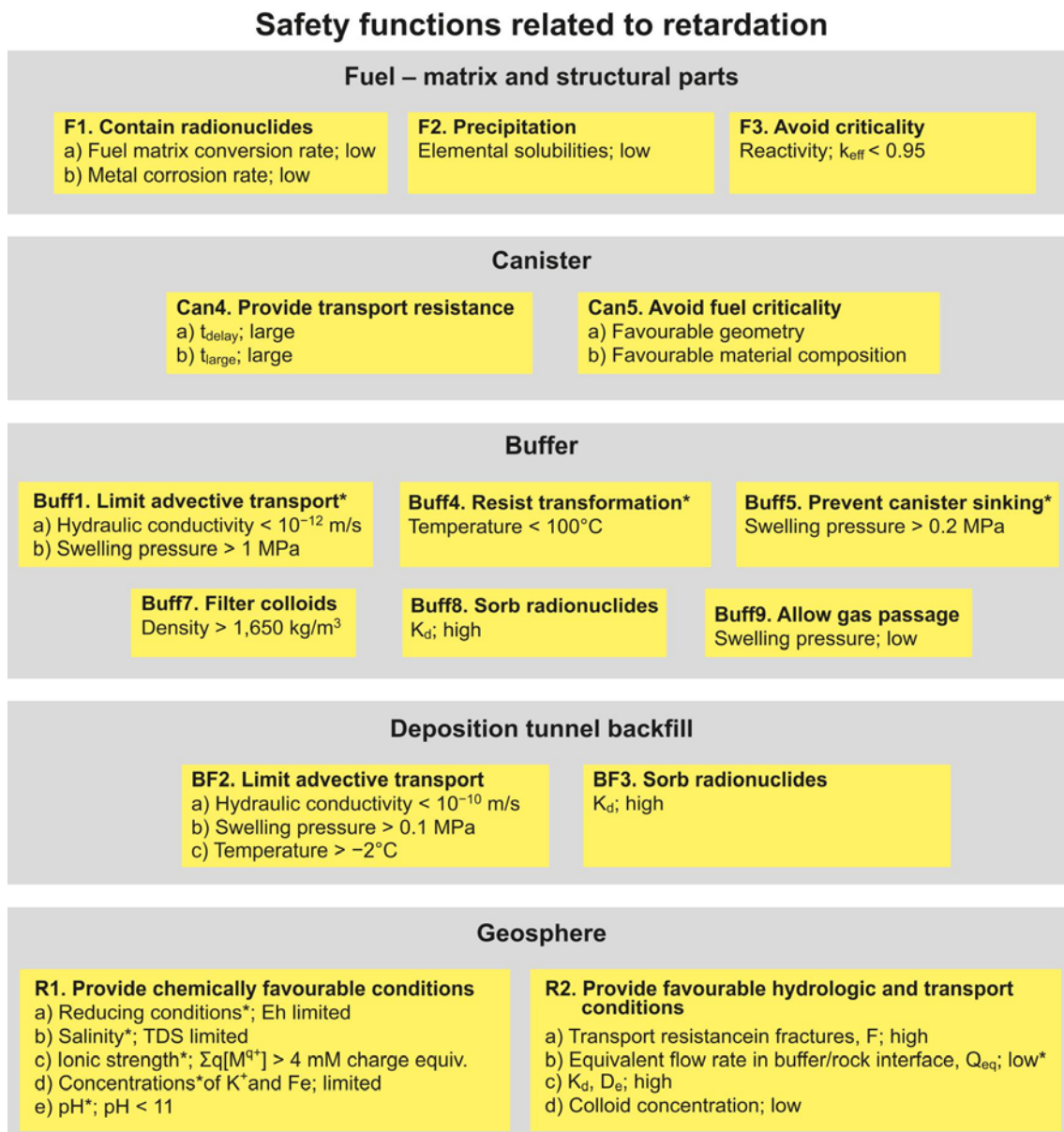
### **Versatz der Bohrlochüberfahrungsstrecke („deposition tunnel backfill“)**

Die Dichte des Versatzes in der Bohrlochüberfahrungsstrecke muss so hoch sein, dass dem Quelldruck des Buffers in den Einlagerungsbohrlöchern entgegengewirkt wird (**BF1** „counteract buffer expansion“). Der Streckenversatz wirkt somit als Widerlager, damit der Buffer nicht nach oben aus dem Einlagerungsbohrloch quillt und sich seine Dichte verringert.

#### **3.4.1.2 Rückhaltende SF**

Im Folgenden werden die rückhaltenden SF aus /SKB 11a/, welche in der Abb. 3.21 zusammengefasst sind, beschrieben. Die Sicherheitsfunktionen werden folgenden Komponenten zugewiesen: Abfall („fuel – matrix and structural parts“), Behälter („canister“), Buffer („buffer“) und Versatz der Bohrlochüberfahrungsstrecke („deposition tunnel

backfill“). Die Sicherheitsfunktionen der Geosphäre („geosphere“) werden gesondert im Kap. 3.4.1.3 behandelt



**Abb. 3.21** Sicherheitsfunktionen des KBS-3-Konzeptes bezogen auf die Rückhaltung der Radionuklide /SKB 11a/

### Abfall (“fuel – matrix and structural parts”)

In /SKB 11a/ wird der Abfallmatrix eine rückhaltende Funktion zugeteilt (**F1** „contain radionuclides“), die durch die Matrixstruktur des Abfalls und die hohe Stabilität unter Endlagerbedingungen begründet wird. Bei einem Kontakt der Abfallmatrix mit Lösung ist die Mobilisierungsrate der Radionuklide bei reduzierenden Bedingungen geringer, so

dass die Gewährleistung reduzierender Bedingungen eine Sicherheitsfunktion der Geosphäre ist (**R1** „provide chemically favourable conditions“). Auch die strukturellen Metallteile der Brennelemente enthalten Radionuklide. Die Korrosionsrate dieser Metalle ist daher auch ein Indikator für die Sicherheitsfunktion **F1** des Abfalls. In /SKB 11a/ werden jedoch keine Angaben gemacht, welche Werte die Mobilisierungsrate bzw. Korrosionsrate aufweisen muss, um als „gering“ zu gelten.

In /SKB 11a/ wird die Sicherheitsfunktion **F2** „precipitation“ ausgewiesen. Diese Funktion bezieht sich auf die Löslichkeit der Radionuklide. Viele der Radionuklide haben eine begrenzte Löslichkeit im Grundwasser, wodurch die Radionuklidfreisetzung nach einem Behälterausfall begrenzt wird. Für reduzierende Bedingungen sind die Löslichkeiten geringer (Sicherheitsfunktion **R1a**).

In /SKB 11a/ wird die Sicherheitsfunktion **F3** „avoid criticality“ ausgewiesen. Die Abfalleigenschaften und die geometrische Anordnung in dem Behälter sollten so sein, dass Kritikalität ausgeschlossen wird, wenn Wasser in einen defekten Behälter eindringt. Die Brennstoffreaktivität sollte niedrig sein und der Multiplikationsfaktor ( $k_{\text{eff}}$ )<sup>8</sup> für den Brennstoff in einem mit Wasser gefüllten Behälter sollte 0,95 einschließlich Ungewissheiten nicht überschreiten. Weiterhin sollte der Behältereinsatz eine günstige Geometrie und Materialzusammensetzung in Bezug auf die Vermeidung von Kritikalität aufweisen. Dies spiegelt sich in geometrischen Einschränkungen bei der Behälterkonstruktion und bei Beschränkungen der Mengen von C und Si im Gusseiseneinsatz wider.

### **Behälter („canister“)**

In /SKB 11a/ wird die Sicherheitsfunktion **Can4** „provide transport resistance“ ausgewiesen. Diese Funktion bezieht sich auf den Radionuklidtransport aus dem Behälter, wenn dieser versagt und Lösung zugetreten ist. Auch nach einem Ausfall kann ein Behälter (z. B. durch Sorption am korrodierten Behältermaterial) über eine begrenzte Zeit zur Radionuklidrückhaltung beitragen. Die Verzögerung nach Ausfall der Behälterinteg-

---

<sup>8</sup> Damit Kritikalität eintritt, muss ein selbst erhaltender Spaltprozess ablaufen. Dies ist der Fall wenn mehr Neutronen produziert als adsorbiert werden. Das Verhältnis der erzeugten Neutronen zu der Summe der Neutronen, die in Spalt- oder Nicht-Spaltreaktionen absorbiert werden, bzw. anderweitig verloren gehen, wird als effektiver Neutronen-Multiplikationsfaktor bezeichnet. Ab einem Verhältnis von 1 tritt Kritikalität ein.



rität bis zur Freisetzung von Radionukliden aus dem Behälter wird als  $t_{\text{delay}}$  (Anforderung Can4a) bezeichnet und der Zeitraum von dem initialen Verlust der Behälterintegrität bis zum Zeitpunkt, wenn der Behälter keinen Transportwiderstand (z. B. durch korrosive Aufweitung der Fehlstellen) mehr aufweist wird als  $t_{\text{large}}$  (Anforderung Can4b) bezeichnet. Beide Zeiträume können als Indikatoren für diese Sicherheitsfunktion verwendet werden.

Die Sicherheitsfunktion **Can5** „avoid fuel criticality“ wird im Vorhaben VerSi I den integritätsbewahrenden Sicherheitsfunktionen zugeordnet. In /SKB 11a/ wird gefordert, dass die Behältergeometrie (Anforderung Can5a) und die Materialzusammensetzung (Anforderung Can5b) so gewählt werden, dass sie nicht zur Kritikalität beitragen. Siehe auch Beschreibung zur Sicherheitsfunktion **F3** unter „Abfall (Fuel – matrix and structural parts)“.

### **Buffer („buffer“)**

Die Sicherheitsfunktionen Buff1-5 wurden bereits im Kap. 3.4.1.1 unter der Komponente „Buffer“ beschrieben.

In /SKB 11a/ wird die Sicherheitsfunktion **Buff7** „filter colloids“ definiert: Als Anforderung soll der Buffer eine Dichte von  $> 1.650 \text{ kg/m}^3$  aufweisen, damit der Transport von Brennstoffkolloiden aus einem defekten Behälter durch den Buffer verhindert wird.

Durch die Sorption von Radionukliden am Buffermaterial (Bentonit) kann der Radionuklidaustrag aus dem Behälter in das Wirtsgestein wesentlich beschränkt bzw. verzögert werden (Sicherheitsfunktion **Buff8** „sorb radionuclides“). Die radionuklidspezifischen, effektiven Diffusionskoeffizienten ( $D_e$ ) und Sorptionskoeffizienten ( $K_d$ ) sind geeignete Indikatoren für diese Sicherheitsfunktion (siehe /SKB 10b/ für Parameterwerte). Zudem wird bei dieser Sicherheitsfunktion auf die verzögernde Wirkung der Diffusion für den Radionuklidtransport hingewiesen.

In /SKB 11a/ wird die Sicherheitsfunktion **Buff9** „allow gas passage“ ausgewiesen. Der Buffer soll ermöglichen, dass potentiell im beschädigten Behälter gebildetes Gas entweichen kann, damit keine integritätsgefährdenden Gasdrücke entstehen. Die Gastransporteigenschaften stehen im Zusammenhang mit dem Bufferquelldruck. Ein niedrigerer Quelldruck ist hier von Vorteil. Quantitative Grenzen für eine diesbezüglich günstige Bufferfunktion werden jedoch seitens der SKB nicht formuliert.

### Versatz der Bohrlochüberfahrungsstrecke („deposition tunnel backfill“)

In /SKB 11a/ wird die Sicherheitsfunktion **BF2** „limit advective transport“ ausgewiesen. Der Bentonitversatz in den Bohrlochüberfahrungsstrecken sollte keine bevorzugte Wegsamkeit für den Radionuklidtransport ausbilden. Um dies zu erreichen, sollte der Versatz einen ausreichenden Quelldruck  $P_{Swell}^{Backfill} > 0,1 \text{ MPa}$  (Anforderung BF2b) besitzen, um Dichtigkeit und Homogenität und eine begrenzte hydraulische Leitfähigkeit von  $k^{Backfill} > 10^{-10} \text{ m/s}$  (Anforderung BF2a) sicherzustellen.

Zudem wird mit der Sicherheitsfunktion **BF2** ein Kriterium ausgewiesen, welches sich auch der Kategorie „Integritätserhaltende Sicherheitsfunktionen“ zuordnen lässt. Es wird nämlich gefordert, dass der Versatz in den Bohrlochüberfahrungsstrecke nicht gefriert (Anforderung BF2c). Frostsprengung kann die Wände der Bohrlochüberfahrungsstrecke beschädigen, wodurch neue Transportwege für Radionuklide entstehen. Die Transporteigenschaften eines gefrorenen und wieder aufgetauten Versatzes verschlechtern sich in Bezug auf die Radionuklidverzögerung. Die kritische Temperatur für den Versatz hängt vom Quelldruck ab. Der projektierte Quelldruck des Versatzes beträgt ca. 3 MPa. Daraus ergibt sich folgendes Temperaturkriterium, welches auf Wasser mit geringen Lösungsgehalten basiert:

$$T^{Backfill} > -2 \text{ °C}$$

In /SKB 11a/ wird die Sicherheitsfunktion **BF3** „sorb radionuklides“ ausgewiesen. Wie auch für den Buffer kann die Sorption von Radionukliden in den Bohrlochüberfahrungsstrecken eine Beschränkung bzw. Verzögerung des Radionuklidtransportes induzieren. Die Sorptionskoeffizienten ( $K_d$ ) sind Indikatoren für diese Sicherheitsfunktion. Es werden jedoch in /SKB 11a/ keine Wertebereiche für diese Parameter ausgewiesen.

#### 3.4.1.3 Anforderungen an die Geosphäre

An die Geosphäre werden zum Erhalt bzw. Schutz der untergeordneten Komponenten, nach /SKB 11a/ vier Sicherheitsfunktionen ausgewiesen:

- **R1:** Günstige chemische Bedingungen
- **R2:** Günstige hydrogeologische und Transportbedingungen

- **R3:** Günstige mechanisch-stabile Bedingungen
- **R4:** Günstige thermische Bedingungen

Die Sicherheitsfunktionen R1 und R2 sind sowohl für die einschließenden als auch für die rückhaltenden Sicherheitsfunktionen relevant. Die Funktionen R3 und R4 werden nur den einschließenden Sicherheitsfunktionen zugewiesen (siehe Abb. 3.20 und Abb. 3.21). Allgemein werden die Anforderungen an die Geosphäre als übergreifende SF angesehen welche verschiedene Komponenten beeinflussen können. Deshalb werden die Sicherheitsfunktionen der Geosphäre in diesem separaten Kapitel beschrieben.

### **R1: Günstige chemische Bedingungen**

Im Folgenden sind die Anforderungen an die Sicherheitsfunktion **R1** „provide chemicaly favourable conditions“ zusammengestellt (siehe auch Anhang A):

- Reduzierende Bedingungen (R1a)

Eine wesentliche Anforderung an das Grundwasser sind reduzierende Bedingungen, also die Abwesenheit von Sauerstoff, da hierdurch die Behälterkorrosion vermindert wird. Reduzierende Bedingungen bewirken weiterhin eine niedrige Auflösungsrate der Brennstoffmatrix, eine geringe Löslichkeit von Radionukliden und eine erhöhte Sorption in Buffer und Versatz.

- Ionenstärke, Lösungsgehalt (R1b)

Der Lösungsgehalt des Grundwassers sollte nicht zu hoch oder zu gering sein. Grundwasser mit hohen Ionenstärken haben einen negativen Einfluss auf die Quelleigenschaften und damit auf die hydraulische Durchlässigkeit des Buffers und des Versatzes. Für die minimale Ionenstärke des Grundwassers gilt der Wert in der Anforderung R1c.

Maximale Ionenstärken, die NaCl-Konzentrationen von etwa 35 g/l (0,6 M NaCl) entsprechen, wurden als Anforderung für die Aufrechterhaltung der abdichtenden Eigenschaften des Versatzes (backfill) festgelegt. Die entsprechende Anforderung für die maximale Ionenstärke für den Erhalt der Eigenschaften des Buffers beträgt 100 g/l (1,7 M NaCl). Die Anforderungen an die Salinität sind somit von den Materialeigenschaften abhängig.

- Kolloidtransport (R1c)

Die minimale Ionenstärke des Grundwassers sollte  $> 4 \text{ mM}$  sein, damit sich keine Kolloide aus Buffer oder Versatzmaterial bilden.

$$\sum q[M^{q+}] > 4 \text{ mM}$$

- Minimierung von unerwünschten Lösungsbestandteilen (R1d)

Um die Behälterkorrosion zu minimieren, soll die Konzentration einiger Lösungsbestandteile gering sein. Diese sind z. B. Sulfide und Reduktionsmittel (z. B. Wasserstoff, Methan und organische Verbindungen), die in Verbindung mit Sulfat und Mikroben Sulfide bilden können.

Weitere Anforderungen an die Grundwasserbeschaffenheit hinsichtlich Lösungsbestandteile, welche sich negativ auf die Langzeitstabilität des Buffers und des Versatzes auswirken, betreffen limitierte Gehalte an  $\text{K}^+$  und Fe.

- pH-Wert (R1e)

Der pH-Wert beeinflusst die Stabilität des Buffers und des Versatzes. Das Kriterium ist, dass der pH-Wert zwischen  $pH^{GW} > 4$  und  $pH^{GW} < 11$  sein sollte.

- Vermeidung von Chlorid-Korrosion (R1f)

Eine weitere Anforderung ist, dass die Kombination von niedrigen pH-Werten und hohen Chloridkonzentrationen vermieden werden sollte, um eine Chlorid-Korrosion des Behälters zu minimieren. In quantitativer Hinsicht wird dieser Anforderung folgendes Kriterium zugewiesen:

$$pH^{GW} > 4 \text{ und } [Cl^-] < 2 \text{ M.}$$

## **R2: Günstige hydrogeologische und Transportbedingungen**

Die Sicherheitsfunktion **R2** „provide favourable hydrologic and transport conditions“ stellt Anforderungen an günstige hydrogeologische und Transportbedingungen in der Geosphäre. Zum einen soll der Radionuklidtransport in Klüften (R2a „transport resistance in fractures“) behindert werden. Eine geringe Transmissivität der Klüfte, in Kombination mit niedrigen hydraulischen Gradienten, reduziert dabei den Lösungsfluss.

Zum anderen soll der Radionuklidtransport durch den Buffer in das Wirtsgestein behindert werden (R2b „equivalent flow rate in buffer/rock interface“). Diese Anforderung

kann durch einen intakten Buffer mit einem formschlüssigen Kontakt mit dem Ringraum des Einlagerungsbohrloches (Bufferquelldruck) und eine begrenzte Kluftweite derjenigen Klüfte, die das Einlagerungsbohrloch schneiden, gewährleistet werden. Der Radionuklidtransport im Kontaktbereich Buffer/Wirtsgestein hängt im Wesentlichen ab von:

1. den Diffusionsbedingungen im Buffer,
2. der hydraulischen Durchlässigkeit von Klüften im Bereich des Einlagerungsbohrloches und
3. der Vernetzung der Klüfte im Wirtsgestein.

Die Durchlässigkeit im Kontaktbereich zwischen dem Buffer und dem Wirtsgestein kann durch thermisch induziertes abplatzen von Gestein ansteigen.

Bei keinem der oben genannten Anforderungen (R2a, R2b) ist es möglich, quantitative Grenzen zu setzen, aber sie erfordern integrierte Analysen von ortsspezifischen, hydrogeologischen Bedingungen und deren Entwicklung über die Zeit.

Ein geeigneter Indikator für die Sicherheitsfunktion **R2** ist die äquivalente Durchflussrate  $Q_{eq}$ , welcher ein integraler Wert aller oben genannten Faktoren ist. Als Faustregel können Werte unter  $10^{-4} \text{ m}^3/\text{a}$  als günstig angesehen werden.

R2c: Matrixdiffusion und Sorption (nur für Retardation relevant, siehe Abb. 3.21)

Sorption und eine niedrige Matrixdiffusion liefern wichtige Beiträge zur Verzögerung des Radionuklidtransports in die Geosphäre. Als Indikatoren eignen sich die element-spezifische Diffusion ( $D_e$ ) und der Sorptionskoeffizient ( $K_d$ ).

R2d: Niedrige Kolloidkonzentrationen (nur für Retardation relevant, siehe Abb. 3.21)

Kolloide (i. W. Tonpartikel), die mit der flüssigen Phase in Klüften transportiert werden, können Radionuklide sorbieren und mit sich führen. Daher sollte die Kolloidkonzentration niedrig sein (in /SKB 11a/ werden jedoch keine spezifischen Grenzwerte zu Kolloidkonzentrationen gegeben).

### **R3: Günstige mechanisch-stabile Bedingungen**

Die Sicherheitsfunktion **R3** „provide mechanically stable conditions“ legt die Anforderungen an günstige mechanisch stabile Bedingungen, insbesondere zum Schutz des Behälters fest. Die Integrität der Behälter kann durch zwei wesentliche mechanische Prozesse beeinflusst werden:

1. Bruch des Behälters aufgrund zu hoher isostatischer Druck Belastung (Indikator R3a) und
2. Versagen aufgrund von Erdbeben, die Klüfte reaktivieren können, welche das Einlagerungsbohrloch schneiden (Indikatoren R3b und R3c).

Ein wesentlicher Prozess, welcher zu einer hohen isostatischen Belastung führt, ist eine potentielle Auflast von Inlandeis. Der zweite Punkt erfordert eine komplexe Bewertung von Scherbewegungen an existierenden Klüften für eine Reihe von mechanischen Belastungssituationen. Zur Beurteilung der Konsequenzen solcher Bewegungen, wurden die folgenden Bedingungen hinsichtlich der Versatzbeträge und -geschwindigkeiten der Klüfte, welche die Einlagerungsbohrlöcher schneiden, festgelegt:

R3b:  $d_{shear} < 5 \text{ cm}$  und R3c:  $v_{shear} < 1 \text{ m/s}$

### **R4: Günstige thermische Bedingungen**

Günstige thermische Bedingungen werden von der Sicherheitsfunktion **R4** „provide favourable thermal conditions“ gefordert. Der Sicherheitsindikator für die minimale Temperatur des Buffers liegt bei  $-4 \text{ °C}$  (R4a „avoid buffer freezing“). Die Gebirgstemperatur auf Endlagerteufe sollte also nicht unter diesen Wert fallen. Weiterhin werden Analysen der mechanischen Einwirkung von Scherbewegungen auf Materialeigenschaften durchgeführt, die für Temperaturen bis zu  $0 \text{ °C}$  gültig sind (R4b „validity of can shear analysis“).

#### **3.4.2 Erweiterung der Liste der Sicherheitsfunktionen für kristalline Wirtsgesteine**

In den Kapiteln 3.4.2.2 und 3.4.2.3 wird aufbauend auf den Ergebnissen aus dem Kap. 3.4.1 eine überarbeitete Unterteilung/Systematik der Sicherheitsfunktionen basie-

rend auf dem Vorhaben VerSi I /FIS 10/ aufgezeigt. Die ursprüngliche Sicherheitsfunktionsliste aus dem Vorhaben VerSi I wurde für Endlagerkonzepte in den Wirtsgesteinen Salz und Ton erstellt. Eine Überarbeitung der Liste wurde notwendig, um auch Sicherheitskonzepte für das Wirtsgestein Kristallin berücksichtigen zu können. Die vorgestellte allgemeine Liste umfasst somit Sicherheitsfunktionen für Endlagersysteme in Ton, Salz und Kristallin.

Bei der Ableitung von Sicherheitsfunktionen stellt sich generell die Frage, wie das komplexe Wirkungsgefüge innerhalb eines Endlagersystems in einen Satz von Sicherheitsfunktionen übertragen werden kann.

In der Regel verfolgen Sicherheitsfunktionen ein bestimmtes Wirkungsziel, wie etwa dasjenige, eine bestimmte Komponente vor einem bestimmten Prozess zu schützen (z. B. Schutz des Behälters vor mechanischer Schädigung). Allerdings können mehrere Komponenten auch das gleiche Ziel verfolgen. Wenn beispielsweise eine Funktion des Buffers darin besteht, den Behälter vor mechanischer Schädigung zu schützen, dann kann gleichzeitig der Behälter selbst die Funktion besitzen, stabil gegenüber mechanischer Einwirkung zu sein. Zu jedem Wirkungsziel – wie etwa dem Schutz einer Komponente oder der Gewährleistung bestimmter Zustände oder Eigenschaften – werden also oft mehrere Sicherheitsfunktionen benötigt. Dies trifft auch auf den hier vorgestellten Satz an Sicherheitsfunktionen zu.

Oft ist es nicht möglich, ein einheitliches Benennungsschema für Sicherheitsfunktionen zu verfolgen, z. B. in der Form „Komponente A soll Komponente B schützen“. Sicherheitsfunktionen in dieser Weise als Subjekt-Objekt-Beziehung zu definieren, ist oft nicht praktikabel. Das liegt unter anderem daran, dass das zu schützende Objekt einer Sicherheitsfunktion manchmal nicht klar genannt wird, weil die primäre Zielsetzung darin besteht, bestimmte Zustände, Prozesse oder Eigenschaften zu verhindern oder zu gewährleisten. Dies ist beispielsweise bei der Sicherheitsfunktion „Begrenzung der Gasbildung“ der Fall, die nicht ausweist, welche Komponenten im Einzelnen geschützt werden sollen. Manchmal sind Subjekt und Objekt einer Wirkung auch identisch, z. B. bei Sicherheitsfunktionen, die auf mechanische Stabilität abzielen (ein stabiler Behälter schützt sich selbst vor Schädigung). Aus diesen Gründen wurde an dieser Stelle auf ein einheitliches Benennungsschema für Sicherheitsfunktionen verzichtet.

Im Folgenden Kap. 3.4.2.1 wird eine kurze Gegenüberstellung der Sicherheitsfunktionen aus dem Vorhaben VerSi I und dem KBS-3-Konzept gegeben und erläutert welche Änderungen sich daraus für Sicherheitsfunktionsliste im Vorhaben VerSi II ergeben.

#### **3.4.2.1 Berücksichtigung der Sicherheitsfunktionen des KBS-3-Konzeptes im Vorhaben VerSi**

Vorab ist anzumerken, dass dem System der Sicherheitsfunktionen im KBS-3-Konzept eine etwas andere Logik zugrunde liegt als demjenigen in VerSi. Als einschlusswirksame Sicherheitsfunktionen werden seitens SKB solche verstanden, die sämtlich darauf abzielen, die Behälterintegrität zu gewährleisten. Entsprechend der VerSi-Nomenklatur wären dies vor allem integritätsbewahrende Sicherheitsfunktionen (ISF). Rückhaltende Sicherheitsfunktionen, die den Radionuklidtransport begrenzen sollen, werden seitens der SKB nur für den Fall von Freisetzungen infolge Behälterdefekten betrachtet. Dagegen werden in VerSi als rückhaltende Sicherheitsfunktionen RSF solche bezeichnet, die entweder den Einschluss von Radionukliden (z. B. in einem intakten Behälter) bewirken oder auf eine Verzögerung des Radionuklidtransportes abzielen.

Für viele Sicherheitsfunktionen des KBS-3-Konzeptes gibt es keine „direkte“ Entsprechung in der Liste der Sicherheitsfunktionen des Vorhabens VerSi I. Beispielsweise gibt es für die Sicherheitsfunktion Can1 „provide corrosion barrier“ kein direktes Pendant, jedoch ist im Vorhaben VerSi I die Korrosion bzw. die Integrität der Behälterwandungen in der Sicherheitsfunktion RSF10: „Begrenzung/Verhinderung des Lösungszutritts zum Abfallprodukt infolge Dichtwirkung der Behälterwandungen“ berücksichtigt; dort ist die Korrosionsbeständigkeit als charakteristischer Parameter enthalten.

Die folgenden Sicherheitsfunktionen aus dem KBS-3-Konzept besitzen keine direkte Entsprechung zu den Sicherheitsfunktionen des Vorhabens VerSi I. Dort, wo Bezüge zu den Sicherheitsfunktionen der Vorhaben VerSi I und VerSi II vorliegen, werden diese aufgezeigt (rückhaltende Sicherheitsfunktionen werden dabei mit „RSF“, integritäts-erhaltende Sicherheitsfunktionen mit ISF abgekürzt). Die Sicherheitsfunktionslisten der Vorhaben VerSi I und VerSi II werden hier mit „SFL I“ und „SFL II“ abgekürzt).

Die ISF **Can1, 2 und 3** des KBS-3-Konzeptes sind über die charakteristischen Parameter in VerSi I in der RSF11 „Begrenzung/Verhinderung des Lösungszutritts zum Ab-



fallprodukt infolge Dichtwirkung der Behälterwandungen“ und in VerSi II in der RSF\_MS „Mechanische Stabilisierung“ (Kap. 3.4.2.2) berücksichtigt.

Die RSF **Can4** "provide transport resistance" bezieht sich auf eine verzögerte Radionuklidfreisetzung aus einem Behälter nach dessen Versagen und einem potentiellen Lösungszutritt. Die Versagensart (z. B. Lochfraß, Riss) bestimmt, wie hoch der Transportwiderstand im Behälter bzw. wie stark der Lösungsstrom aus dem Behälter ist. Die Versagensart wird in den SFL I und II nicht explizit aufgeführt, da die Art des Versagens (z. B. Lochfraß, Riss) letztendlich nicht vorhersagbar ist. Dies entspricht auch den Modellannahmen in /SKB 10c/.

Die Anforderungen in **Buff1b** und **Buff5** fordern einen Mindestquelldruck, um die Selbstabdichtung des Buffers oder Versatzes zu gewährleisten. Die ISF **Buff6** „limit pressure on canister and rock“ legt ein Kriterium fest, das einen maximalen Quelldruck des Versatzes fordert, und fordert eine Mindesttemperatur, damit der Versatz nicht gefriert. Für das Temperaturkriterium gibt es keine Entsprechungen in den SFL I und II. Eine Sicherheitsfunktion, welche sich explizit auf den Quelldruck bezieht, wurde im Vorhaben VerSi II eingeführt (ISF\_PS-c „Gewährleistung des Quellvermögens“ in Kap. 3.4.2.2).

Die ISF **Buff2** „reduce microbial activity“ wurde mit der in der SFL II neu hinzugefügten Sicherheitsfunktion ISF\_PS-a „Korrosionsschutz“ (Kap. 3.4.2.2) durch Forderung einer ausreichenden Dichte berücksichtigt (dies hemmt die mikrobielle Aktivität).

Die ISF **Buff3** „damp rock shear“ für die Dämpfung von Scherbewegungen, verlangt eine Mindestdichte des Buffers /SKB 11a/. Die Mindestdichte stellt sich bei einem bestimmten Quelldruck ein und wird daher in der SFL II durch die Sicherheitsfunktion ISF\_PS-c abgedeckt.

Für die RSF **Buff9** „allow gas passage“ gibt es keine Entsprechung in der SFL I. Die Verhinderung zu hoher Gasdrücke durch das schadlose Ableiten der Gase durch die Komponente, ist jedoch wichtig für den Integritätserhalt. Daher wurde in der SFL II die ISF\_VG-b „Schadlose Ableitung von Gasen“ (Kap. 3.4.2.2) hinzugefügt.

Die ISF **BF1** „counteract buffer expansion“ stellt die Anforderung an eine ausreichende Expansion bzw. Quellung des Versatzes innerhalb der Bohrlochüberfahrungsstrecke.

Diese SF ist in der SFL I nicht enthalten und wird in der SFL II durch die ISF\_PS-c „Gewährleistung des Quellvermögens“ (Kap. 3.4.2.2) abgedeckt.

Die Sicherheitsfunktionen **R1, R2, R3 und R4** (siehe Kap. 3.4.1.3) stellen Anforderungen an die Geosphäre. Einige Anforderungen dieser Sicherheitsfunktionen sind in anderen Sicherheitsfunktionen, wie z. B. der Anforderung nach Dichtheit (SFL II **RSF\_DW**) oder indirekt über die charakteristischen Parameter berücksichtigt.

Die SF **R1** fordert günstige geochemische Bedingungen in der Geosphäre. Günstige geochemische Bedingungen sind in der SFL I in verschiedenen Sicherheitsfunktionen über die charakteristischen Parameter berücksichtigt. In der SFL II sind günstige geochemische Bedingungen indirekt in der Sicherheitsfunktion ISF\_PS „Stabilisierung gegen hydraulisch-chemische Prozesse“ berücksichtigt.

Die Sicherheitsfunktion **R2** „provide favourable hydrologic and transport conditions“ fordert günstige hydraulische Bedingungen in der Geosphäre. Im Wesentlichen soll eine geringe hydraulische Durchlässigkeit der Geosphäre gewährleistet werden. Diese Anforderungen werden in der SFL II durch die Sicherheitsfunktion RSF\_DW „Dichtwirkung“ abgedeckt.

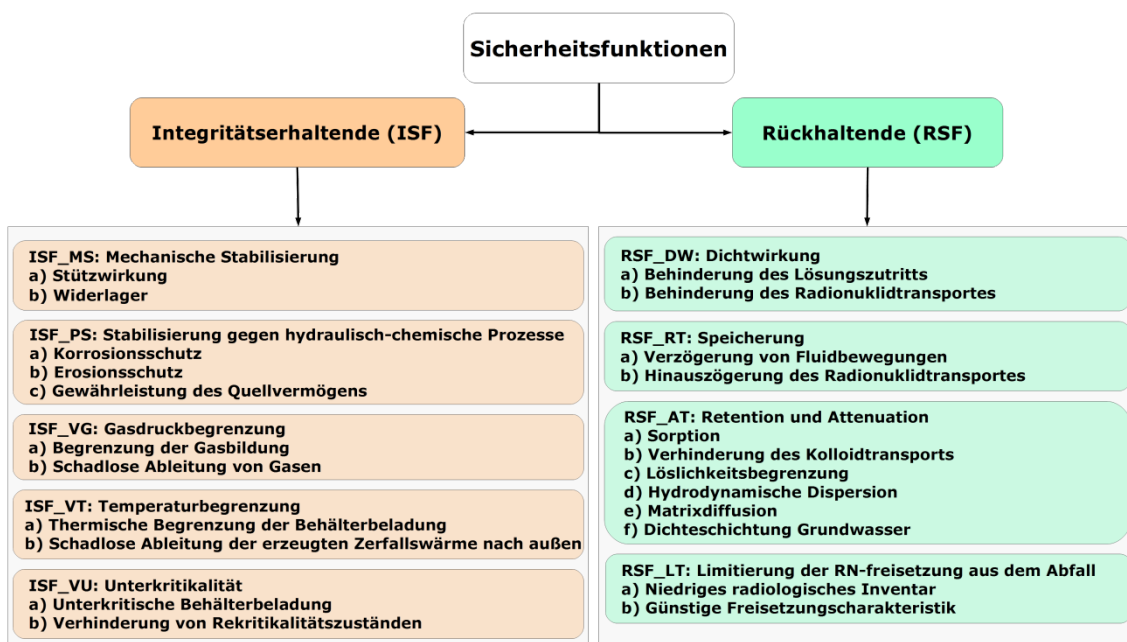
Die Sicherheitsfunktion **R3** „provide mechanically stable conditions“ wird in der SFL II durch die ISF\_MS „Mechanische Stabilisierung“ abgedeckt. Die Sicherheitsfunktion **R4** „provide favourable thermal conditions“ fordert günstige thermische Bedingungen, wie z. B., dass der Buffer nicht gefriert. Für diese Anforderung ist keine Sicherheitsfunktion in der SFL I oder SFL II ausgewiesen. Diese Anforderung muss durch das Endlagerkonzept bzw. die Endlagertiefe erfüllt werden.

Es wurden der SFL II (siehe Abb. 3.22) weitere Sicherheitsfunktionen hinzugefügt, welche nicht explizit in der SFL I und dem KBS-3-Konzept aufgeführt sind bzw. nur über die charakteristischen Parameter berücksichtigt wurden. Im Folgenden sind die Sicherheitsfunktionen aufgeführt, welche für die SFL II ergänzt wurden:

- ISF\_PS-b: „Erosionsschutz“
- ISF\_PS-c: „Gewährleistung des Quellvermögens“
- ISF\_VG-a: „Schadlose Ableitung von Gasen“
- RSF\_RT: „Speicherung“

- RSF\_AT-d: "Hydrodynamische Dispersion"
- RSF\_AT-e: "Matrixdiffusion"
- RSF\_AT-f: "Dichteschichtung Grundwasser"

Im Folgenden wird die in diesem Vorhaben erstellte Liste der Sicherheitsfunktion (SFL II) vorgestellt (siehe Abb. 3.22 sowie Kap. 3.4.2.2 und 3.4.2.3). Für jede Sicherheitsfunktion erfolgt in den Kap. 3.4.2.2 und 3.4.2.3 tabellarisch die Zuordnung zu Endlagerkomponenten. Ebenfalls werden einige Beispiele für charakteristische Parameter aufgeführt.



**Abb. 3.22** Kategorisierung der Sicherheitsfunktionen im Vorhaben VerSi II

### 3.4.2.2 Integritätserhaltende Sicherheitsfunktionen (ISF)

Unter integritätserhaltenden Sicherheitsfunktionen (ISF) werden hier Sicherheitsfunktionen verstanden, die zur Wahrung der Integrität gegenüber Einflüssen von innen und außen beitragen. Im Allgemeinen tragen ISF dazu bei, Komponenten so zu schützen, dass deren rückhaltende Schutzfunktionen erhalten bleiben.

## **1) ISF\_MS: Mechanische Stabilisierung**

Die ISF „Mechanische Stabilisierung“ beinhaltet verschiedene Schutzwirkungen. Zum Beispiel kann eine mechanische Stabilisierung die Stützwirkung einer Komponente auf eine andere bedeuten oder eine Komponente soll eine mechanische Last (z. B. Fluiddruck, Quelldruck) aufnehmen, um bestimmte Komponenten in Position zu halten (Widerlagerfunktion).

### **a) ISF\_MS Stützwirkung: Aufnahme isostatischen Drucks**

Diese Sicherheitsfunktion wird für Komponenten angewendet, die stützend auf andere Komponenten wirken. Eine wesentliche Schutzfunktion ist die Verhinderung der Auflockerung des konturnahen Wirtsgesteins und einer dadurch induzierten Erhöhung der hydraulischen Durchlässigkeit.

**Tab. 3.21** Komponenten zur Sicherheitsfunktion ISF\_MS-a und charakteristische Parameter für die Robustheitsbewertung

Komponente	Erwartetes Verhalten	Beispiele für charakteristische Parameter
Abfallnaher Versatz	Begrenzung der Auflockerung des konturnahen Wirtsgesteins und der hangenden Schichten	Indikatoren für Kompaktions- und Quellverhalten
Streckenversatz	Begrenzung der Auflockerung des konturnahen Wirtsgesteins und der hangenden Schichten	Indikatoren für Kompaktions- und Quellverhalten
Geotechnisches Bauwerk	Begrenzung der Auflockerung des konturnahen Wirtsgesteins	Einbaudichte (Restporosität), Firstbündigkeit und Kontaktschlüssigkeit, Indikatoren des Kompaktionsverhaltens
Einlagerungsbereich	Selbstheilung von Auflockerungszonen	Viskositäts- / Plastizitätseigenschaften
	Schadlose Aufnahme von Gebirgs- spannungen (z. B. Vermeidung von Kluft- und Rissbildung, Lagefixie- rung der technischen Endlager- komponenten)	Festigkeitseigenschaften Viskositäts- / Plastizitätseigen- schaften Mächtigkeit
ewG	Selbstheilung von Auflockerungszonen	Viskositäts- / Plastizitätseigen- schaften
	Schadlose Aufnahme von Gebirgs- spannungen (z. B. Vermeidung von Kluft- und Rissbildung, Lagefixie- rung der technischen Endlager- komponenten)	Festigkeitseigenschaften Viskositäts- / Plastizitätseigen- schaften Mächtigkeit

**b) ISF\_MS Widerlager: Aufnahme gerichteten Drucks**

Ziel dieser Sicherheitsfunktion ist die mechanische Lastaufnahme, um bestimmte Komponenten in Position zu halten (Widerlagerfunktion). Ein Beispiel hierfür ist im KBS-3-Konzept, die Aufgabe des Bentonits in den Zugangsstrecken, das Ausquellen des Buffers aus dem Bohrloch nach oben zu verhindern. Belastungen können z. B. durch Fluiddrücke, Quelldrücke und Scherspannungen entstehen (Tab. 3.22).

**Tab. 3.22** Komponenten zur Sicherheitsfunktion ISF\_MS-b und charakteristische Parameter für die Robustheitsbewertung

Komponente	Erwartetes Verhalten	Beispiele für charakteristische Parameter
Abfall	Mechanische Stabilität	Festigkeitseigenschaften (Brennstäbe, Abfallmatrix)
Abfallbehälter	Mechanische Stabilität zum Schutz des Abfallproduktes und zur Gewährleistung des Einschlusses	Kritische Spannungen Kritische Verschiebungen Festigkeitseigenschaften Qualitätskontrolle und Ausfallrate
Abfallnaher Versatz	Schutz des Abfallgebindes vor geomechanischen Einflüssen von außen und Lagefixierung des Abfallgebindes	Festigkeitseigenschaften Indikatoren für Kompaktionsverhalten Dichte Quelldruck
Streckenversatz	Mechanische Lastaufnahme zur Lagefixierung	Festigkeitseigenschaften Indikatoren für Kompaktionsverhalten Dichte Quelldruck
Geotechnisches Bauwerk (insbesondere Widerlager)	Mechanische Lastaufnahme zur Lagefixierung (z. B. Gas- und Fluidrückdrucke oder Bentonitquelldruck)	Festigkeitseigenschaften, Korrosions- und Alterungsbeständigkeit, Einbaudichte, Geometrie des Abdichtungsbauwerks

## 2) ISF\_PS: Stabilisierung gegen hydraulisch-chemische Prozesse

Hydraulisch-chemische Prozesse können die geforderten Eigenschaften von Komponenten (wie z. B. eine geringe hydraulische Durchlässigkeit) negativ beeinflussen.

### a) ISF\_PS Korrosionsschutz: Schutz vor Degradation

Diese Sicherheitsfunktion zielt auf geochemische Prozesse ab, die die Integrität von Behältern (metallischer Materialien) und geotechnischen Abdichtbauwerken (z. B. von Beton und Bentonit) negativ beeinflussen können.

Korrosive Prozesse benötigen die Anwesenheit einer flüssigen Phase. Deshalb ist nicht nur die Zusammensetzung des korrodierenden Materials entscheidend, sondern auch die Zusammensetzung der angreifenden Lösung.

**Tab. 3.23** Komponenten zur Sicherheitsfunktion ISF\_PS-a und charakteristische Parameter für die Robustheitsbewertung

Komponente	Erwartetes Verhalten	Beispiele für charakteristische Parameter
Abfall	Chemische Stabilität	Chemische Indikatoren der zutretenden Lösung Chemische Zusammensetzung der Komponente je nach Material der jeweiligen Komponente
Abfallbehälter	Chemische Stabilität zum Erhalt der Behälterintegrität	
Abfallnaher Versatz <sup>(*)</sup>	Gewährleistung geeigneter geochemischer Bedingungen zum Schutz des Behälters	
Streckenversatz	Gewährleistung geeigneter geochemischer Bedingungen zum Schutz von geotechnischen Bauwerken, abfallnahem Versatz und Behältern	
Geotechnisches Bauwerk	Chemische Stabilität zum Erhalt der abdichtenden Wirkung	
Einlagerungsbereich	Gewährleistung geeigneter geochemischer Bedingungen	
ewG	Gewährleistung geeigneter geochemischer Bedingungen	

(\*) hervorgehoben: Komponente aufgrund der Betrachtung des WG Kristallin von Bedeutung.

#### **b) ISF\_PS Erosionsschutz: Schutz vor Subrosion und Erosion**

Diese Sicherheitsfunktion soll die Erosion von Komponenten verhindern (z. B. des ewG und des Einlagerungsbereichs über dem Endlagerbergwerk). Durch Schmelzwassererosion kann z. B. das Deckgebirge tiefgreifend erodiert werden (Rinnenbildung). Das Ausmaß der Erosion hängt unter anderem von den Festigkeitseigenschaften und der Löslichkeit des Gesteins ab.

**Tab. 3.24** Komponenten zur Sicherheitsfunktion ISF\_PS-b und charakteristische Parameter für die Robustheitsbewertung

Komponente	Erwartetes Verhalten	Beispiele für charakteristische Parameter
Abfallnaher Versatz	Stabilität gegenüber Erosion	Maximale Strömungsgeschwindigkeiten Ionenstärke der Lösung
Streckenversatz		
Einlagerungsbereich	Schutz des Versatzes durch Limitierung der Strömungsgeschwindigkeit	Maximale Strömungsgeschwindigkeiten Kluftnetzwerkparameter
Einlagerungsbereich	Stabilität gegenüber Erosion	Mächtigkeit
ewG		
Deckgebirge	Stabilität gegenüber Erosion zum Schutz des ewG	Festigkeitseigenschaften Mächtigkeit

Falls der ewG/Einlagerungsbereich aus regulatorischen oder definitorischen Gründen nicht angegriffen werden darf, entfällt diese Sicherheitsfunktion für diese Komponenten.

**c) ISF\_PS Gewährleistung des Quellvermögens: Gewährleistung des Quellvermögens von tonigem Material**

Durch die Quellung von quellfähigem Versatz sollen im Endlagerbergwerk reliktsche Hohlräume verschlossen und die Selbstheilung von Bruchzonen gefördert werden. Der Quelldruck wirkt stützend auf die Hohlraumkontur und verhindert somit eine weitere Auflockerung des Wirtsgesteines. Zudem wird die hydraulische Durchlässigkeit durch das Verschließen der Hohlräume reduziert.

Die Quellfähigkeit von Tonen hängt von ihrer mineralogischen Zusammensetzung (i. W. Montmorillonit-Gehalt) ab. Zudem ist der Quellprozess abhängig von der Wassersättigung des Tones und den chemischen Eigenschaften der Lösung.



**Tab. 3.25** Komponenten zur Sicherheitsfunktion ISF\_PS-c und charakteristische Parameter für die Robustheitsbewertung

Komponente	Erwartetes Verhalten	Beispiele für charakteristische Parameter
Abfallnaher Versatz	Verschluss vorhandener Hohlräume und Gewährleistung einer geforderten Materialdichte	Chemische Indikatoren der zutretenden Lösung  Quelldruck der Komponente Einspannung durch umgebende Komponenten
Streckenversatz	Verschluss vorhandener Hohlräume und Gewährleistung einer geforderten Materialdichte	
Geotechnisches Bauwerk	Verschluss vorhandener Hohlräume und Gewährleistung einer geforderten Materialdichte	
Einlagerungsbereich	Günstige hydrochemische Bedingungen für den Quellprozess	Chemische Indikatoren der zutretenden Lösung
ewG	Günstige hydrochemische Bedingungen für den Quellprozess	Chemische Indikatoren der zutretenden Lösung

### 3) ISF\_VG: Gasdruckbegrenzung: Vermeidung integritätsgefährdender Gasdrücke

Hohe Gasdrücke können die Integrität von Endlagerkomponenten beeinträchtigen. Die Gasdruckentwicklung wird im Wesentlichen von der Gasbildungsrate und einer eventuellen Gebirgskonvergenz beeinflusst. Zudem ist für die Gasdruckentwicklung entscheidend, wie gut Gase entweichen können und welche Volumina zur Gasspeicherung zur Verfügung stehen.

#### a) ISF\_VG Begrenzung der Gasbildung

Das Gasbildungspotential und die Gasbildungsraten sind abhängig vom gasbildenden Inventar (Eisen, Organika) und dem geochemischen Milieu (Lösungszusammensetzung und Lösungsmenge) in den jeweiligen Komponenten. Die Behinderung des Lösungszutritts kann die Gasbildung verlangsamen. Dies wird unter der Sicherheitsfunktion RSF\_DW-a („Behinderung des Lösungszutritts“) behandelt.

**Tab. 3.26** Komponenten zur Sicherheitsfunktion ISF\_VG-a und charakteristische Parameter für die Robustheitsbewertung

Komponente	Erwartetes Verhalten	Beispiele für charakteristische Parameter
Abfall	Geringe Gasbildungs-raten	Gasbildungsraten Korrosionsraten
Abfallbehälter	Geringe Gasbildungs-raten	Gasbildungsraten Korrosionsraten
Abfallnaher Versatz	Günstige hydrochemi-sche Bedingungen zur Reduktion der Gasbil-dung	Chemische Indikatoren der zutretenden Lö-sung Chemische Zusammensetzung der Kompo-nente
Streckenversatz		
Einlagerungs-bereich		
ewG		

#### b) ISF\_VG Schadloose Ableitung von Gasen

Damit eine Komponente nicht durch zu hohe Gasdrücke „geschädigt“ wird, muss das Material entweder widerstandsfähig gegenüber hohen Gasdrücken sein oder für eine Ableitung der Gase sorgen, um die Gasdrücke zu reduzieren.

**Tab. 3.27** Komponenten zur Sicherheitsfunktion ISF\_VG-b und charakteristische Parameter für die Robustheitsbewertung

Komponente	Erwartetes Verhalten	Beispiele für charakteristische Parameter
Abfallnaher Versatz	Gasableitung ohne Integ-ritätsverlust	Sättigungszustand Mobilität des Gases Gaseindringdruck
Streckenversatz		
Einlagerungs-bereich	Integritätserhalt bei ho-hem Gasdruck	Möglichkeit des Gastransports ohne Mak-rorissbildung (Gasdiffusion, Zweiphasen-strömung mit inerter Matrix, Pathway Dila-tion)
ewG	Integritätserhalt bei ho-hem Gasdruck	Möglichkeit des Gastransports ohne Mak-rorissbildung (Gasdiffusion, Zweiphasen-strömung mit inerter Matrix, Pathway Dila-tion)

#### 4) ISF\_VT: Temperaturbegrenzung: Vermeidung integritätsgefährdender Temperaturen

Durch Ableitung der Zerfallswärme aus dem Behälter an die behälternahen Komponenten und in das anstehende Wirtsgestein, sollen die Temperaturen im Endlagerbergwerk

limitiert werden. Eine starke Temperatureinwirkung kann insbesondere in tonigen Materialien (Versatz, Wirtsgestein) zu Umwandlungsprozessen führen, wodurch ihre mechanischen und chemischen Eigenschaften negativ verändert werden können.

**a) ISF\_VT Thermische Begrenzung der Behälterbeladung**

Die thermische Begrenzung der Behälterbeladung dient der Temperaturbegrenzung. Auch wenn sie eine Auslegungsgröße darstellt und im Endlager keiner Veränderung unterworfen ist, soll sie hier dennoch formal als Sicherheitsfunktionen gezählt werden, sie wird jedoch keiner Bewertung unterzogen.

**b) ISF\_VT Schadloose Ableitung der erzeugten Zerfallswärme nach außen**

Der Wärmetransport ist von der Kontaktschlüssigkeit und der Wärmeleitfähigkeit der benachbarten Materialien abhängig. Die Ableitung der Wärme darf keine anderen Sicherheitsfunktionen negativ beeinflussen.

**Tab. 3.28** Komponenten zur Sicherheitsfunktion ISF\_VT-b und charakteristische Parameter für die Robustheitsbewertung

Komponente	Erwartetes Verhalten	Beispiele für charakteristische Parameter
Abfallbehälter	Schadloose Aufnahme und Ableitung der Zerfallswärme	Wärmeleistung des Abfalls, Behälterbeladung Wärmetransportparameter (Sättigungsabhängig)
Abfallnaher Versatz		Wärmeleistung der Behälter, Behälterbeladung Wärmetransportparameter (Sättigungsabhängig)
Streckenversatz		Wärmetransportparameter (Sättigungsabhängig)
Geotechnisches Bauwerk		
Einlagerungsbereich		
ewG		

**5) ISF\_VU: Unterkritikalität: Vermeidung von Rekritikalität**

Unter Rekritikalität wird ein Zustand verstanden, bei dem ein spaltbares Material (welches sich zunächst im unterkritischen Zustand befindet), durch chemische oder hydro-

dynamische Prozesse in eine kritische Spaltstoffansammlung überführt wird, so dass eine selbst erhaltende Kettenreaktion beginnt (Kernspaltung) /RÜB 14/, /RSK 06/. Durch eine geeignete Beladung und räumliche Verteilung des Brennstoffs im Endlagerbehälter und konzeptionelle Vorkehrungen im Design des Endlagers, kann eine Rekritikalität im Prinzip ausgeschlossen werden /RÜB 14/.

#### **a) ISF\_VU Unterkritische Behälterbeladung**

Die unterkritische Behälterbeladung ist eine Auslegungsgröße und ist im Endlager keiner Veränderung unterworfen. Sie stellt daher formal in jedem Endlagersystem eine stets robuste Sicherheitsfunktion dar und wird daher keiner Bewertung unterzogen.

#### **b) ISF\_VU Verhinderung von Rekritikalitätszuständen**

Im Endlagersystem sind einige Prozesse denkbar, die zu einer Rekritikalität des Abfallinventars führen könnten. Folgende Szenarien könnten die Kritikalitätssicherheit beeinflussen /BFS 05/:

- Mechanische Verformung von Abfallgebinden
- Leckage von Behältern, Eindringen von Wasser bzw. Lösung
- Korrosion und Auflösung der Behälterstruktur. Vermischen von Kernbrennstoff mit dem umgebendem Wirtsgestein und Wasser bzw. Lösung
- Zusammenfließen des Kernbrennstoffs aus mehreren Behältern, durch Fließbewegung im Wirtsgestein
- Auflösung, Migration und Ablagerung von Kernbrennstoff nach dem Beispiel einer geologischen Lagerstättenbildung
- Trennung von Uran und Plutonium auf geochemischen Weg

Nach /BFS 05/ kann die Kritikalitätssicherheit bei spezifikationsgerechtem Einsatz von entsprechend geeignetem Versatzmaterial beeinflusst werden.

**Tab. 3.29** Komponenten zur Sicherheitsfunktion ISF\_VU-b und charakteristische Parameter für die Robustheitsbewertung

Komponente	Erwartetes Verhalten	Beispiele für charakteristische Parameter
Abfall	Verhinderung von Rekrutikalität	Korrosion der Abfallmatrix
Abfallbehälter		Mechanische Integrität des Behälters Korrosionsrate des Behälters Transporteigenschaften und geochemische Eigenschaften der Behälterkorrosionsprodukte
Abfallnaher Versatz		Transporteigenschaften und geochemische Eigenschaften des abfallnahen Versatzes
Streckenversatz		Transporteigenschaften und geochemische Eigenschaften des Streckenversatzes

### 3.4.2.3 Rückhaltende Sicherheitsfunktionen (RSF)

Rückhaltende Sicherheitsfunktionen zielen auf den Einschluss von Radionukliden oder Verzögerung des Radionuklidtransportes ab. Dies kann auch indirekt erreicht werden, etwa durch Behinderung des Lösungszutritts zu Komponenten.

#### 6) RSF\_DW: Dichtwirkung: Behinderung von Fluidbewegung

Diese Sicherheitsfunktion bezieht sich auf die Permeabilitäten von Materialien für fluide Phasen. Hierbei sind zwei Zielsetzungen zu unterscheiden: Die Behinderung des Lösungszutritts in das Endlager zur Hinauszögerung von Korrosions- und Lösungsprozessen und die Behinderung des Radionuklidtransportes in der Flüssigkeits- oder Gasphase, sofern ein Lösungszutritt zu den Abfällen nicht verhindert werden konnte.

##### a) RSF\_DW Behinderung des Lösungszutritts

Diese Sicherheitsfunktion soll den Lösungsstrom zu den Abfällen behindern oder hinauszögern. Dabei können verschiedene Zielsetzungen identifiziert werden:

- Dauerhafte Verhinderung des Lösungszutrittes
- Hinauszögerung des Lösungszutrittes, bis die Wirksamkeit der langfristigen Barrieren erreicht ist
- Behinderung des Lösungszutritts zur Limitierung von Korrosionsraten

**Tab. 3.30** Charakteristische Prozesse und Parameter für die RSF\_DW-a der entsprechenden Komponenten

Komponente	Erwartetes Verhalten	Beispiele für charakteristische Parameter
Abfallbehälter	Verhinderung/Behinderung des Lösungszutritts zum Abfallprodukt infolge Dichtwirkung der Behälterwandungen.	Festigkeitseigenschaften Dicke der Behälterwandungen Korrosionsbeständigkeit Ausfallquote durch Fertigungsfehler
Abfallnaher Versatz	Behinderung des Lösungstransports	Permeabilität Korrosions- und Alterungsbeständigkeit
Streckenversatz	Behinderung des Lösungstransports	Permeabilität Korrosions- und Alterungsbeständigkeit Kontaktbündigkeit
Geotechnisches Bauwerk	Behinderung des Lösungstransports	Permeabilität Kontaktbündigkeit Korrosions- und Alterungsbeständigkeit
Einlagerungsbereich	Behinderung eines Lösungszutritts in das Endlagerbergwerk (eine RSF ist hier für das WG Kristallin evtl. nicht notwendig, könnte aber möglicherweise für einen Gebirgssaum um das Endlager ausgewiesen werden)	Permeabilität (Kluft und Matrix) Kapillardrücke (Kapillare Sperreffekte) Homogenität
ewG	Verhinderung/Behinderung eines Lösungszutritts in das Endlagerbergwerk	Permeabilität Kapillardrücke (Kapillare Sperreffekte) Homogenität Viskositäts-/Plastizitätseigenschaften (Selbstabdichtung)

**b) RSF\_DW Behinderung des Radionuklidtransportes**

Diese Sicherheitsfunktion soll nach einem Ausfall der Behälterintegrität den Radionuklidtransport in der Flüssigkeits- oder Gasphase verhindern oder behindern. Im günstigsten Fall sollen die Radionuklide im Nahfeld der Behälter verbleiben. Die Sicherheitsfunktion bezieht sich nur auf die Behinderung des Radionuklidtransportes durch geringe Permeabilitäten. Andere rückhaltende Prozesse, wie z. B. die Sorption, werden in anderen Sicherheitsfunktionen behandelt.

**Tab. 3.31** Charakteristische Parameter für die RSF\_DW-b der entsprechenden Komponenten

Komponente	Erwartetes Verhalten	Beispiele für charakteristische Parameter
Abfallbehälter	Verhindern oder Behinderung des Radionuklidtransports	Festigkeitseigenschaften Dicke der Behälterwandungen Korrosionsraten Ausfallquote durch Fertigungsfehler
Abfallnaher Versatz	Behinderung des Radionuklidtransports	Permeabilität, Diffusivität (Diffusionskonstante)
Streckenversatz		
Geotechnisches Bauwerk		Permeabilität, Diffusivität (Diffusionskonstante) Kontaktbündigkeit Korrosions- und Alterungsbeständigkeit
Einlagerungsbereich		Mächtigkeit Permeabilität (Kluft und Matrix) Kapillardrücke (Kapillare Sperreffekte) Homogenität Diffusivität
ewG		Mächtigkeit Permeabilität Zweiphasenflusseffekte Diffusivität

### 7) RSF\_RT: Speicherung: Hinauszögerung des Fluid- und Radionuklidtransports durch Porenspeicherräume

Die Sicherheitsfunktion „Speicherung“ dient der Hinauszögerung des Transports von Flüssigkeit oder Gasen durch Bereitstellung von Porenspeicherräumen. Speicherräume können z. B. durch Infrastrukturbereiche geschaffen werden, die mit nicht kompaktierbarem Versatz verfüllt sind. In der Regel handelt es sich um entsättigte Porenräume, die durch das Entweichen oder die Kompression des Gases weitere Fluide (Gas oder Flüssigkeit) aufnehmen können.

Behälter weisen ein zu vernachlässigendes geringes Speichervolumen auf. Deshalb wird der Komponente Behälter keine Schutzfunktion in Bezug auf das Speichervolumen zugewiesen. Der verfügbare Porenraum in geotechnischen Materialien wird als Speicherraum ebenfalls vernachlässigt.

### a) RSF\_RT Verzögerung einer Fluidbewegung

Sicherheitskonzepte können eine Verzögerung des Lösungszutritts ins Endlagerbergwerk vorsehen, um den Druckanstieg im Endlager zu limitieren oder den Zutritt korrosiver Lösungen zu den technischen Barrieren solange zu verzögern, bis diese ihre volle Dichtwirkung erreicht haben. Dies kann u. a. durch den Einsatz von Porenspeicherräumen erfolgen. Porenspeicherräume können jedoch auch für eine Gasphase vorgesehen werden, um das Entweichen der Gase aus dem Endlager zu verzögern (z. B. relevant für kurzlebige volatile Radionuklide) oder den Gasdruckaufbau zu limitieren.

**Tab. 3.32** Charakteristische Parameter für die RSF\_RT-a der entsprechenden Komponenten

Komponente	Erwartetes Verhalten	Beispiele für charakteristische Parameter
Speicherraum	Verzögerung der Bewegung einer fluiden Phase	Speichervolumen

### b) RSF\_RT Hinauszögerung des Radionuklidtransportes

Durch Porenspeicherräume kann auch der Transport der in den Fluiden enthaltenen Radionuklide verzögert werden. In Speicherräumen können Verdünnungseffekte auftreten, die ihrerseits für eine Transportverzögerung sorgen.

**Tab. 3.33** Charakteristische Parameter für die RSF\_RT-b der entsprechenden Komponenten.

Komponente	Erwartetes Verhalten	Beispiele für charakteristische Parameter
Speicherraum	Verzögerung durch Speicherung oder Verdünnung	Speichervolumen

### 8) RSF\_AT: Retention und Attenuation: Verzögerung und Dämpfung von Radionuklidkonzentrationsspitzen

Der Transport von Radionukliden wird in der Regel von Prozessen begleitet, die eine Verzögerung und Verteilung der Radionuklide bewirken. Dies hat zur Folge, dass Radionuklidspitzenkonzentrationen abgedämpft werden.



### a) RSF\_AT Sorption

Unter Sorption wird die Anreicherung eines Stoffes an einer Grenzfläche (Adsorption) zwischen Phasen oder innerhalb einer Phase (Absorption) eines anderen Stoffes durch physikalische oder chemische Wechselwirkungen verstanden. Sorption kann im Wirtsgestein und an geotechnischen Materialien wie Beton oder Bentonit sowie an Korrosionsprodukten stattfinden.

**Tab. 3.34** Charakteristische Parameter für die RSF\_AT-a der entsprechenden Komponenten

Komponente	Erwartetes Verhalten	Beispiele für charakteristische Parameter
Abfallbehälter	Verzögerung der Radionuklid- ausbreitung durch Sorption am jeweiligen Material	Sorptionskapazität (Kd-Wert) der Behälter- korrosionsprodukte, Mineralbestand der Behälterkorrosionspro- dukte chemische Eigenschaften und Zusammen- setzung des Porenwassers am Behälter
Abfallnaher Versatz		Sorptionskapazität (Kd-Wert) des Versatz- materials Mineralbestand des Versatzmaterials chemische Eigenschaften und Zusammen- setzung des Porenwassers im Versatz
Streckenversatz		
Geotechnisches Bauwerk		Sorptionskapazität (Kd-Wert) des Baumateri- als Mineralbestand des Baumaterials chemische Eigenschaften und Zusammen- setzung des Porenwassers Sorptionskapazität (Kd-Wert) und Mineral- bestand der korrodierten oder alterierten Materialien
Einlagerungs- bereich		Sorptionskapazität (Kd-Wert) des Wirtsgesteins (Matrix/Klüfte) Mineralbestand des Wirtsgesteins (Matrix/Klüfte) chemische Eigenschaften und Zusammensetzung der Lösung
ewG		Sorptionskapazität (Kd-Wert) des Wirtsgesteins (Matrix/Klüfte) Mineralbestand des Wirtsgesteins (Matrix/Klüfte) chemische Eigenschaften und Zusammensetzung der Lösung

### b) RSF\_AT Verhinderung des Kolloidtransports

Kolloide sind Tonmineralplättchen, an die Radionuklide adsorbiert und transportiert werden können. Der kolloidale Radionuklidtransport ist hauptsächlich bei Endlagerkon-

zepten relevant, die tonige Materialien (z. B. Bentonit) verwenden. In klüftigen Gesteinen mit guter Klüftvernetzung können Kolloide über weite Strecken transportiert werden. Die Verhinderung einer Kolloidbildung ist daher als Beitrag zur Retention von Radionukliden anzusehen. Die Sicherheitsfunktion soll einerseits die Kolloidbildung und andererseits den Transport gebildeter Kolloide vermindern. Dies wird durch ein geeignetes geochemisches und hydraulisches Umfeld gewährleistet.

**Tab. 3.35** Charakteristische Parameter für die RSF\_AT-b der entsprechenden Komponenten

Komponente	Erwartetes Verhalten	Beispiele für charakteristische Parameter
Abfallnaher Versatz	Verzögerung der Radionuklid- ausbreitung durch Kolloidfilte- rung	Porenradienverteilung im Material, Materialdichte
Streckenversatz		
Geotechnisches Bauwerk		
Einlagerungs- bereich		
Einlagerungs- bereich	Gewährleistung geeigneter geo- chemischer Bedingungen zur Verhinderung der Kolloidbildung	Chemische Indikatoren der Lösung
ewG	Verzögerung der Radionukli- dausbreitung durch Kolloidfilte- rung	Porenradienverteilung im Material, Materialdichte

### c) RSF\_AT Löslichkeitsbegrenzung

Die Sicherheitsfunktion soll die Begrenzung der Radionuklid-  
ausbreitung durch Löslichkeitsgrenzen gewährleisten. Hier ist zu beachten, dass das chemische Milieu je nach Material- und Lösungszusammensetzung innerhalb der verschiedenen Komponenten unterschiedlich sein kann. Reduzierende Verhältnisse und mehr oder weniger neutrale pH-Bedingungen führen in der Regel zu sehr geringen Löslichkeiten von Actiniden /FIS 10/.

**Tab. 3.36** Charakteristische Parameter für die RSF\_AT-c der entsprechenden Komponenten

Komponente	Erwartetes Verhalten	Beispiele für charakteristische Parameter
Abfallbehälter	Limitierung der Radionuklidkonzentrationen durch Löslichkeitsbegrenzung	Lösungszusammensetzung Temperatur der Lösung chemische Zusammensetzung der Komponenten (Festphase) pH-Wert, Eh-Wert
Abfallnaher Versatz		
Streckenversatz		
Geotechnisches Bauwerk		
Einlagerungsbereich		
ewG		

**d) RSF\_AT Hydrodynamische Dispersion**

Die hydrodynamische Dispersion umfasst die molekulare Diffusion (Brown'sche Molekularbewegung) und die mechanische Dispersion (unterschiedliche Längen der Fließwege). Der Prozess führt zu einer Dispersion der Radionuklide und damit zu einer Abdämpfung von Konzentrationsspitzen.

**Tab. 3.37** Charakteristische Parameter für die RSF\_AT-d der entsprechenden Komponenten

Komponente	Erwartetes Verhalten	Beispiele für charakteristische Parameter
Einlagerungsbereich	Verringerung der Radionuklidkonzentration	Mächtigkeit, Kluftweite und Vernetzung, Dispersivität, Tortuosität
Deckgebirge		

**e) RSF\_AT Matrixdiffusion**

Matrixdiffusion bezeichnet die Diffusion von Partikeln aus permeablen Klüften in die Porenräume des Gesteins. Dieser Prozess kann beim Transport im kristallinen Wirtsgestein eine Rolle spielen.

**Tab. 3.38** Charakteristische Parameter für die RSF\_AT-e der entsprechenden Komponenten

Komponente	Erwartetes Verhalten	Beispiele für charakteristische Parameter
Einlagerungsbereich	Radionuklidverzögerung durch Matrixdiffusion	Diffusionskoeffizienten diffusionszugängliche Porosität Tortuosität und Konstriktivität Anisotropie

**f) RSF\_AT- Dichteschichtung Grundwasser**

Grundwasserleiter können eine Dichteschichtung aufgrund einer variablen Mineralisation aufweisen. Dies trifft insbesondere auf das Grundwasser im Hangenden von Salzgesteinen zu. Grenzschichten, an denen ein scharfer Dichtesprung stattfindet, können eine Transportbarriere für gelöste Radionuklide darstellen.

**Tab. 3.39** Charakteristische Parameter für die RSF\_AT-f der entsprechenden Komponenten

Komponente	Erwartetes Verhalten	Beispiele für charakteristische Parameter
Einlagerungsbereich	Verzögerung des Radionuklidtransportes	Verweildauer und hydrochemische Zusammensetzung (Lösungskonzentration) des Porenwassers Löslichkeit der Kontaktgesteine
ewG		
Deckgebirge		

**9) RSF\_LT: Limitierung der Radionuklidfreisetzung aus dem Abfall**

Die Eigenschaften der Abfälle selbst stellen unveränderliche Randbedingungen für jedes Endlagerkonzept dar. Die sicherheitsgerichteten Eigenschaften der Abfallprodukte sind nicht notwendigerweise für die Endlagerkonzepte eingestellt worden. So verfügt das Abfallprodukt bereits über Abfall-immanente Eigenschaften oder die Eigenschaften des Abfallproduktes wurden für Zwecke hergestellt, die z. B. für die Zwischenlagerung, den Transport oder die Einlagerungshandhabung wesentlich sind /FIS 10/.

In /FIS 10/ werden die Sicherheitsfunktionen des Abfalls in der Abwägung nicht betrachtet. Abfalleigenschaften liegen allen Endlagersystemen als gleiche und unveränderliche Randbedingung zu Grunde. Ein wesentlicher Grund für die Nichtbetrachtung war auch, dass von den rückhaltenden Eigenschaften des Abfalls in der Regel kein

Kredit bei Sicherheits- und Endlagerkonzepten genommen wurde. Wenn die Eigenschaften des Abfalls genau bekannt sind, ist dies im Prinzip aber denkbar. Diese Sicherheitsfunktionen werden für das KBS-3-Konzept zudem nach einem Behälterversagen relevant. Deshalb sind diese Sicherheitsfunktionen hier in der Liste der SF aufgeführt.

**a) RSF\_LT Niedriges radiologisches Inventar**

Das endzulagernde radiologische Inventar ist eine unveränderliche Anfangsbedingung und nicht abhängig vom Endlagerkonzept. Es wird daher keiner Bewertung unterzogen. Es ist zu diskutieren, ob es sich tatsächlich um eine Sicherheitsfunktion i.e.S. handelt, da diesbezüglich keine konkreten sicherheitskonzeptionellen Anforderungen bestehen.

**b) RSF\_LT Günstige Freisetzungseigenschaften**

Die Freisetzungseigenschaften der Abfälle kann für verschiedene Endlagerkonzepte bzw. Wirtsgesteine unterschiedlich sein. Denkbar wären unterschiedliche geochemische Milieus oder Konditionierungsmaterialien, welche die Freisetzung bzw. Mobilisierung der Radionuklide beeinflussen können.

**Tab. 3.40** Charakteristische Parameter für die RSF\_LT-b der entsprechenden Komponenten

Komponente	Erwartetes Verhalten	Beispiele für charakteristische Parameter
Abfall	Verzögerung der Radionuklidfreisetzung	Geringer IRF-Anteil Geringer Anteil gasförmiger Radionuklide Permeabilität, Homogenität, Rissfreiheit der Abfallmatrix Integrität der Hüllrohre geringe Radiolyse

Tab. 3.41 Zusammenfassende Tabelle der Sicherheitsfunktionen

		Abfall	Behälter	Abfall-naher Versatz	Streckenversatz	Geotechnisches Bauwerk	Speicher	ELB	EWG	DG
<b>Integritätserhaltende Sicherheitsfunktionen (ISF)</b>										
<b>1) ISF_MS:</b> Mechanische Stabilisierung	a) Stützwirkung: Aufnahme isostatischen Drucks			x	x	x		x	x	
	b) Widerlager: Aufnahme gerichteten Drucks	x	x	x	x	x				
<b>2) ISF_PS:</b> Stabilisierung gegen hydraulisch-chemische Prozesse	a) Korrosionsschutz: Schutz vor Degradation	x	x	x	x	x		x	x	
	b) Erosionsschutz: Schutz vor Subrosion und Erosion			x	x			x	x	x
	c) Gewährleistung des Quellvermögens			x	x	x		x	x	
<b>3) ISF_VG:</b> Gasdruckbegrenzung: Vermeidung integritätsgefährdender Gasdrücke	a) Begrenzung der Gasbildung	x	x	x	x			x	x	
	b) Schadloose Ableitung von Gasen			x	x			x	x	
<b>4) ISF_VT:</b> Temperaturbegrenzung: Vermeidung integritätsgefährdender Temperaturen	a) Thermische Begrenzung der Behälterbeladung	x								
	b) Schadloose Ableitung der erzeugten Zerfallswärme nach außen		x	x	x	x		x	x	

		Abfall	Behälter	Abfall-naher Versatz	Streckenversatz	Geotechnisches Bauwerk	Speicher-räume	ELB	EWG	DG
<b>5) ISF_VU:</b> Unterkritikalität: Vermeidung von Rekritikalität	a) Unterkritische Behälterbe-ladung	x								
	b) Verhinderung von sekundä-ren Rekritikalitätszuständen	x	x	x	x					
<b>6) RSF_DW:</b> Dichtwirkung: Be-hinderung von Flu-idbewegungen in-folge hydraulischen Widerstands	a) Verhinderung des Lö-sungszutritts		x	x	x	x		x	x	
	b) Behinderung des Transpor-tes gelöster Radionuklide		x	x	x	x		x	x	





### **3.5 Relevanzwichtung der Sicherheitsfunktionen für das Wirtsgestein Kristallin**

Im Vorhaben VerSi I wurde nach /FIS 10/ davon ausgegangen, dass „Sicherheitsfunktionen mit unterschiedlichem Gewicht zur Erfüllung der Globalanforderung des Radionuklideinschlusses im ewG im Verbund mit technischen und geotechnischen Barrieren beitragen“. Den Sicherheitsfunktionen muss demnach eine unterschiedliche Relevanz zugeordnet werden. Unter Berücksichtigung des Standortauswahlgesetzes und des Wirtsgesteins Kristallin, muss die Globalanforderung nun „Radionuklideinschluss oder Radionuklidrückhaltung durch den ewG oder die technischen Barrieren“ lauten.

#### **3.5.1 Wirkungsphasen für die Relevanzwichtung**

Sicherheitsfunktionen der verschiedenen Endlagerkomponenten können eine zeitabhängig unterschiedliche Relevanz besitzen. Im Vorhaben VerSi I wurden zwei Phasen unterschieden, eine sog. Übergangsphase und eine stationäre Langzeitphase. Im Rahmen der durchgeführten Bewertung für Ton- und Salzgestein von einer Übergangsphase bis 10.000 Jahre nach Endlagerverschluss und von einer darauf folgende stationären Langzeitphase von 10.000 Jahren bis zum Ende des Nachweiszeitraums ausgegangen. Eine Relevanzwichtung wurde für jeden dieser Zeiträume vorgenommen.

Endlagerkonzepte für Ton- oder Salzgesteine sehen vor, dass die geotechnischen Barrieren den Einschluss des Radionuklidinventars in der Übergangsphase gewährleisten (z. B. /FIS 13/). Danach wird der Einschluss durch die geologischen Barrieren gewährleistet. Sicherheitskonzepte für das Wirtsgestein Kristallin basieren dagegen im Wesentlichen auf technischen und geotechnischen Barrieren (siehe Kap. 3.2). Hier sollen insbesondere die Behälter und die geotechnischen Barrieren den Radionuklideinschluss gewährleisten. Daraus entstehen unter Umständen eine andere Anzahl und auch Länge der Wirkungsphasen, die für die Erfüllung der Globalanforderung und der Relevanzbewertung bedeutsam sind. Für das KBS-3-Konzept werden nach /SKB 11a/, /SKB 11b/ mehrere Zeitabschnitte unterschieden:

Die regulatorischen Anforderungen der schwedischen SSM sehen im Wesentlichen eine Sicherheitsanalyse für 1.000 Jahre (quantitativ), für 10.000 Jahre sowie eine Risikoanalyse für mindestens 100.000 Jahre (bzw. einen Glazialzyklus) vor.

Darüber hinaus wird empfohlen, eine Risikoanalyse bis maximal 1.000.000 Jahre durchzuführen, sofern es aus bestimmten Gründen sinnvoll erscheint. Ergänzend soll eine Bewertung der Schutzfunktion des Endlagers nach 100.000 Jahren neben der Risikoanalyse auf weiteren Indikatoren (wie Barrierenfunktionen, Radionuklidströmen und –konzentrationen in der Umwelt) basieren.

Die Betrachtung der Gesamtentwicklung des Endlagersystems, die sich aus den Einwirkungen vieler Prozesse ergibt und auch in unterschiedlichen Szenarien für das Endlagersystem münden kann, ergibt ebenfalls relevante Zeitabschnitte. In /SKB 11b/ werden mehrere Zeitabschnitte unterschieden:

- Errichtung des Bergwerks und Betriebsphase: mehrere 10er bis 100 Jahre
- Initiale Periode nach Verschluss und initiale Periode des gemäßigten Klimas:
  - 1.000 Jahre
  - ca. 9.400 Jahre
- Einen Glazialzyklus: 120.000 Jahren
- Weitere sieben Glazialzyklen: jeweils 120.000 Jahre
- Globale Klimaerwärmung: 120.000 Jahre

Für jeden dieser Zeitabschnitte bzw. Szenarien erfolgt in /SKB 11b/ eine Prüfung, inwieweit sicherheitsrelevante Einflüsse auf die Sicherheitsfunktionen bestehen.

Insgesamt legt das schwedische Konzept damit eine Vierteilung (jeweils bis 1.000, ca. 10.000, ca. 100.000 und 1.000.000 Jahre) des Nachweiszeitraums nahe (wenn man die Betriebsphase außer Acht lässt).

Hinsichtlich des Vorhabens VerSi II und der Anwendung der Abwägungsmethode wäre die Aufteilung in mehr als zwei Phasen kein Widerspruch. Eine Relevanzbewertung ließe sich ohne Probleme auch für mehr als zwei Phasen durchführen. Die Ausweisung von potenziellen Robustheits-Relevanz-Defiziten nach der weiterentwickelten Methode mittels Pivot-Tabelle (siehe Kap. 3.3.3) ist ebenso möglich. In Kap. 3.3.4 ist beispielhaft eine Möglichkeit der weiterführenden datenbankgestützten Analyse für zwei unterschiedliche Wirkungsphasen aufgeführt. Auch in diesem Fall wäre eine Erweiterung auf mehr als zwei Wirkungsphasen möglich.

### 3.5.2 Relevanzwichtung der Sicherheitsfunktionen

Wie bereits mehrfach erwähnt basieren Sicherheitskonzepte für das Wirtsgestein Kristallin auf technischen und geotechnischen Barrieren die den Radionuklideinschluss gewährleisten.

Im Rahmen der Abwägungsmethode erlangen die Sicherheitsfunktionen eine hohe Relevanz die zur Rückhaltung der Radionuklide einen hohen Beitrag leisten (RSF). Die Sicherheitsfunktionen, die die Integrität der Komponenten mit rückhaltender Sicherheitsfunktion gegenüber Einwirkungen schützen (ISF), können ebenfalls einer Relevanzwichtung unterzogen werden, jedoch ist dies im Rahmen der VerSi-Methode nicht zwingend erforderlich /FIS 10/.

Wie in Kap. 3.5.1 erwähnt erfolgt in /SKB 11b/ eine Betrachtung der Auswirkung vieler relevanter Prozesse auf die Sicherheitsfunktionen. Eine Wichtung der Sicherheitsfunktionen für die verschiedenen Wirkungsphasen wird in /SKB 11b/ nicht explizit vorgenommen, jedoch wird auch davon ausgegangen, dass Sicherheitsfunktionen zu einem späten Zeitpunkt keine Bedeutung mehr haben können bzw. müssen.

Ohne konkreten Standort und ohne ein bereits vollständig durchdachtes Endlagerkonzept für einen Standort im Wirtsgestein Kristallin, kann eine Relevanzwichtung an dieser Stelle nur eingeschränkt erfolgen und dementsprechend ungenau sein. Die Relevanzwichtung orientiert sich dabei am KBS-3-Konzept.

Für ein auf technischen Barrieren fußendes Sicherheitskonzept im Kristallin sind die RSF der Abfallmatrix und des Behälters von besonders hoher Relevanz. In Bezug auf die Wirkungsphasen gilt diese Einschätzung für die Zeiträume, in welchen der Behälter gemäß dem KBS-3-Sicherheitskonzept intakt bleiben muss. Zudem übernimmt der Buffer eine signifikante rückhaltende Schutzfunktion, um den Austrag der Radionuklide nach einem potentiellen Behälterausfall zu behindern. Da der Buffer bereits mit dem Wirtsgestein in Kontakt steht, wird die rückhaltende Sicherheitsfunktion des Tunnel Backfills im Vergleich zum Buffer als geringer eingeschätzt. Dem Einlagerungsbereich wird bzgl. der Rückhaltung eine geringe Relevanz zugeordnet („C“ bis „E“), je nach spezifischer Sicherheitsfunktion. Den geotechnischen Bauwerken, welche den Streckenversatz in Position halten und so eine Widerlagerfunktionen ausüben, wird eine nur geringe Relevanz zur Rückhaltung zugeordnet. Ein möglicherweise vorhandener Speicherraum im Endlagerkonzept trägt für das Wirtsgestein Kristallin mit hoher Wahr-

scheinlichkeit ebenfalls nicht entscheidend zur Rückhaltung der Radionuklide bei, bezüglich der Speicherfunktion bestehen keinerlei Anforderungen im KBS-3-Sicherheitskonzept.

Die tatsächliche Einschätzung der Relevanz muss anhand der komponentenspezifischen rückhaltenden Sicherheitsfunktionen erfolgen, die ohne standortspezifisches Sicherheits- und Endlagerkonzept wenig aussagekräftig ist. Trotzdem werden auch hier grobe Orientierungswerte angegeben, mit denen versucht wird, einzelnen rückhaltenden Prozessen, die für die Komponenten mehr oder weniger relevant sein können, Rechnung zu tragen. Die vorläufige und mit den o. g. Einschränkungen verbundene Wichtung der komponentenspezifischen rückhaltenden Sicherheitsfunktionen ist in Tab. 3.42 dargestellt.

**Tab. 3.42** Beispielhafte Relevanzwichtung der komponentenspezifischen rückhalten-  
den Sicherheitsfunktionen für Kristallin (KBS-3-Konzept)

Sicherheitsfunktion		Komponente	Relevanz- wichtung (beispielhaft)
Kategorie	spezifisch	Allgemein (Begriff KBS-3-Konzept)	
<b>RSF_DW – Dichtwirkung</b>	a) Behinderung des Lösungszu- tritts	Abfallbehälter (Canister)	A
		Abfallnaher Versatz (Buffer)	A
		Streckenversatz (Tunnel Backfill)	B
		Geotechnisches Bauwerk (Plugs)	E
		Einlagerungsbereich (Geosphere)	C
	b) Behinderung des Radionuklid- transportes	Abfallbehälter (Canister)	A
		Abfallnaher Versatz (Buffer)	A
		Streckenversatz (Tunnel Backfill)	B
		Geotechnisches Bauwerk (Plugs)	E
		Einlagerungsbereich (Geosphere)	D
<b>RSF_RT - Speicherung</b>	a) Verzögerung einer Fluidbewe- gung	Speicherraum (z. B. crushed granite) Nicht im Sicherheitskonzept gefordert	E
	b) Hinauszöge- rung des Radio- nuklidtransportes	Speicherraum (z. B. crushed granite) Nicht im Sicherheitskonzept gefordert	E
<b>RSF_AT – Retention und Attenua- tion</b>	a) Sorption	Abfallbehälter (Canister)	C
		Abfallnaher Versatz (Buffer)	A
		Streckenversatz (Tunnel Backfill)	C
		Geotechnisches Bauwerk (Plugs)	E
		Einlagerungsbereich (Geosphere)	D
	b) Verhinderung des Kolloidtrans- ports	Abfallnaher Versatz (Buffer)	A
		Streckenversatz (Tunnel Backfill)	C
		Einlagerungsbereich (Geosphere)	D

	c) Löslichkeitsbegrenzung	Abfallbehälter (Canister)	A
		Abfallnaher Versatz (Buffer)	A
		Streckenversatz (Tunnel Backfill)	C
		Geotechnisches Bauwerk (Plugs)	E
		Einlagerungsbereich (Geosphere)	D
	d) Hydrodynamische Dispersion	Streckenversatz (Tunnel Backfill)	D
		Einlagerungsbereich (Geosphere)	C
	e) Matrixdiffusion	Einlagerungsbereich (Geosphere)	D
	f) Dichteschichtung Grundwasser	Deckgebirge	D
	<b>RSF_LT</b>	b) Günstige Freisetzungseigenschaften	Abfallmatrix

### 3.6 Überprüfung des methodischen Änderungsbedarfes für Kristallinstandorte unter geringpermeabler Überdeckung

Im Folgenden wird der Frage nachgegangen, ob, und wenn ja, in welcher Weise die Abwägungsmethode verändert werden muss, um Kristallinstandorte mit geringpermeabler Überdeckung einbeziehen zu können. Die Beantwortung dieser Frage ist davon abhängig, welche Bedeutung der Verfahrensbetreiber der geringpermeablen Überdeckung im Rahmen seines Sicherheitskonzeptes nachweist. Hier lassen sich grundsätzlich drei Fälle unterscheiden:

1. Die geringpermeable Überdeckung wird ignoriert.
2. Die geringpermeable Überdeckung wird im Sicherheitskonzept als Endlagerkomponente geführt und besitzt eine rückhaltende Sicherheitsfunktion.
3. Die geringpermeable Überdeckung ist nicht Teil des Sicherheitskonzeptes, ist also keine Endlagerkomponente und besitzt keine Sicherheitsfunktion. Die geringpermeable Überdeckung stellt jedoch eine Sicherheitsreserve dar, die nicht ignoriert, sondern als Bonus des Standortes gewertet werden soll.

Auf diese drei Möglichkeiten soll im Folgenden gesondert eingegangen werden.

### **Fall 1: Die geringpermeable Überdeckung wird ignoriert**

In diesem Fall ergibt sich verständlicherweise kein Änderungsbedarf für die Abwägungsmethode. Es ist jedoch darauf hinzuweisen, dass diese Option nicht zu empfehlen ist, da sie Standorteigenschaften bewusst ignoriert, die eine Rückhaltung von Radionukliden bewirken.

### **Fall 2: Die geringpermeable Überdeckung besitzt eine rückhaltende Sicherheitsfunktion**

In diesem Fall kann die geringpermeable Überdeckung einem ewG gleichgesetzt werden, und muss dann die für den ewG angegebenen Anforderungen und Sicherheitsfunktionen erfüllen. Die Abwägungsmethode muss zu diesem Zwecke nicht geändert werden, da der ewG hier als normale Endlagerkomponente mit rückhaltender Sicherheitsfunktion geführt wird. Allerdings ist auf die Konsequenzen dieser Vorgehensweise hinzuweisen:

- Wie in Kapitel 3.3.5 erläutert, wird eine als ewG ausgewiesene geringpermeable Überdeckung niemals eine besondere Aufwertung des Standortes gegenüber einem anderen bewirken. Das liegt daran, dass die Abwägungsmethode das Merkmal der Robustheit nicht relativ zu anderen Endlagersystemen bewertet, sondern relativ zur eigenen Auslegung des Endlagersystems (im Sinne einer Wahrscheinlichkeit, dass die relevanten Barrieren ihre Sicherheitsfunktion gemäß Auslegung erfüllen).
- Wenn eine geringpermeable Überdeckung als zusätzliche Komponente zu einem bereits vorhandenen ewG definiert wird, um durch die dadurch entstehende Redundanz eine zusätzliche Sicherheit zu erzielen, so wird die dadurch erzielte Robustheitserhöhung des Systems bei der Relevanz-Robustheits-Bewertung nicht sichtbar. Wenn die Sicherheitsfunktion der geringpermeablen Überdeckung eine erhöhte Relevanz und geringe Robustheit besitzt, kann sie sogar die Gesamtbewertung des Systems verschlechtern.

Infolge dessen sollte überprüft werden, ob es zur Erzielung der Genehmigungsfähigkeit des Endlagers zwingend erforderlich ist, die geringpermeable Überdeckung mit Sicherheitsfunktionen auszustatten. Sollte dies nicht erforderlich sein, läge der

Fall einer Überdimensionierung vor, der vermieden werden sollte, weil die zu vergleichenden Endlagerkonzepte sich hinsichtlich der Strenge ihrer Auslegung auf Augenhöhe befinden müssen (siehe dazu auch Kapitel 2.3.3).

- Der Robustheitsgewinn für das Gesamtsystem, der durch die geringpermeable Überdeckung erzielt wird, kann, wie in Kapitel 3.3.5 beschrieben wurde, in einem gesonderten Verfahrensschritt gewürdigt werden, bei dem allgemeine Robustheitsmerkmale eines Systems verglichen werden. Dies entspricht dem anschließend zu besprechenden Fall 3.

Für die geringpermeable Überdeckung müssen keine weiteren rückhaltenden Sicherheitsfunktionen definiert werden. Die rückhaltenden Sicherheitsfunktionen mit ewG-Bezug, genauer die rückhaltenden Sicherheitsfunktionen zur Dichtwirkung bzw. zur Retention und Attenuation, können auf eine geringpermeable Deckschicht übertragen werden. Es bedarf keiner grundsätzlichen Erweiterung des Satzes an Sicherheitsfunktionen, um Sicherheitsfunktionen für eine geringpermeable Überdeckung zu definieren. Je nach Art der Überdeckung unterscheidet sich jedoch die Relevanz einzelner rückhaltender Sicherheitsfunktionen. Beispielsweise würde die Sorption bei einer salinaren Deckschicht eine untergeordnete Rolle spielen, während sie bei einer tonigen Deckschicht von Bedeutung wäre.

### **Fall 3: Die geringpermeable Überdeckung ist nicht Teil des Sicherheitskonzeptes**

Der Änderungsbedarf für diesen Fall wurde bereits in Kapitel 3.3.5 dargestellt. Auch wenn die geringpermeable Überdeckung nicht Teil des Sicherheitskonzeptes ist, kann sie dennoch als Sicherheitsreserve beim Standortvergleich berücksichtigt werden. Hierzu ist die in Kapitel 3.3.5 beschriebene Erweiterung der Abwägungsmethode notwendig, da Sicherheitsreserven, die dem Standort und nicht einzelnen Sicherheitsfunktionen zugewiesen sind, nicht im Rahmen der Relevanz-Robustheits-Bewertung für einzelne Sicherheitsfunktionen behandelt werden können.

Die Erweiterung des Verfahrens besteht in einer Dokumentation der Standortaspekte, um sie beim direkten Standortvergleich in den verbal-argumentativen Vergleich einzubeziehen. Wie in Kapitel 3.3.5 ausgeführt, ist dies jedoch nur bei gleichen Sicherheitskonzepten und sehr ähnlichen Standorten möglich, etwa wenn der eine Kristallinstandort eine geringpermeable Überdeckung besitzt, der andere, ansonsten gleichartige, Kristallinstandort jedoch nicht. Hieraus folgt, dass geringpermeable Überdeckungen,



sofern sie nicht Bestandteil des Sicherheitskonzeptes sind, im Standortvergleich in der Regel nicht entscheidungsrelevant werden.

### **Fazit**

- Eine Erweiterung der Abwägungsmethode über den in Kapitel 3.3.5 gemachten Vorschlag hinaus, systemspezifische Robustheitsmerkmale zu dokumentieren und in einem zusätzlichen Verfahrensschritt zu bewerten, ist nicht notwendig.
- Sofern die geringpermeable Überdeckung rückhaltende Sicherheitsfunktionen zugewiesen bekommt, ist darauf zu achten, dass das Sicherheitskonzept nicht deutlich strenger angelegt ist, als es für das Erreichen der Genehmigungsfähigkeit erforderlich ist. Ansonsten entsteht das in Kapitel 2.3.3 ausgeführte Problem der Überdimensionierung, das zu einer ungerechtfertigt schlechten Bewertung des Standortes führen kann



#### **4            Untersuchung der Anwendbarkeit der Abwägungsmethode bei der Ermittlung von Standortregionen für übertägige Erkundung (Phase 1)**

In der ersten Phase des Standortauswahlverfahrens erfolgt nach §§ 13 und 14 des StandAG /STA 17a/ die Ausweisung von Standortregionen für die übertägige Erkundung. Diese erfolgt dabei (nach /STA 17a/) in folgenden Schritten, die vom Vorhabenträger auszuführen sind.

- Auf die in den Ländern und den zuständigen Behörden des Bundes vorhandenen geologischen Daten werden zunächst die geowissenschaftlichen Ausschlusskriterien (nach § 22 /STA 17a/) angewendet. Auf das verbleibende Gebiet sollen dann die Mindestanforderungen nach § 23 /STA 17a/ und in der Folge die geowissenschaftlichen Abwägungskriterien nach § 24 angewendet werden. Die daraus verbleibenden Gebiete sind die nach § 13 zu ermittelnden „Teilgebiete“.
- Für die ermittelten Teilgebiete werden repräsentative vorläufige Sicherheitsuntersuchungen (nach § 27 /STA 17a/) durchgeführt. Basierend auf diesen Ergebnissen und auf den geowissenschaftlichen Abwägungskriterien werden günstige Standortregionen ermittelt. Auch planungswissenschaftliche Abwägungskriterien sind nach § 25 anzuwenden. Für die ermittelten günstigen Standortregionen sollen jeweils Erkundungsprogramme erarbeitet werden.

Die Ergebnisse dieser Schritte sind dann dem Bundesamt für kerntechnische Entsorgungssicherheit jeweils zu übermitteln.

Es stellt sich die generelle Frage, ob die verbal-argumentative Abwägungsmethode, die sich an den Ergebnissen von Sicherheitsuntersuchungen zu konkreten Standorten orientiert, auf räumlich größere Bereiche, d. h. Standortregionen, ausgedehnt werden kann. Dabei ist anzumerken, dass zu Beginn des Vorhabens der Wortlaut des StandAG noch nicht abschließend bekannt war.

Im Allgemeinen ist festzustellen, dass die Abwägungsmethode in ihrer Gesamtheit (d. h. mit der Zielsetzung des Standortvergleichs) aus den nachfolgend genannten Gründen nicht dazu geeignet ist, auf größere Bereiche, d. h. Standortregionen, in der Phase 1 ausgedehnt zu werden.

## **Unterschiedliche Erkundungstiefe der Standorte**

Der Grund ist, dass die Abwägungsmethode aus dem Vorhaben VerSi I eine annähernd vergleichbare Untersuchungstiefe der einzelnen Standorte erfordert /FIS 10/. Diese Prämisse bleibt auch für die in diesem Vorhaben weiterentwickelte Abwägungsmethode (VerSi II) bestehen. In der ersten Phase des Standortauswahlverfahrens, in welcher Standortregionen aus den Teilgebieten ermittelt werden sollen, ist eine vergleichbare Untersuchungstiefe der verschiedenen Standortregionen unwahrscheinlich. Die unterschiedlichen Untersuchungstiefen können auch nicht im Rahmen der ersten Phase durch Standortuntersuchungen angeglichen werden, da hier auf bestehende Informationen zurückgegriffen werden soll und standortspezifische Erkundungen erst in späteren Phasen erfolgen sollen.

Die Anwendung der VerSi-Abwägungsmethode hätte zur Folge, dass die Robustheitsbewertung Standorte mit hoher Untersuchungstiefe besser ausfiele als für einen anderen Standort mit geringerer Untersuchungstiefe, da zum Beispiel die Charakterisierbarkeit und Prognostizierbarkeit im ersten Fall besser bewertet würde. Dies widerspräche dem StandAG, nach dem Regionen, die aufgrund unzureichender geologischer Daten nicht eingeordnet werden können (§ 13 /STA 17a), von der weiteren Suche nicht ausgeschlossen werden sollen.

## **Aussagekraft bei gleicher Untersuchungstiefe**

Besitzen zwei Standorte die gleiche Untersuchungstiefe, so ließe sich die Abwägungsmethode prinzipiell anwenden. Voraussetzung dafür ist, dass bereits generische Sicherheits- und Endlagerkonzepte vorliegen und für jede komponentenspezifische Sicherheitsfunktion eine Relevanzbewertung durchführbar ist.

Dennoch kann die Abwägungsmethode in der ersten Phase der Standorterkundung nur eingeschränkte Ergebnisse liefern:

- Wegen der Datenungleichheit können Sicherheitsfunktionen keine hohe Robustheitsbewertung erhalten.
- Die Bewertung der Relevanz ist vorläufig, da die Sicherheitskonzepte noch geändert oder konkretisiert werden können.
- Die Gesamtbewertung kann nicht zum Ausschluss eines Standortes führen, da alternative generische Sicherheits- bzw. Endlagerkonzepte möglich sind.

### **Unzulässigkeit von Teilbewertungen**

Standortmerkmale können einen Einfluss auf die Robustheit einzelner Barrieren haben. Für die betreffenden Barrieren könnte (mit in der ersten Phase der Standorterkundungen noch generischen Sicherheitskonzepten) zwar eine Relevanz-Robustheitsbewertung im Sinne der Abwägungsmethode durchgeführt werden, diese entspräche jedoch nicht den eigentlichen Zielsetzungen der Abwägungsmethode. Die VerSi-Abwägungsmethode zielt auf eine holistische Betrachtungsweise ab. Dem Standortvergleich soll ein Verständnis des Gesamtsystems und nicht nur das Verständnis einzelner Teilsysteme zu Grunde gelegt werden. Aus diesem Grund verbietet sich eine Anwendung der Abwägungsmethode ausschließlich anhand von Standortmerkmalen.



## **5 Schlussfolgerungen**

### **5.1 Zusammenfassung der Ergebnisse**

Im Folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse der behandelten Themengebiete zusammengefasst.

#### **5.1.1 Rückholung und Bergung**

Maßnahmen zur Erleichterung bzw. Gewährleistung der Rückholung und Bergung modifizieren das Endlagersystem und können verschiedene Endlagerkomponenten beeinflussen. Die Untersuchungen im Kapitel 2 kamen zu dem Schluss, dass jedoch eine Modifikation der VerSi-Methodik in Bezug auf das Wirtsgestein Salz nicht erforderlich ist. Folgende Schlussfolgerungen untermauern dies:

- Bei der Relevanzbewertung der Sicherheitsfunktionen ist die Relevanz für die Langzeitsicherheit und nicht die Relevanz für die Rückholung und Bergung zu betrachten.
- Es wurden keine zusätzlichen Sicherheitsfunktionen identifiziert, welche aus der Rückholung/Bergung abgeleitet werden könnten. Im Wesentlichen beeinflussen die Modifikationen des Endlagerkonzeptes allenfalls die Robustheit der Sicherheitsfunktionen, die Prozesse bleiben die Gleichen.
- Eine Modifikation bestehender Sicherheitsfunktionen aufgrund von Maßnahmen zur Ermöglichung der Rückholung und Bergung ist nicht erforderlich. Einflüsse werden bei der Robustheitsbewertung der Sicherheitsfunktionen berücksichtigt.
- Die Bewertung der Robustheit einer Sicherheitsfunktion muss sich an der notwendigen Auslegung von langzeitsicherheitsrelevanten Barrieren orientieren. Diese dürfen nicht überkonservativ ausgelegt werden.

Die vorherigen Schlussfolgerungen beziehen sich zunächst auf das Wirtsgestein Salz, diese sind höchstwahrscheinlich auf die anderen Wirtsgesteine übertragbar. Es sollten Untersuchungen zur Beeinflussung anderer Endlagerkonzepte durch Rückholbarkeit/Bergbarkeitskonzepte erfolgen.

### **5.1.2 Kristallingebiete**

Die tektonische Überprägung der deutschen Kristallinvorkommen ist allgemein höher als im Kristallin des Baltischen Schildes (z. B. Schweden). Trotzdem gibt es keine offensichtlichen Hinweise darauf, dass die in Schweden vorliegenden geologischen Randbedingungen des KBS-3-Konzeptes nicht auch in Deutschland existieren könnten. Insofern spricht nichts gegen eine Verwendung des KBS-3-Konzeptes als Referenzkonzept für das Vorhaben VerSi II. Es bestehen somit keine eindeutigen Hinweise auf notwendige Modifikationen des schwedischen KBS-3-Konzeptes aufgrund der spezifischen Beschaffenheit der deutschen Kristallinvorkommen.

### **5.1.3 Tiefe Grundwässer**

Die Zusammensetzung der Tiefengrundwässer in Deutschland wird stark von den lokalen geologischen Formationen beeinflusst. Daher muss für jeden potentiellen Endlagerstandort das Tiefengrundwasser einer Analyse und Bewertung unterzogen werden.

Für die Korrosion der Endlagerbehälter spielt die Zusammensetzung der Wässer im Nahfeld eine wichtige Rolle. Auch muss berücksichtigt werden, dass das am Standort vorliegende Tiefengrundwasser auch durch chemische Vorgänge wie z. B. Ionenaustauschprozesse mit Versatz- und Ausbaumaterialien eine Veränderung erfährt. Diese Veränderungen müssen bei der Betrachtung des Korrosionsverhaltens des Endlagerbehälters ebenfalls berücksichtigt werden.

Auch wenn die hydrochemische Beschaffenheit von Tiefengrundwässern in Deutschland deutlichen lokalen Schwankungen unterworfen ist, gibt es keine offensichtlichen Hinweise darauf, dass die in Schweden vorliegenden hydrochemischen Randbedingungen des KBS-3-Konzeptes nicht auch in Deutschland existieren könnten. Insofern spricht nichts gegen eine Verwendung des KBS-3-Konzeptes als Referenzkonzept für das Vorhaben VerSi II. Es bestehen somit keine eindeutigen Hinweise auf notwendige Modifikationen des schwedisch-finnischen KBS-3-Konzeptes aufgrund der spezifischen Beschaffenheit der deutschen Tiefengrundwasservorkommen.



## 5.1.4 Allgemeine Erweiterung der VerSi-Methode

### Komponentenmodell

- Es wurde ein modulares Komponentenmodell entwickelt, mit denen sich Verschlusskonzepte für verschiedene Wirtsgesteine in ihrer Grundstruktur abbilden lassen. Dieses Komponentenmodell kann verwendet werden, um den Aufbau von Endlagerkonzepten zu analysieren und zu vergleichen. Ziel ist eine Verbesserung des Verständnisses der zu vergleichenden Endlagersysteme.

### Dispersionsraum

- Für Endlagersysteme, die wesentlich auf technischen und geotechnischen Barrieren beruhen und keinen ewG aufweisen, wird empfohlen, bei der Robustheitsbewertung auch einen endlagernahen Teil des Kristallins, den *Dispersionsraum*, zu berücksichtigen. Dieser dient der großräumigen Mittelung lokaler Radionuklid-Konzentrationsspitzen. Die Dispersionsfunktion des Dispersionsraumes darf nicht als Ersatz oder Alternative für die Einschlussfunktion der technischen Barrieren angesehen werden.
- Dabei empfiehlt es sich, den im StandAG genannten Einlagerungsbereich als Dispersionsraum auszulegen. Der Einlagerungsbereich müsste dann so groß gewählt werden, dass er die Funktion eines Dispersionsraumes erfüllen kann.
- Die VerSi-Abwägungsmethode wird dahingehend erweitert, dass der Dispersionsraum (z. B. der Einlagerungsbereich) als eigenständige Endlagerkomponente geführt wird, dem unter anderem die rückhaltende Sicherheitsfunktion „Dispersion“ zugeordnet wird.
- Es ist grundsätzlich möglich, zusätzlich auch eine Gebirgszone im unmittelbaren, besser erkundbaren Saumbereich der Buffer innerhalb des Einlagerungsbereiches auszuweisen, an die ggf. hydraulische Anforderungen gestellt werden. Diese wäre dann als zusätzliche Komponente im Abwägungsverfahren zu berücksichtigen.

### Komponentenspezifische Sicherheitsfunktionen

- Die im Vorhaben VerSi I durchgeführte Zuordnung von Sicherheitsfunktionen zu einer exakt gleichen Anzahl von Komponenten bei allen Endlagersystemen entfällt. Stattdessen darf nun bei der Relevanz- und Robustheitsbewertung die Anzahl und Art der Komponenten für jedes Endlagerkonzept unterschiedlich sein.

- Bei der Relevanz- und Robustheitsbewertung wird unter einer Sicherheitsfunktion immer die Sicherheitsfunktion einer bestimmten Komponente verstanden. Sicherheitsfunktionen treten hier nie als abstrakte, von Komponenten losgelöste Einheiten auf.

### **Verzicht auf Rangzahlen**

Um die Gefahr unzulässiger Verrechnungen von Rangzahlen untereinander zu mindern, werden nun nicht-numerische Merkmalsausprägungen verwendet. Anstelle der Ausprägungen 1 bis 5 des Vorhabens VerSi I für die Spektren „niedrige Robustheit bis hohe Robustheit“ und „niedrige Relevanz bis hohe Relevanz“ werden nun die Ausprägungen „E“, „D“, „C“, „B“ und „A“ (mit ansteigender Relevanz/Robustheit) verwendet.

### **Einführung einer Pivot-Tabelle**

- Im Gegensatz zur Abwägungsmethode des Vorhabens VerSi I müssen bei Endlagersystemen in unterschiedlichen Wirtsgesteinen Art und Anzahl von Sicherheitsfunktionen und Komponenten nicht identisch sein.
- Zur Durchführung der Relevanz-Robustheits-Bewertung und für den Wirtsgesteins- bzw. Endlagerkonzeptvergleich wird die Verwendung einer Pivot-Tabelle empfohlen. Diese sortiert die komponentenspezifischen Sicherheitsfunktionen nach Relevanz-Robustheits-Kombinationen. Der Satz an komponentenspezifischen Sicherheitsfunktionen kann für jedes Endlagersystem individuell gestaltet und in der Pivot-Tabelle dargestellt werden
- In der Pivot-Tabelle ist auf den ersten Blick erkennbar, welches Endlagersystem bei seinen relevantesten Sicherheitsfunktionen die größten potenziellen Defizite besitzt, eine Information, die im Zusammenspiel mit weiteren Argumenten bei der Standortauswahl entscheidungsführend sein kann.
- Gleichzeitig zeigt die Ordnung nach Relevanz-Robustheits-Kombinationen die strukturellen Unterschiede der verschiedenen Endlagersystem auf, d. h. es wird sichtbar, auf welchen Sicherheitsfunktionen das jeweilige System maßgeblich beruht, um einen sicheren Einschluss zu erzielen. Dies fördert das grundsätzliche Verständnis zu den betreffenden Endlagersystemen.
- Die Pivot-Tabelle lässt sich um zusätzliche Informationen erweitern, so dass eine Datenbank entsteht, die sich nicht nur zur Identifikation von potenziellen Ro-

bustheitsdefiziten eignet, sondern weitere Funktionalitäten bietet, die für die Analyse der betreffenden Endlagersysteme genutzt werden können. Beispielsweise könnten durch das Einpflegen der Wirkungszeiträume der Barrieren in die Datenbank Übersichten erstellt werden, welche die lang- und kurzwirkenden Barrieren eines Endlagersystems darstellen. Dadurch entsteht ein Werkzeug, das dabei hilft, Aufbau und Wirkungsweisen der einzelnen Sicherheitskonzepte zu veranschaulichen.

### **Robustheitsvergleich für Endlagersysteme**

- Systemische (also nicht einzelnen Komponenten oder Sicherheitsfunktionen zugeordneten) Robustheitsmerkmale können außerhalb des Sicherheitskonzeptes vorliegen, etwa in Form von Sicherheitsreserven, die nicht im Sicherheitskonzept belastet werden. Dies könnte zum Beispiel eine geringpermeable Überdeckung sein, die nicht als Endlagerkomponente definiert wurde. Systemische Robustheitsmerkmale können auch aus dem Sicherheitskonzept selbst resultieren, zum Beispiel durch die Redundanz oder Diversität der vorgesehenen Barrieren.
- Systemische Robustheitsmerkmale sollen nicht innerhalb der Robustheitsbewertung der bisherigen Abwägungsmethode bewertet werden, da diese sich nur mit der Robustheit einzelner Sicherheitsfunktionen beschäftigt. Die Robustheit des Gesamtsystems sollte als solche kenntlich bleiben und nicht versteckt als Robustheit einer Sicherheitsfunktion ausgewiesen werden.
- Die Abwägungsmethode wird dahingehend erweitert, dass systemische Robustheitsmerkmale eines Endlagersystems im synoptischen Sachstandsbericht dargestellt werden. In einem zusätzlichen, verbal-argumentativen Verfahrensschritt können dann die systemischen Robustheitsmerkmale der Endlagersysteme in den Standortvergleich einfließen.

- Systemische Robustheitsmerkmale stellen einen Robustheits-„Bonus“ dar, der einem Endlagersystem jenseits der Robustheitsbewertung der Abwägungsmethode gewährt wird. Dieser Bonus kann bei einem Standortvergleich nur dann bewertet werden, wenn die zu vergleichenden Endlagersysteme weitgehend ähnlich sind. In der Konsequenz dürften systemische Robustheitsmerkmale von Endlagersystemen beim Standortvergleich nur in Ausnahmefällen relevant werden. Ein solcher Ausnahmefall wäre zum Beispiel gegeben, wenn zwei Endlagersysteme und Sicherheitskonzepte sich kaum unterscheiden, aber eines der Systeme eine geringere Überdeckung besitzt.

### **5.1.5 Identifikation, Klassifizierung und Relevanzwichtung der Sicherheitsfunktionen**

Die SFL I aus dem Vorhaben VerSi I wurde für das VerSi II Vorhaben mit der SFL des KBS-3 Konzeptes verglichen und ergänzt. Die SFL II wurde um weitere Sicherheitsfunktionen, wie dem *Erosionsschutz, Gewährleistung des Quellvermögens, der Begrenzung der Gasbildung, der Speicherung, der Hydrodynamischen Dispersion, der Matrixdiffusion und der Dichteschichtung im Grundwasser* ergänzt. Einige dieser Sicherheitsfunktionen (wie z. B. die Matrixdiffusion) waren bereits in der SFL I als charakteristische Parameter in Sicherheitsfunktionen indirekt berücksichtigt. Diese Prozesse sollten jedoch aufgrund ihrer „Wichtigkeit“ für den Radionuklidtransport bzw. die Retardation oder zur Verhinderung integritätsgefährdender Prozesse in der SFL II als eigenständige SF hervorgehoben werden.

Außer der Dispersion konnten keine zusätzlichen kristallin-spezifischen Prozesse aus dem KBS-3-Konzept identifiziert werden, welche zur Ableitung zusätzlicher Sicherheitsfunktionen geführt hätte. Alle Prozesse waren bereits indirekt in den charakteristischen Parametern der SFL I berücksichtigt. Um die Bedeutung einzelner Prozesse zu betonen, wurden für diese in der SFL II eigenständige SF definiert.

Die Anpassung der SFL machte eine Überarbeitung der Zuordnung der SF zu den jeweiligen Komponenten nötig (siehe Tabellen in Kap. 3.4.2.2 und 3.4.2.3). Zudem werden Beispiele für charakteristische Parameter in den jeweiligen Tabellen gegeben.

### 5.1.6 Überprüfung des methodischen Änderungsbedarfes für Kristallinstandorte unter geringpermeabler Überdeckung

Die Frage, ob die Abwägungsmethode verändert werden muss, um Kristallinstandorte mit geringpermeabler Überdeckung einbeziehen zu können, hängt davon ab, welche Bedeutung der Verfahrensbetreiber der geringpermeablen Überdeckung im Rahmen seines Sicherheitskonzeptes zuweist. Hier lassen sich grundsätzlich drei Fälle unterscheiden:

- **Fall 1:** Die geringpermeable Überdeckung wird ignoriert.

In diesem Fall ergibt sich kein Änderungsbedarf für die Abwägungsmethode. Es ist darauf hinzuweisen, dass diese Option nicht zu empfehlen ist, da sie Standorteigenschaften bewusst ignoriert, die eine Rückhaltung von Radionukliden bewirken.

- **Fall 2:** Die geringpermeable Überdeckung wird im Sicherheitskonzept als Endlagerkomponente mit rückhaltenden Sicherheitsfunktionen ausgewiesen.

Die Abwägungsmethode muss zu diesem Zwecke nicht geändert werden. Es bedarf keiner zusätzlicher Sicherheitsfunktionen für die geringpermeable Überdeckung.

Wenn ein Standort einen umschließenden ewG besitzt und die geringpermeable Überdeckung lediglich die Gesamtrobustheit des Endlagersystems steigern soll, sollte Fall 2 nicht angewendet werden. Grund ist, dass eine geringpermeable Überdeckung im Abwägungsverfahren niemals eine besondere Aufwertung des Standortes gegenüber einem anderen bewirken kann. Die Gesamtbewertung des Systems kann sogar durch eine geringere Robustheit der geringpermeablen Überdeckung verschlechtert werden.

- **Fall 3:** Die geringpermeable Überdeckung ist nicht Teil des Sicherheitskonzeptes, ist also keine Endlagerkomponente und besitzt keine Sicherheitsfunktion. Die geringpermeable Überdeckung stellt jedoch eine Sicherheitsreserve dar, die nicht ignoriert, sondern als Bonus des Standortes gewertet werden soll.

Auch wenn die geringpermeable Überdeckung nicht Teil des Sicherheitskonzeptes ist, kann sie dennoch als Sicherheitsreserve beim Standortvergleich berücksichtigt werden. Hierzu ist eine Dokumentation der Standortaspekte erforderlich, um sie beim direkten Standortvergleich in den verbal-argumentativen Vergleich einzubeziehen. Dies stellt eine Erweiterung der VerSi-I-Abwägungsmethode dar.

Eine geringpermeable Überdeckung kann nur dann als Bonus gewertet werden, wenn die zu vergleichenden Standorte und Sicherheitskonzepte sehr ähnlich sind (etwa wenn der eine Kristallinstandort eine geringpermeable Überdeckung besitzt, der andere, ansonsten gleichartige, Kristallinstandort jedoch nicht). Hieraus folgt, dass geringpermeable Überdeckungen, sofern sie nicht Bestandteil des Sicherheitskonzeptes sind, im Standortvergleich in der Regel nicht entscheidungsrelevant werden.

#### **5.1.7 Untersuchung der Anwendbarkeit der Abwägungsmethode bei der Standortauswahl für die übertägige Untersuchung**

Im Allgemeinen ist festzustellen, dass die Abwägungsmethode in ihrer Gesamtheit (d. h. mit der Zielsetzung des Standortvergleichs) nicht dazu angelegt wurde, auf größere Bereiche, d. h. Standortregionen, mit möglicherweise unterschiedlicher Untersuchungstiefe ausgedehnt zu werden. So erfordert die Methode standortspezifische Sicherheitskonzepte anhand derer die Ableitung der jeweiligen Sicherheitsfunktionen und die Bewertung ihrer Robustheit erfolgt.

Ein weiterer Grund ist, dass die Abwägungsmethode eine annähernd vergleichbare Qualität der Datenlage bei den zu vergleichenden Systemen voraussetzt. In der ersten Phase des Standortauswahlverfahrens, in welcher Standortregionen aus den Teilgebieten ermittelt werden sollen, ist eine vergleichbare Untersuchungstiefe der verschiedenen Standortregionen unwahrscheinlich. Die unterschiedlichen Untersuchungstiefen können auch nicht im Rahmen der ersten Phase durch Standortuntersuchungen angeglichen werden, denn in dieser Phase ist es gerade das Ziel, die Regionen auszuweisen, für die eine Erkundung vorgeschlagen wird (§14 /STA 17a/). Starke Unterschiede in der Untersuchungstiefe würden bei der Robustheitsbewertung diejenigen Systeme in unzulässiger Weise benachteiligen, bei denen die Datenlage schlechter ist, ohne, dass die Möglichkeit eines diesbezüglichen Ausgleichs (z. B. durch gezielte Zusatzuntersuchungen) bestünde.

Selbst wenn zwei Regionen die gleiche Untersuchungstiefe aufweisen würden, bereits generische Sicherheitskonzepte vorlägen und für jede komponentenspezifische Sicherheitsfunktion eine Relevanzbewertung durchführbar wäre, ließe sich die Abwägungsmethode dennoch nur mit Einschränkungen anwenden:

- Wegen der Datenungleichheit können Sicherheitsfunktionen keine hohe Robustheitsbewertung erhalten.
- Die Bewertung der Relevanz ist vorläufig, da die Sicherheitskonzepte noch geändert oder konkretisiert werden können.
- Die Gesamtbewertung kann nicht zum Ausschluss eines Standortes führen, da alternative generische Sicherheits- bzw. Endlagerkonzepte möglich sind.

Standortmerkmale können einen Einfluss auf die Robustheit einzelner Barrieren haben. Für die betreffenden Barrieren könnte (mit in der ersten Phase der Standorterkundungen noch generischen Sicherheitskonzepten) zwar eine Relevanz-Robustheits-Bewertung im Sinne der Abwägungsmethode durchgeführt werden, diese entspräche jedoch nicht den eigentlichen Zielsetzungen der Abwägungsmethode.

Eine Anwendung der Abwägungsmethode in der ersten Phase der Standorterkundungen ausschließlich anhand von Standortmerkmalen ist nicht möglich, weil die VerSi-Abwägungsmethode auf eine holistische Betrachtungsweise abzielt: Dem Standortvergleich soll ein Verständnis des Gesamtsystems und nicht nur das Verständnis einzelner Teilsysteme zu Grunde gelegt werden.

## **5.2 Ausblick**

Die Erweiterung der VerSi-Abwägungsmethodik auf kristalline Wirtsgesteine bedingt weitere Arbeitsschritte. Im Wesentlichen müssen die Arbeiten aus dem Vorhaben VerSi I auf den neuesten Stand gebracht werden und die begonnenen Arbeiten zur Anpassung der Methodik auf kristalline Wirtsgesteine müssen weiter vertieft werden. Die weiteren Arbeiten umfassen im Wesentlichen:

- Generelle Überarbeitung des VerSi I Berichtes /FIS 10/, insbesondere
  - Erweiterung und Neugliederung der Sicherheitsfunktionsliste SFL I (VerSi I) durch die im Vorhaben VerSi II erarbeitete, auf Kristallinsysteme erweiterte Liste SFL II (einschließlich charakteristischer Parameter).

- Zusammenfassung der im Vorhaben VerSi I verwendeten Komponenten „Weiteres Wirtsgestein“ und „Deckgebirge“ zur Komponente „Deckgebirge“ gemäß StandAG.
  - Durchgängige Einführung und Bewertung der Komponente „Einlagerungsbereich“ alternativ zur Komponente „ewG“ für Endlagersysteme, bei denen die Einschlusswirkung wesentlich auf technischen oder geotechnischen Barrieren beruht.
  - Verwendung der im Vorhaben ANSICHT /JOB 17/ aktuell entwickelten Endlagerkonzepte als Referenzkonzepte für Tonstein, anstelle des im Vorhaben VerSi I projektierten Endlagerkonzeptes.
- Die Schlussfolgerungen im Kapitel 5.1.1 beziehen sich zunächst auf das Wirtsgestein Salz, diese sind höchstwahrscheinlich auf andere Wirtsgesteine übertragbar. Es liegen für die verschiedenen Wirtsgesteine jedoch zurzeit keine ausgereiften Rückholungskonzepte vor, sodass eine abschließende Bewertung noch erfolgen muss.
  - Die Tabellen in den Kapiteln 3.4.2.2 und 3.4.2.3 geben Beispiele für charakteristische Parameter für die komponenten-spezifischen Sicherheitsfunktionen. Die Beschreibung der auftretenden Prozesse, sowie deren charakteristische Parameter, muss weiter vertieft werden, vergleichbar mit dem synoptischen Sachstandsberichts des VerSi I Vorhabens. Nur auf Basis einer solchen ausführlichen Beschreibung des Endlagersystems und der auftretenden Prozesse kann eine fundierte Relevanz- und Robustheitsbewertung erfolgen.
  - Es wurde eine vorläufige Relevanzbewertung der Sicherheitsfunktionen für kristalline Wirtsgesteine durchgeführt. Zunächst erfolgte die Bewertung nur als allgemeine Einschätzung der Relevanz ohne verschiedene Relevanzzeiträume auszuweisen. Ggf. Berücksichtigung von mehr als 2 Zeitabschnitten bei der Relevanz- und Robustheitsbewertung. Zudem sollte eine Bewertung anhand eines detaillierten Endlagerkonzeptes durchgeführt werden, welches nicht vorlag.
  - Das gleiche wie für die Relevanzbewertung gilt auch für die Robustheitsbewertung der Sicherheitsfunktionen. Die Robustheitsbewertung konnte im Vorhaben VerSi II nicht durchgeführt werden, da für die Anwendung der Verfahrensschritte 1-5 wichtige Informationen (im Wesentlichen der synoptische Sachstandsbericht) fehlten.



- Es muss ein beispielhafter Standortvergleich für die drei betrachteten Wirtsgesteine bzw. Endlagerkonzepte durchgeführt werden, um die Erweiterungen bzw. Anpassungen der Methodik bzw. der Werkzeuge zu testen.
- Eine datenbankgestützte Abwägung von Endlagersystemen sollten an konkreten/generischen Standorten getestet und weiter entwickelt werden, um z. B. die praktische Anwendbarkeit zu erproben. Eine Weiterentwicklung der Dateneingabe, insbesondere im Sinne der Benutzerfreundlichkeit, wäre ratsam.
- Um eine Abwägung von Endlagersystemen durchführen zu können müssen bestimmte charakteristische Parameter von Standorten vorliegen. Hier kann das VerSi-Vorhaben möglicherweise Hinweise geben, welche standortbezogenen Daten vorliegen bzw. erhoben werden müssen, damit eine Abwägung durchgeführt werden kann



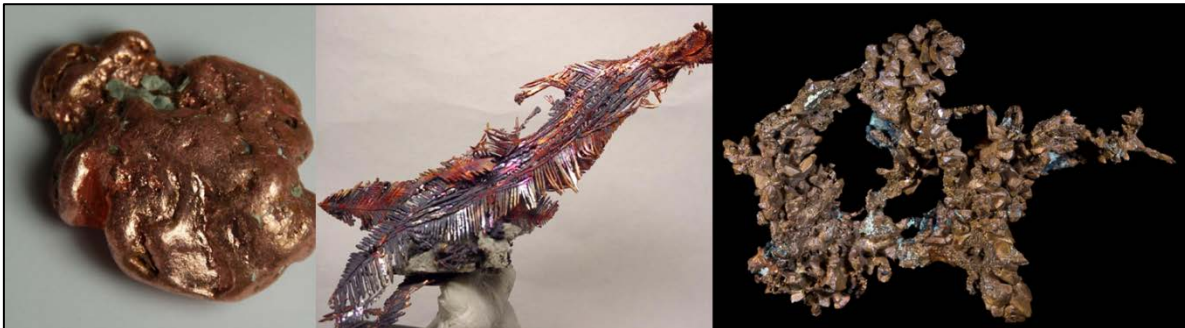
## A Anhang:

### Korrosionsverhalten von kupferummantelten Behältern

Im Zuge der Erweiterung der VerSi-Methode wurde auch dem Stand von Wissenschaft und Technik zu Prozessen, die zur Korrosion von Kupfer führen, nachgegangen. Hintergrund war, dass in VerSi II erstmals Behältermaterial aus Kupfer relevant war, während in VerSi I lediglich Stahlbehälter betrachtet wurden, die nach den bisherigen Endlagerkonzepten für Endlagersysteme in Tonstein und Salz vorgesehen sind. Es galt zu überprüfen, ob die von SKB aufgestellten Indikatoren, die eine Begrenzung der Kupferkorrosion bewirken sollen, hinreichend plausibel abgeleitet wurden und somit auch für Endlagersysteme im Kristallin in Deutschland angesetzt werden könnten.

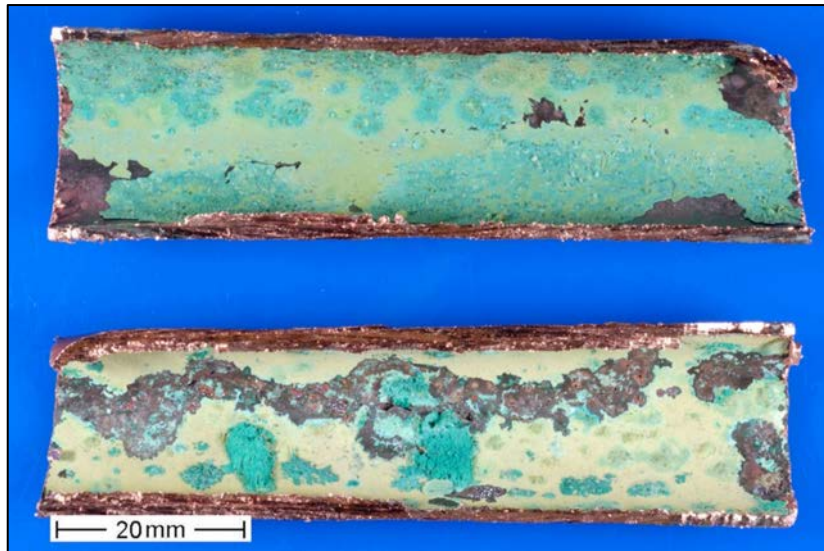
#### A.1 Allgemeines zur Kupfer-Korrosion

Im KBS-3-Konzept wird Kupfer als Material für eine Ummantelung von Behältern verwendet, da eine Korrosionsbeständigkeit im Tiefengrundwasser des skandinavischen Kristallins erwartet wird. Natürliche Vorkommen von elementarem Kupfer sind bekannt, die eine solche Beständigkeit bestätigen (Abb. A.1).



**Abb. A.1** Vorkommen von gediegenem Kupfer /WIK 17b/

Daher wird Kupfer auch als Material für Wasserrohre verwendet. Jedoch ist Kupfer erfahrungsgemäß nicht unter allen Bedingungen beständig. Korrosionseffekte sind z. B. bei Leitungswasser aufgrund von Lokalelementen bekannt (siehe Abb. A.2) und aufgrund der Wasserzusammensetzung.



**Abb. A.2** Korrosion von Kupferrohren für Leitungswasser aufgrund von Lokalelementen /MÖS 14/

Kupfer kann auch unter oxidierenden Bedingungen (z. B. bei Anwesenheit von Sauerstoff) korrosionsbeständig sein, wenn sich passivierende Schichten ausbilden. Daher ist z. B. die Verwendung von Kupfer für Dachrinnen möglich. Gegen Säuren, wie Salpetersäure, Chromatsäure, Schwefelsäure und Essigsäure oder auch Ammoniak ist Kupfer nicht korrosionsbeständig.

## **A.2 Kenntnisstand**

Der Kenntnisstand zur Korrosion von Kupfer als Ummantelung von Endlagerbehältern wurde intensiv von SKB untersucht und dokumentiert. SKB veranlasste im Rahmen der Entwicklung von Behältern für das KBS-3-Konzept über 100 Studien zum Korrosionsverhalten von Kupfer (eine aktuelle Auswahl siehe Tab. A.). Hochreines Kupfer mit einem geringen Anteil an Phosphor (50 ppm) zur Erhöhung der Korrosionsbeständigkeit wird derzeit als Werkstoff zur Ummantelung der Behälter für das KBS-3-Konzept vorgesehen.

**Tab. A.1** Berichte der SKB zum Korrosionsverhalten von Kupfer (weitere im Text)

<b>Berichtsnr.</b>	<b>Thema</b>	<b>Referenz</b>
TR-05-06	Galvanic corrosion of copper-cast iron couples	/SMA 05/
R-13-15	The corrosion rate of copper in a bentonite test package measured with electric resistance sensors	/ROS 12/
R-13-34	Copper corrosion experiments under anoxic conditions	/OLL 13/
R-14-07	Corrosion of copper in ultrapure water	/BOM 14/
R-14-15	Corrosion properties of copper materials	/TAX 14/
TR-83-24	Corrosion resistance of a copper canister for spent fuel	/SKB 83/
TR-97-19	Assessment of a spent fuel disposal Canister - Assessment studies for a copper canister with cast steel inner component	/BON 97/
TR-02-25	Corrosion of copper in alkaline chloride environments	/KIN 02/
TR-12-06	Fundamental aspects of stress corrosion cracking of copper relevant to the Swedish deep geologic repository concept	/BHA 13/
TR-12-07	Mechanisms and energetics of surface reactions at the copper-water interface	/JOH 12/
TR-13-11	Thermodynamic evaluation of Cu-H-O-S-P system	/HAN 13/
TR-13-19	A review of the properties of pyrite and the implications for corrosion of the copper canister	/KIN 13a/
TR-13-27	Localised corrosion of copper canisters in bentonite pore water	/KIN 13b/
TR-16-01	Copper in ultrapure water	/OTT 16/

### **A.3 Tiefes Grundwasser im skandinavischen Kristallin**

Besonderes Interesse legte SKB auf das Korrosionsverhalten von Kupfer im tiefen Grundwasser des skandinavischen Kristallins sowie dessen Wechselwirkung mit dem Bentonit-Buffer. Die meisten Studien untersuchten eine Grundwasserzusammensetzung, die in Äspö angetroffen wird (Abb. A.3). Auch mikrobiologische Effekte auf die Korrosion von Kupfer sind geprüft und beschrieben /HUT 17/, /MEL 11/, /PER 11/, /PED 10/, /LIU 06/, /NUC 93/.

Ion	mM	mg/dm <sup>3</sup>
Na <sup>+</sup>	100	2,300
K <sup>+</sup>	0.28	11
Ca <sup>2+</sup>	47.3	1,896
Mg <sup>2+</sup>	2.4	58
Cl <sup>-</sup>	178	6,311
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.44	27
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	4.6	442
HS <sup>-</sup>	0.005	0.15
pH 6.9±0.1	Eredox -308 mV (SHE)	

**Abb. A.3** Grundwasserzusammensetzung in Äspö /ROS 12/

Interessant ist die deutliche Abweichung der Zusammensetzung des Äspö-Grundwassers von der Zusammensetzung des tiefen granitischen Grundwassers nach /SKB 83/ (Abb. A.4). Das Äspö-Grundwasser hat deutlich höhere Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Cl<sup>-</sup> und SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>-Konzentrationen aber eine geringere HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>-Konzentration. Vermutlich wurde die Zusammensetzung des Äspö-Grundwassers als abdeckend für Korrosionsstudien angesehen.

	Expected intervals <sup>a</sup>
Conductivity, mS/m	22-30
pH	7-9
Eh, V	0-(-0.45)
	>0.25 <sup>c</sup>
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	90-275
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.5-15
HPO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.01-0.2
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.01-0.05
F <sup>-</sup>	0.5-4
Cl <sup>-</sup>	4-15
HS <sup>-</sup>	0-0.5
Ca <sup>2+</sup>	10-40
Mg <sup>2+</sup>	2-10
Na <sup>+</sup>	10-100
K <sup>+</sup>	1-5
Fe <sup>2+</sup>	0.02-5
Fe(tot)	1-5
Mn <sup>2+</sup>	0.1-0.5
Al <sup>3+</sup>	0-0.02
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0.05-0.2
SiO <sub>2</sub> (tot)	3-14
TOC <sup>d</sup>	1-8

**Abb. A.4** Bandbreite der Zusammensetzung des tiefen granitischen Grundwassers in mg/l /SKB 83/

## A.4 Bentonit

Die Zusammensetzung des Porenwassers im Bentonit verändert sich bei der Aufsättigung mit tiefem Grundwasser. Eine modellierte Entwicklung der Zusammensetzung des Bentonit-Porenwassers im Kontakt mit Grundwasser zeigt Abb. A.5 in Abhängigkeit von Zeit und Temperatur und für unterschiedliche Aufsättigungsraten. Ein deutlicher Anstieg der Cl-Konzentration, ein geringer Anstieg der  $\text{HCO}_3^-$ -Konzentration und Abnahme des pH sowie eine weitgehend konstante  $\text{SO}_4^{2-}$ -Konzentration ist festzustellen.

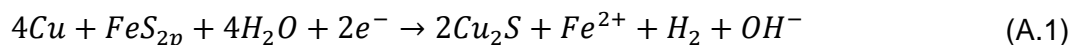
(a) 10-year bentonite saturation, high advective flow in fracture*								
Time (years)	Temp. (°C)	pH	[ $\text{HCO}_3^-$ ] (mol/kg)	[Cl <sup>-</sup> ] (mol/kg)	[ $\text{SO}_4^{2-}$ ] (mol/kg)	[Cl <sup>-</sup> ]:[ $\text{SO}_4^{2-}$ ]	[ $\text{HCO}_3^-$ ]:[Cl <sup>-</sup> ]	[ $\text{HCO}_3^-$ ]:[ $\text{SO}_4^{2-}$ ]
0	46	7.86	0.0011	0.040	0.0146	2.7	0.03	0.07
1	71	7.36	0.0011	0.040	0.0097	4.1	0.03	0.11
10	80	7.17	0.0014	0.072	0.0084	8.6	0.02	0.16
100	63	7.12	0.0016	0.094	0.0115	8.2	0.02	0.14
500	50	–	–	0.129	0.0137	9.4	–	–
1,000	41	6.96	0.0021	0.147	0.0156	9.4	0.01	0.13
10,000	20	7.07	0.0022	0.154	0.0149	10.3	0.01	0.15
(b) 10-year bentonite saturation, low advective flow in fracture*								
Time (years)	Temp. (°C)	pH	[ $\text{HCO}_3^-$ ] (mol/kg)	[Cl <sup>-</sup> ] (mol/kg)	[ $\text{SO}_4^{2-}$ ] (mol/kg)	[Cl <sup>-</sup> ]:[ $\text{SO}_4^{2-}$ ]	[ $\text{HCO}_3^-$ ]:[Cl <sup>-</sup> ]	[ $\text{HCO}_3^-$ ]:[ $\text{SO}_4^{2-}$ ]
0	46	7.86	0.0011	0.040	0.0146	2.7	0.03	0.07
1	71	7.36	0.0011	0.040	0.0097	4.1	0.03	0.11
5	79	–	–	0.062	0.0086	7.2	–	–
10	80	7.12	0.0013	0.072	0.0084	8.6	0.02	0.16
50	73	–	–	0.082	0.0095	8.6	–	–
100	63	7.05	0.0014	0.082	0.0115	7.1	0.02	0.12
1,000	41	7.12	0.0015	0.084	0.0156	5.4	0.02	0.09
10,000	20	7.27	0.0016	0.092	0.0149	6.2	0.02	0.10

**Abb. A.5** Modellierte Porenwasserzusammensetzung im Bentonit im Verlauf einer Aufsättigung nach /KIN 13b/ aus /SEN 10/

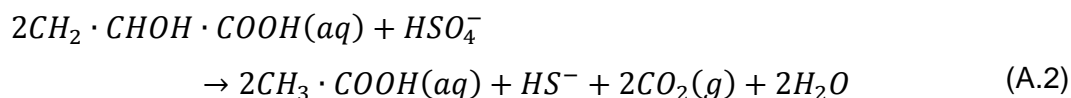


## A.5 Sulfat / Sulfid

Die Anwesenheit von Pyrit (z. B. im Bentonit) begünstigt auch unter reduzierenden Bedingungen aufgrund des Sulfids die Bildung von Chalcocite ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ) oder Covellite ( $\text{CuS}$ ) aus Kupfer und damit eine Korrosion nach:



Auch eine Oxidation schwefelhaltiger organischer Verbindungen kann Sulfid bilden, das wiederum eine Korrosion von Kupfer begünstigt:



Unter oxidierenden Bedingungen wird dann die Bildung von Cuprit ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ) oder Tenorit ( $\text{CuO}$ ) erwartet. /SZA 12/ äußert daher Zweifel an einer dauerhaften Korrosionsbeständigkeit des Kupfers.

## A.6 Alkalische Lösungen

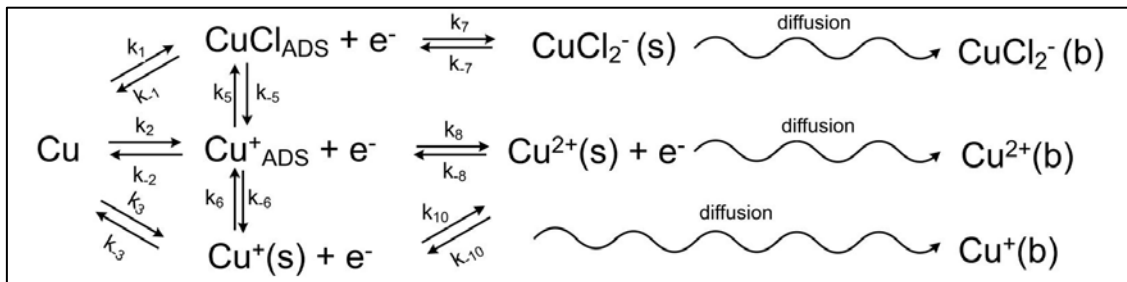
Der Aufbau einer passivierenden Schicht auf der Oberfläche von Kupfer unter alkalischen Bedingungen ist bekannt /KIN 02/. Allgemein wird die Ausbildung eines Films aus  $\text{Cu}_2\text{O}/\text{Cu}(\text{II})$  angenommen, wobei  $\text{Cu}(\text{II})$  als  $\text{CuO}$  oder  $\text{Cu}(\text{OH})_2$  vorliegt. Der Film besteht je nach den Bedingungen im Grundwasser aus einigen wenigen Monolayern von  $\text{CuO}$ . Voltammogramme können entsprechende Verbindungen zugeordnet werden /KIN 02/.

Die Ausbildung einer weiteren passivierenden Schicht an Kupfer im Bentonit-Porenwasser ist bei Anwesenheit von Karbonat möglich. Die voltametrischen Untersuchungen zeigen auch die Bildung von  $\text{CuCO}_3$  an. Die zwei Minerale Malachit ( $\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$ ) und Azurit ( $2 \cdot \text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$ ) werden festgestellt /KIN 02/. Es wird eine

geringe Stabilität in karbonatischen Lösungen angenommen. Jedoch kann die puffernde Wirkung von  $\text{HCO}_3^-$  die  $\text{Cu}_2\text{O}$ -Schicht stabilisieren.

### A.7 Lösungen mit Chlorid und Sulfat

/KIN 13b/ hat für Lösungen mit  $\text{Cl}^-$  und  $\text{SO}_4^{2-}$  ein generelles Schema für die ablaufenden Reaktionen aufgestellt (Abb. A.6). Zu erkennen sind wiederum die Reaktionen, die in einem Voltammogramm zu erkennen sind. Die adsorbierten Cu-Spezies können sich aus dem gediegenen Kupfer sowie aus den Cu-Ionen der passivierten Schicht bilden.



**Abb. A.6** Übersicht über die Reaktionen von Kupfer mit einer Chlorid- / Sulfat-haltigen Lösung /KIN 13b/  
ADS: Adsorbierte Spezies

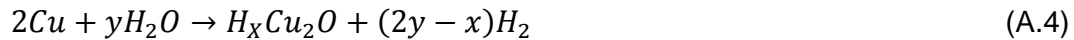
### A.8 Wasserstoffbildung unter anoxischen Bedingungen

/HUL 11/ stellte überraschend an Kupfer eine Wasserstoffbildung im destillierten, sauerstofffreien Wasser fest. /SZA 12/ sprach daher eine mögliche Korrosion von Kupfer in anoxischem Wasser an. Auch von /BOM 14/ wurde eine geringe Wasserstoffentwicklung bei der Einwirkung von ultrareinem Wasser auf Kupfer untersucht, die thermodynamisch für die Reaktion



allerdings nicht erwartet wird, da sie schon bei einem sehr geringen Wasserstoffpartialdruck von  $p_{\text{H}_2(\text{g})} = 10^{-8,5} \text{ bar}$  im Gleichgewicht sein sollte /PUI 00/.

Um diesen Prozess zu erklären wird derzeit eine bisher unbekannte Kupferphase postuliert /KIN 13c/. Dieser Prozess wäre abhängig von H<sub>2</sub>-Partialdruck und der Diffusion des Wassers durch den Bentonit.

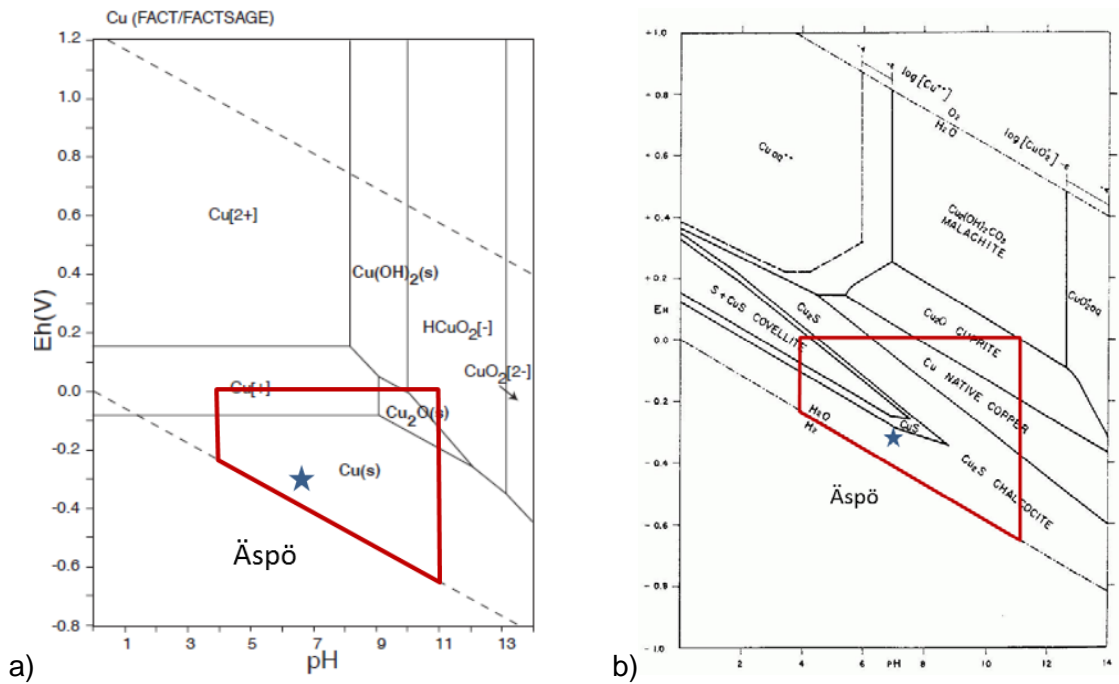


Die geringe Wasserstoffbildung durch eine Korrosion von Kupfer in anoxischem Wasser konnte allerdings von /OTT 16/ nicht bestätigt werden.

## A.9 Eh-pH-Phasendiagramme

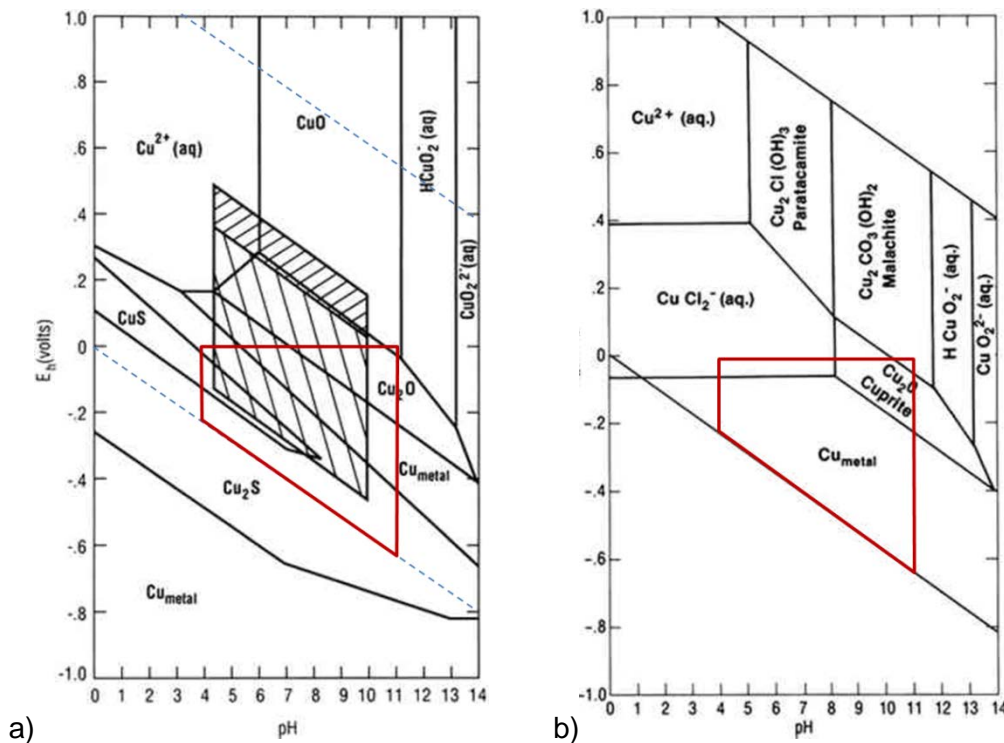
Ein Eh-pH-Diagramm visualisiert das Auftreten von Mineralphasen, gelösten Spezies und Gasen in Abhängigkeit von Eh- und pH-Wert. Die Linien im Diagramm entsprechen einer identischen Aktivität der benachbarten Bestandteile in Lösung. Die übergeordnete Voraussetzung ist die Stabilität von Wasser für die Existenz einer Lösung mit verschiedenen Spezies bei den jeweiligen Eh- und pH-Werten. Der begrenzte Stabilitätsbereich von Wasser wird deshalb mit gestrichelten Linien eingezeichnet. Die Berechnung der Linien gleicher Aktivität der Spezies im Diagramm erfolgt unter Annahme eines thermodynamischen Gleichgewichtes /SPE 17/. Die Eh-pH-Phasendiagramme erlauben eine rasche Einschätzung des Auftretens bzw. der Stabilität von Festphasen und Lösungsbestandteilen.

Aus dem in Abb. A.7 rot umrandeten Bereich für Eh- und pH-Werte, die nach SKB als günstig definiert wurden, ergibt sich, dass eine Stabilität von Kupfer in Anwesenheit von Sauerstoff (Abb. A.7a) größtenteils gegeben ist. Für die Bedingungen des Grundwassers entsprechend Äspö ist eine Stabilität des Kupfers vorhanden. Dagegen ist bei Anwesenheit von Schwefel (Abb. A.7 b) eine Stabilität nicht gegeben, da überwiegend eine Umwandlung in schwefelhaltige Kupferverbindungen zu erwarten ist. Auch bei geringeren Sulfid-Konzentrationen ist nach Abb. A.8 a) eine Umwandlung möglich. Dagegen ist bei Meerwasser eine überwiegende Stabilität vorhanden (Abb. A.8 b).



**Abb. A.7** Eh-pH Diagramm für Kupfer unter Anwesenheit von Sauerstoff (a) /TAK 05/ bzw. gelöstem Schwefel ( $10^{-1}$  M) (b) /POS 09/

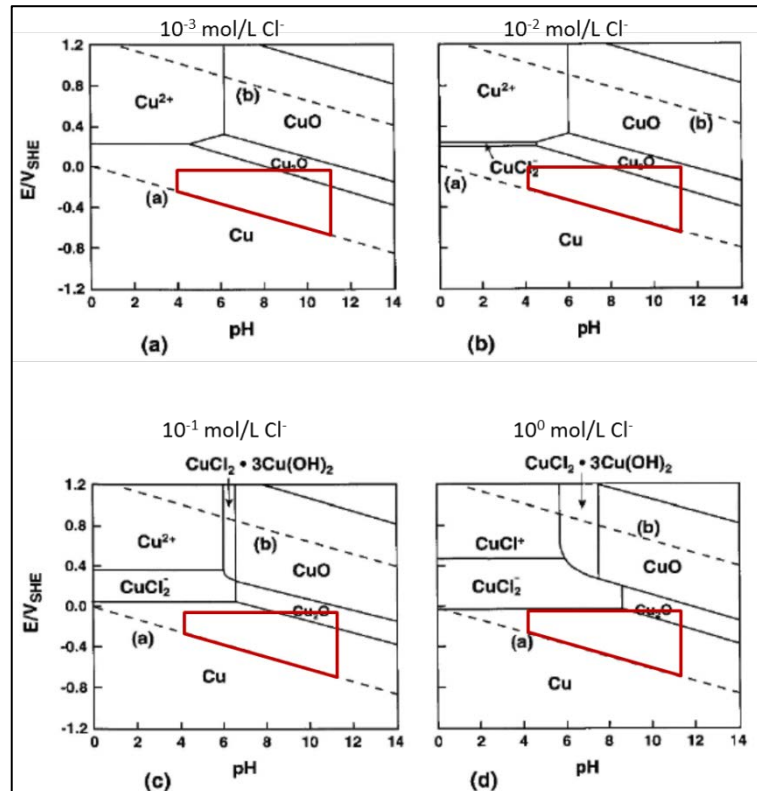
Der rot umrandete Bereich zeigt die „chemical favourable conditions,, nach Tab. 3.6. Der Stern zeigt die Eh-pH-Bedingungen des tiefen granitischen Grundwassers in Äspö.



**Abb. A.8** Eh-pH Diagramme von Kupfer bei Anwesenheit von Sulfid ( $10^{-2}$  M) und Meerwasser /MCN 92/

Der rot umrandete Bereich zeigt die „chemical favourable conditions,, nach Tab. 3.6

Die Stabilität des Kupfers ist nur geringfügig von der Chlorid-Konzentration beeinflusst (Abb. A.9). Erst bei einer sehr hohen Konzentration von 1 mol/L ist für die gewählten Eh-pH-Bedingungen eine Bildung einer Cl-haltigen Kupferphase zu erwarten.



**Abb. A.9** Eh-pH Diagramme für Kupfer für verschiedene Cl<sup>-</sup> Konzentrationen /KIN 11/

Der rot umrandete Bereich zeigt die „chemical favourable conditions,, nach Tab. 3.6. Der Stern zeigt die Eh-pH-Bedingungen des tiefen granitischen Grundwassers in Äspö.

## A.10 Flächige und Lochkorrosion

Die Korrosion an Metallen kann als flächige Korrosion und als Lochkorrosion auftreten. Eine flächige Korrosion mit geringer Korrosionsrate wird als günstig für die Standzeit der Kupferummantelung angesehen, da sie großflächig wirkt und eine Dichtigkeit erhalten bleiben kann. Ungünstig ist dagegen eine Lochkorrosion, die sich beispielsweise durch Lokalelemente ausbilden kann, da dies schneller zu einem Dichtigkeitsverlust führt. Das Korrosionsverhalten und -raten für Kupfer wurde daher in zahlreichen Studien untersucht (siehe Tab. A.1). Auch mikrobiologische Prozesse beeinflussen die Korrosionsrate und das Korrosionsverhalten.

Generell führt nach /KIN 13b/ eine erhöhte Konzentration an  $HCO_3^-$  in der Porenlösung und ein erhöhter pH-Wert zunächst zur Ausbildung einer passivierenden Schicht. Jedoch wird das Aufbrechen der passivierten Schicht durch erhöhte Konzentrationen an  $SO_4^{2-}$  und  $Cl^-$  begünstigt. Dieses Aufbrechen ist bei Auftreten einer Lochkorrosion beschleunigt.

Ob flächige Korrosion oder eine Lochkorrosion an der Kupferummantelung stattfindet, ist in erster Linie von den geochemischen Bedingungen abhängig, d. h. der Zusammensetzung des Grundwassers.

### Lochkorrosion

Der Korrosionsvorgang in einer Karbonat-reichen, niedrig salinaren Porenlösung führt experimentell zu einer Aufräumung der Kupfer-Oberfläche aber nicht zu einer typischen Lochkorrosion. /KIN 13c/ versuchte durch ein konzeptionelles Modell mit mehreren, an der Oberfläche stattfindenden Prozesse eine Erklärung zu finden, wobei zunächst eine passivierende Schicht aus  $Cu_2O$  angenommen wird.

Es finden weitere Reaktionen von Kupfer mit  $Cl^-$  statt, die bevorzugt an Korngrenzen die passivierende Schicht unter Bildung von  $CuCl_2^-$  bzw.  $Cu^{2+}(s)$  aufbrechen. Dies könnte zu Lochkorrosion führen. Hierbei findet die Anodenreaktion



unter der Oberfläche der passivierenden Schicht statt. Die Kathodenreaktion

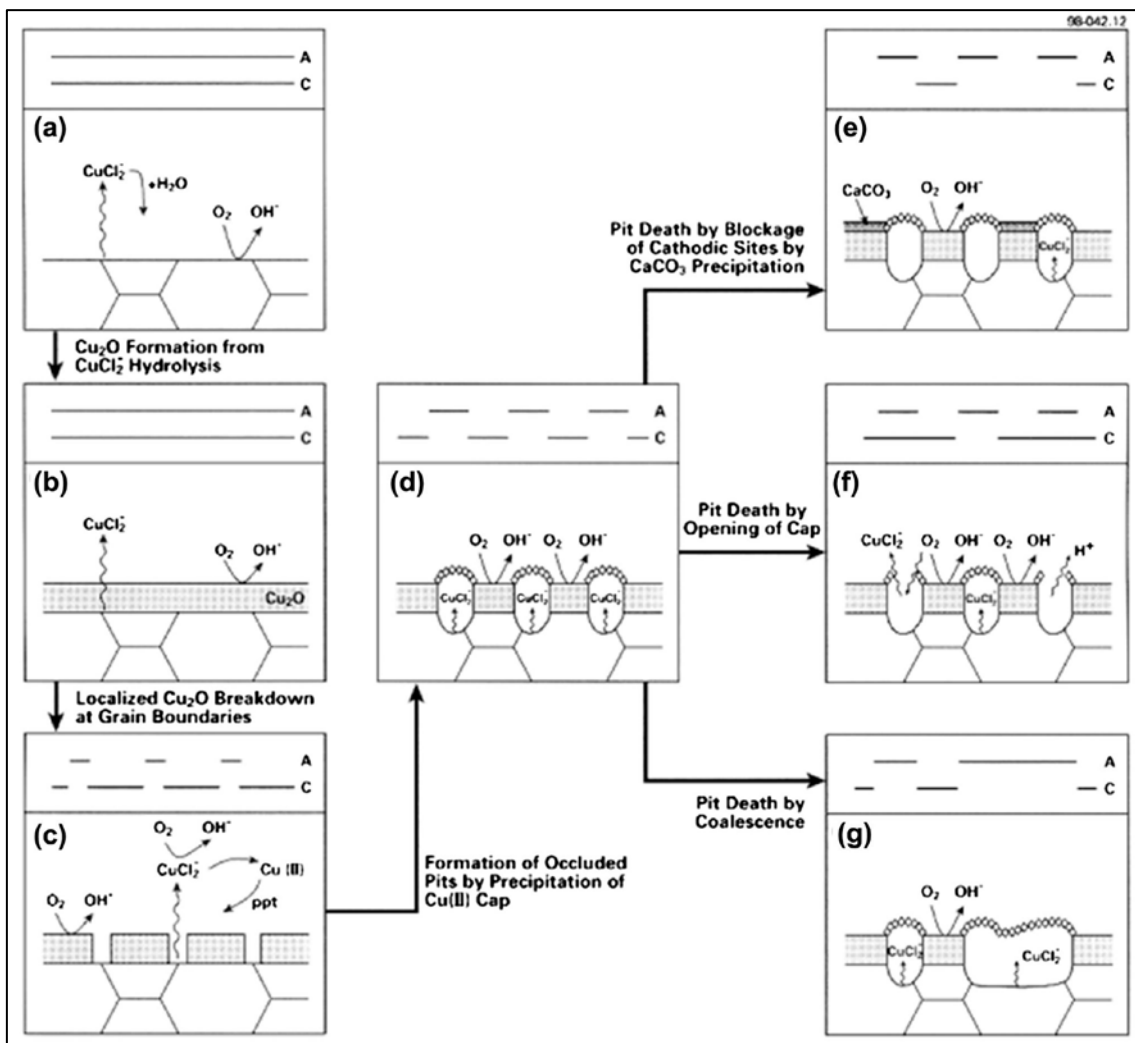


an der passivierenden Schicht der Kupferoberfläche statt. Letztlich bildet sich  $CuCl_2^-$  und  $Cu^{2+}(s)$ .

Diese Korrosionsprodukte lagern sich außerhalb des Lochs ab und können es aber auch wieder verschließen.

Ein sich bildendes Loch kann nach Abb. A.10 durch verschiedene Prozesse deaktiviert werden:

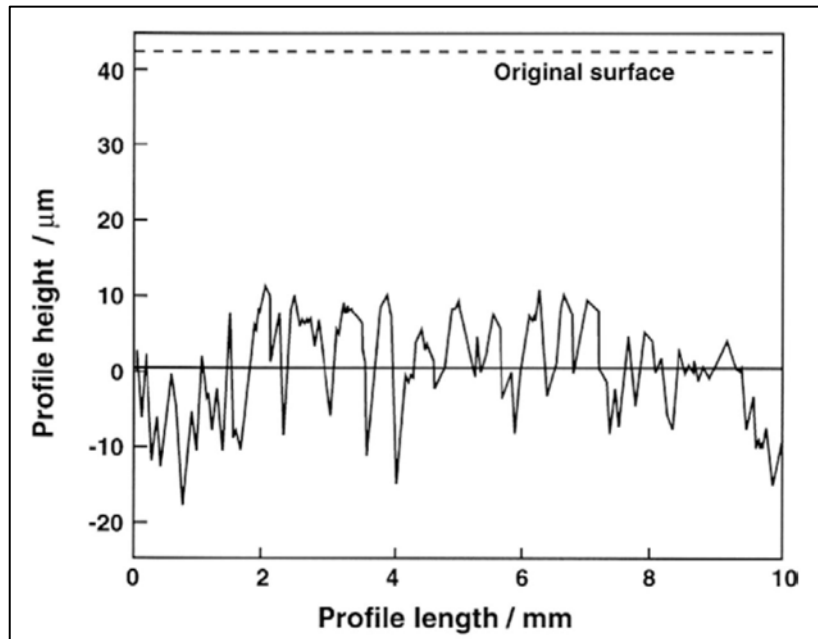
- (1) Bei Anwesenheit von  $Ca$  und Karbonat bildet sich  $CaCO_3$  als zusätzliche Schicht über der passivierenden Schicht aus, die Kathodenreaktion ist blockiert und die Löcher können sich nicht weiter vertiefen.
- (2) Öffnet sich das Loch erneut durch ein Aufbrechen der Korrosionsprodukte, kann die Anodenreaktion auch an den Korrosionsprodukten erfolgen. Dann vertieft sich das Loch nicht weiter.
- (3) Die Anodenreaktion kann im Loch auch weiter fortschreiten und zur Zusammenlegung der Löcher führen. Auch dann findet keine weitere Vertiefung statt.



**Abb. A.10** Konzeptionelles Modell zum Ablauf einer Korrosion einer Kupferoberfläche /KIN 13c/. A ist die Anodenfläche und C die Kathodenfläche

## Flächige Korrosion

Sofern Korrosion in einem Endlager stattfindet, soll bevorzugt eine flächige Korrosion stattfinden. Dabei wird die Oberfläche angeraut (vergleiche Abb. A.11). /KIN 13b/ beobachtete in experimentellen Untersuchungen an Kupfer in mit Grundwasser gesättigtem Bentonit keine Bildung von Löchern. Die Rauheit beträgt wenige  $\mu\text{m}$  vom gesamten Korrosionsfortschritt.



**Abb. A.11** Oberflächenrauheit nach der Korrosion von Kupfer im Kontakt mit Porenwasser eines gesättigten Bentonits /KIN 13b/

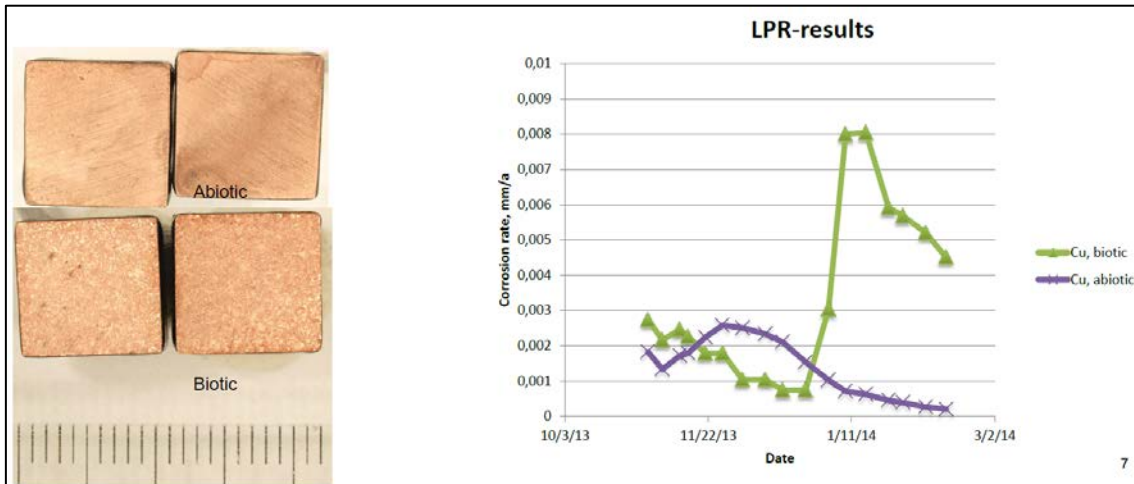
### A.11 Korrosion und Mikrobiologie

Die Auswirkung einer mikrobiellen Aktivität und dessen Ausmaß waren und sind Gegenstand von Studien. SKB nimmt an, dass eine mikrobielle Aktivität in einem hochkompaktiertem Bentonit unterdrückt wird. Es ist noch ungeklärt ob dies entweder aufgrund des hohen Quelldrucks oder der unzureichenden Wasseraktivität erfolgt.

Seitens VTT wird derzeit ein Untersuchungsprogramm zum Einfluss mikrobieller Aktivitäten auf die Korrosion von Kupfer bearbeitet, da die Anwesenheit von Mikroben im Grundwasser die Korrosion des Kupfers fördern und beschleunigen könnte. Die aktuellen experimentellen Studien, die für die Langzeitphase gelten, untersuchen das Korrosionsverhalten von Kupfer mit und ohne Mikroben. Nach der Versuchsdauer von 10



Monaten konnte in Anwesenheit von Mikroben eine  $\text{Cu}_2\text{S}$ -Schicht und in Abwesenheit von Mikroben eine  $\text{Cu}_2\text{O}$ -Schicht an der Kupferoberfläche festgestellt werden. Die  $\text{Cu}_2\text{S}$ -Schicht war weniger anfällig für eine Cl-Korrosion /HUT 16/, /HUT 17/. Dennoch zeigte sich in den Korrosionsuntersuchungen /CAR 16/ eine andere Oberflächenstruktur des Kupfers in Anwesenheit von Mikroben als ohne (Abb. A.12 a). Auch die Korrosionsraten zeigten Unterschiede (Abb. A.12 b).



a)

b)

**Abb. A.12** Oberflächenstruktur nach Korrosion und Korrosionsrate mit und ohne Mikroben

## A.12 Bewertung

Die aufgestellten Indikatoren von SKB sollen eine geringe Korrosion von Kupfer sicherstellen. Die aufgestellten Werte erscheinen hinreichend plausibel abgeleitet, um nach heutigem Kenntnisstand ein günstiges, d. h. geringes Korrosionsverhalten von Kupfer zu erreichen.



## Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1	Darstellung der operativen Phasen in der Endlagerentwicklung (entnommen aus /APP 15/)	8
Abb. 3.1	Gebiete mit salinärer Überdeckung in Deutschland mit Berücksichtigung von Erdbebenzonen /SCH 15/	28
Abb. 3.2	Boxplots mit $k_f$ -Werten der untersuchten Gesteinstypen /APP 02/	31
Abb. 3.3	Großräumige Grundwasser-Zirkulationssysteme /DVWK 87/	34
Abb. 3.4	Übersichtskarte der Tiefenwasser-Fazies /HÖL 69/	34
Abb. 3.5	Geologisch-tektonische Großstrukturkarte von Mitteleuropa /CAR 75/	35
Abb. 3.6	Zunahme der Gesamtkonzentration gelöster Bestandteile in Schichtwässern des Nordteils der DDR und des Thüringer Beckens mit der Tiefenlage /MÜL 75/	36
Abb. 3.7	Standorte der Beprobungen /MÜH 97/	38
Abb. 3.8	Das Verschlusskonzept des KBS-3-Konzeptes /SKB 11a/	43
Abb. 3.9	Aufbau eines KBS-3 Endlagerbehälters /BEU 16/, /SKB 11a/	44
Abb. 3.10	Schematischer Querschnitt durch eine Bohrlochüberfahrungsstrecke /POS 12/	44
Abb. 3.11	Darstellung des den Endlagerbehälter umgebenden Buffers /SKB 11a/	45
Abb. 3.12	Anzahl der verschiedenen Behältertypen /SKB 11a/	50
Abb. 3.13	Einlagerungsschema von Endlagergebinden in vertikalen Kurzbohrlöchern /DBE 16/	52
Abb. 3.14	Schematische Darstellung der Kompartimente und Komponenten eines Endlagersystems im Vorhaben VerSi I	54
Abb. 3.15	Schematische Darstellung des im Vorhaben VerSi II entwickelten lokations- und funktionsbezogenen Verschlusskomponentenmodells. Universaldarstellung für verschiedene wirtsgesteinsspezifische Einlagerungs- und Verschlusskonzepte	56
Abb. 3.16	Schematische Darstellung des schwedischen KBS-3-Konzeptes durch lokations- und funktionsbezogenen Komponenten (Legende s. Abb. 3.15).	58
Abb. 3.17	Lage des Dispersionsraumes beim KBS3-Konzept	63

Abb. 3.18	Mögliche Lage eines Dispersionsraumes im Falle eines Endlagersystems mit geringpermeabler Überdeckung (s. Kap. 3.6).....	63
Abb. 3.19	Beispielhafte Struktur einer Datenbank mit relevanten Informationen zum Endlagersystemvergleich auf Basis der Abwägungsmethode (in grün: objektive Inhalte, in orange: subjektive Inhalte).....	76
Abb. 3.20	Sicherheitsfunktionen des KBS-3-Konzeptes bezogen auf den Einschluss der Radionuklide /SKB 11a/ .....	83
Abb. 3.21	Sicherheitsfunktionen des KBS-3-Konzeptes bezogen auf die Rückhaltung der Radionuklide /SKB 11a/ .....	87
Abb. 3.22	Kategorisierung der Sicherheitsfunktionen im Vorhaben VerSi II .....	99
Abb. A.1	Vorkommen von gediegenem Kupfer /WIK 17b/ .....	147
Abb. A.2	Korrosion von Kupferrohren für Leitungswasser aufgrund von Lokalelementen /MÖS 14/ .....	148
Abb. A.3	Grundwasserzusammensetzung in Äspö /ROS 12/ .....	150
Abb. A.4	Bandbreite der Zusammensetzung des tiefen granitischen Grundwassers in mg/l /SKB 83/ .....	151
Abb. A.5	Modellierte Porenwasserzusammensetzung im Bentonit im Verlauf einer Aufsättigung nach /KIN 13b/ aus /SEN 10/.....	152
Abb. A.6	Übersicht über die Reaktionen von Kupfer mit einer Chlorid- / Sulfat-haltigen Lösung /KIN 13b/ ADS: Adsorbierte Spezies.....	154
Abb. A.7	Eh-pH Diagramm für Kupfer unter Anwesenheit von Sauerstoff (a) /TAK 05/ bzw. gelöstem Schwefel ( $10^{-1}$ M) (b) /POS 09/.....	156
Abb. A.8	Eh-pH Diagramme von Kupfer bei Anwesenheit von Sulfid ( $10^{-2}$ M) und Meerwasser /MCN 92/ .....	156
Abb. A.9	Eh-pH Diagramme für Kupfer für verschiedene $Cl^-$ Konzentrationen /KIN 11/ .....	157
Abb. A.10	Konzeptionelles Modell zum Ablauf einer Korrosion einer Kupferoberfläche /KIN 13c/. A ist die Anodenfläche und C die Kathodenfläche.....	159
Abb. A.11	Oberflächenrauheit nach der Korrosion von Kupfer im Kontakt mit Porenwasser eines gesättigten Bentonits /KIN 13b/.....	160
Abb. A.12	Oberflächenstruktur nach Korrosion und Korrosionsrate mit und ohne Mikroben.....	161

## Tabellenverzeichnis

Tab. 3.1	$k_f$ -Werte für Gneise in den einzelnen Untersuchungsgebieten /APP 02/ .....	29
Tab. 3.2	Nach Tiefenbereich differenzierte $k_f$ -Werte für Gneis /APP 02/ .....	29
Tab. 3.3	Einteilung von Grundwässern nach der Gesamtkonzentration gelöster Stoffe /MAT 94/ .....	37
Tab. 3.4	pH-Wert und Konzentrationsbereiche ausgewählter Anionen [ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ] für Grubenwässer /MÜH 97/ .....	38
Tab. 3.5	Konzentrationsbereiche ausgewählter Kationen [ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ] für Grubenwässer /MÜH 97/ .....	38
Tab. 3.6	„Chemically favourable conditions“ /SKB 11a/ .....	39
Tab. 3.7	Behälteranzahl, Anteil am gesamten Behälteraufkommen /DBE 16/ .....	48
Tab. 3.8	Abfallart und Anzahl der abgebrannten Brennelemente /SKB 10a/ .....	49
Tab. 3.9	Erläuterung der Verschlusskomponenten und deren Schutzfunktion .....	57
Tab. 3.10	Ordinale Buchstabenskala für Robustheit und Relevanz.....	66
Tab. 3.11	Relevanzwichtig nach VerSi I (geändert aus /FIS 10/, Anhang 2) .....	67
Tab. 3.12	Ableitung von Robustheitsdefiziten durch Subtraktion der Relevanz-Rangzahlen von den Robustheits-Rangzahlen nach VerSi I (nach /FIS 10/.....	68
Tab. 3.13	Ergebnistabelle Relevanz/Robustheit und deren Korrelation (geändert nach /FIS 10/) für ein Wirtsgestein nach VerSi I.....	68
Tab. 3.14	Auszug des Beispieldatensatzes von 25 (Wirtsgestein Z) bzw. 30 (Wirtsgestein X) Sicherheitsfunktionen mit Bewertung.....	70
Tab. 3.15	Pivot-Tabelle zur Ableitung von Robustheitsdefiziten (aus dem Beispieldatensatz) für ein Wirtsgestein. ....	71
Tab. 3.16	Ergebnistabelle Relevanz/Robustheit der Sicherheitsfunktionen (SF) und deren Korrelation (geändert nach /FIS 10/) für verschiedene Wirtsgesteine aus VerSi I.....	72
Tab. 3.17	Pivot-Tabelle zum Vergleich von Robustheitsdefiziten (aus dem Beispieldatensatz) für verschiedene Wirtsgesteine (SF = komponentenspezifische Sicherheitsfunktion und WG = Wirtsgestein).....	74

Tab. 3.18	Auszug des Beispieldatensatzes von 25 (Wirtsgestein Z) bzw. 30 (Wirtsgestein X) Sicherheitsfunktionen mit Bewertung und ergänzenden Informationen .....	77
Tab. 3.19	Pivot-Tabelle zum systemübergreifenden Vergleich der Wirkungsphasen von Barrieren für den Beispieldatensatz (gekürzt) .....	78
Tab. 3.20	Pivot-Tabelle zur Relevanz und Robustheit der Wirkungsphasen von Sicherheitsfunktionen des Beispieldatensatzes .....	78
Tab. 3.21	Komponenten zur Sicherheitsfunktion ISF_MS-a und charakteristische Parameter für die Robustheitsbewertung .....	101
Tab. 3.22	Komponenten zur Sicherheitsfunktion ISF_MS-b und charakteristische Parameter für die Robustheitsbewertung .....	102
Tab. 3.23	Komponenten zur Sicherheitsfunktion ISF_PS-a und charakteristische Parameter für die Robustheitsbewertung .....	103
Tab. 3.24	Komponenten zur Sicherheitsfunktion ISF_PS-b und charakteristische Parameter für die Robustheitsbewertung .....	104
Tab. 3.25	Komponenten zur Sicherheitsfunktion ISF_PS-c und charakteristische Parameter für die Robustheitsbewertung .....	105
Tab. 3.26	Komponenten zur Sicherheitsfunktion ISF_VG-a und charakteristische Parameter für die Robustheitsbewertung .....	106
Tab. 3.27	Komponenten zur Sicherheitsfunktion ISF_VG-b und charakteristische Parameter für die Robustheitsbewertung .....	106
Tab. 3.28	Komponenten zur Sicherheitsfunktion ISF_VT-b und charakteristische Parameter für die Robustheitsbewertung .....	107
Tab. 3.29	Komponenten zur Sicherheitsfunktion ISF_VU-b und charakteristische Parameter für die Robustheitsbewertung .....	109
Tab. 3.30	Charakteristische Prozesse und Parameter für die RSF_DW-a der entsprechenden Komponenten .....	110
Tab. 3.31	Charakteristische Parameter für die RSF_DW-b der entsprechenden Komponenten .....	111
Tab. 3.32	Charakteristische Parameter für die RSF_RT-a der entsprechenden Komponenten .....	112
Tab. 3.33	Charakteristische Parameter für die RSF_RT-b der entsprechenden Komponenten. ....	112

Tab. 3.34	Charakteristische Parameter für die RSF_AT-a der entsprechenden Komponenten .....	113
Tab. 3.35	Charakteristische Parameter für die RSF_AT-b der entsprechenden Komponenten. ....	114
Tab. 3.36	Charakteristische Parameter für die RSF_AT-c der entsprechenden Komponenten .....	115
Tab. 3.37	Charakteristische Parameter für die RSF_AT-d der entsprechenden Komponenten .....	115
Tab. 3.38	Charakteristische Parameter für die RSF_AT-e der entsprechenden Komponenten .....	116
Tab. 3.39	Charakteristische Parameter für die RSF_AT-f der entsprechenden Komponenten .....	116
Tab. 3.40	Charakteristische Parameter für die RSF_LT-b der entsprechenden Komponenten .....	117
Tab. 3.41	Zusammenfassende Tabelle der Sicherheitsfunktionen .....	119
Tab. 3.42	Beispielhafte Relevanzwichtung der komponentenspezifischen rückhaltenden Sicherheitsfunktionen für Kristallin (KBS-3-Konzept) .....	125
Tab. A.1	Berichte der SKB zum Korrosionsverhalten von Kupfer (weitere im Text) .....	149





## Literaturverzeichnis

- /AKE 02/ Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd): Auswahlverfahren für Endlagerstandorte, Empfehlungen des AkEnd - Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte, Abschlussbericht. 260 S.: Köln, Dezember 2002.
- /APP 02/ Appel, D., Habler, W.: Quantifizierung der Wasserdurchlässigkeit von Gesteinen als Voraussetzung für die Entwicklung von Kriterien zur Grundwasserbewegung. Phase 2: Auswertung der Datensätze für die Kriterienentwicklung und Datenbank "Gebirgsdurchlässigkeit" (auf CD-ROM). Hrsg.: Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AkEnd), BfS-Schriften, 8377-9-6, 14. Dezember 2002.
- /APP 15/ Appel, D., Kreusch, J., Neumann, W.: Darstellung von Entsorgungsoptionen, Transversalprojekt Interdisziplinäre Risikoforschung Arbeitspaket Interdisziplinäre Risikoforschung Modul 1: Entsorgungsoptionen und -systeme. ENTRIA-Arbeitsbericht, ENTRIA-Arbeitsbericht-01, 176 S., 2015.
- /BER 17/ Bertrams, N., Herold, P., Herold, M., Krone, J., Lommerzheim, A., Prignitz, S., Kuate, E. S.: Entwicklung eines technischen Konzeptes für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle und ausgediente Brennelemente im Kristallingestein in Deutschland (KONEKD). DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC), TEC-20-2017-AB, 240 S.: Peine, September 2017.
- /BEU 16/ Beuth, T., Faß, T., Fischer-Appelt, K., Hartwig-Thurat, E., Larue, P.-J.: Stellungnahme zu radiologischen Auswirkungen des geplanten Endlagers in Forsmark (Schweden). Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, 189 S., März 2016.
- /BFS 05/ Bundesamt für Strahlenschutz (BfS): Konzeptionelle und sicherheitstechnische Fragen der Endlagerung radioaktiver Abfälle – Wirtsgesteine im Vergleich, Synthesebericht des Bundesamtes für Strahlenschutz. 189 S.: Salzgitter, 4. November 2005.

- /BHA 13/ Bhaskaran, G., Carcea, A., Ulaganathan, J., Wang, S., Huang, Y., Newman, R. C.: Fundamental aspects of stress corrosion cracking of copper relevant to the Swedish deep geologic repository concept. Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Technical Report, TR-12-06, 2013.
- /BMU 10/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle. 22 S.: Bonn, 30. September 2010.
- /BMUB 15a/Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB): Programm für eine verantwortungsvolle und sichere Entsorgung bestrahlter Brennelemente und radioaktiver Abfälle (Nationales Entsorgungsprogramm). 26 S.: Bonn, August 2015.
- /BMUB 15b/Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB): Programm für eine verantwortungsvolle und sichere Entsorgung bestrahlter Brennelemente und radioaktiver Abfälle, (Nationales Entsorgungsprogramm), ENTWURF vom 06. Januar 2015. 6. Januar 2015.
- /BOL 12/ Bollingerfehr, W., Filbert, W., Dörr, S., Herold, P., Lerch, C., Burgwinkel, P., Charlier, F., Thomauske, B., Bracke, G., Kilger, R.: Endlagerauslegung und -optimierung, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, Bericht zum Arbeitspaket 6. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-281, 285 S.: Köln, 2012.
- /BOL 14/ Bollingerfehr, W., Herold, P., Dörr, S., Filbert, W.: Auswirkungen der Sicherheitsanforderung Rückholbarkeit auf existierende Einlagerungskonzepte und Anforderungen an neue Konzepte, Abschlussbericht. DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC), TEC-21-2013-AB, 142 S.: Peine, 2014.
- /BOM 14/ Boman, M., Ottosson, M., Berger, R., Andersson, Y., Hahlin, M., Björefors, F., Gustafsson, T.: Corrosion of copper in ultrapure water. Hrsg.: Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), SKB Report, R-14-07, 88 S.: Stockholm, Sweden, 2014.
- /BON 97/ Bond, A. E., Hoch, A. R., Jones, G. D., Tomczyk, A. J., Wiggin, R. M., Worraker, W. J.: Assessment of a spent fuel disposal canister Assessment

studies for a copper canister with cast steel inner component. Hrsg.: Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Technical Report, TR-97-19, 185 S.: Sweden, 1997.

- /BRA 01/ Brasser, T., Fischer-Appelt, K., Larue, P.-J., Mönig, J.: Hydrochemischer Charakter von Tiefenwässern in ausgewählten Regionen Deutschlands, Fachliche Unterstützung des BMU-Arbeitskreises zur Auswahl von Endlagerstandorten. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Anlage 1 zu GRS-A-2939, August 2001.
- /BRA 02/ Brasser, T., Brewitz, W.: Anwendbarkeit der Indikatoren "teufenabhängige Mineralisation / Salzgehalt" für die Erfüllung der allgemeinen Anforderung "keine oder langsame Grundwasserbewegung", Bericht an den AKEnd. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-A-2956, 18. Februar 2002.
- /BRA 08/ Brasser, T., Herbert, H.-J., Miehe, R., Schmidt, G.: Anhang Wirtsgesteine, Potenzielle Wirtsgesteine und ihre Eigenschaften. In: Müller-Lyda, I., Sailer, M.: Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in Deutschland, BMWi-Vorhaben, FKZ 02E9783 & 02E9793. GRS-247, ISBN 978-3-939355-22-9, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Öko-Institut e.V.: Braunschweig / Darmstadt, September 2008.
- /BRÄ 94/ Bräuer, V., Reh, M., Schulz, P., Schuster, P., Sprado, K.-H.: Endlagerung stark wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands, Untersuchung und Bewertung von Regionen in nichtsalinaren Formationen. Hrsg.: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Archiv-Nr.: 112642 Hannover; 2025039 Berlin; Tgb.-Nr.: 12437/91, 114 S.: Hannover, 1994.
- /CAR 75/ Carlé, W.: Die Mineral- und Thermalwässer von Mitteleuropa, Geologie, Chemismus, Genese. 643 S., ISBN 3804704611, Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft: Stuttgart, 1975.
- /CAR 16/ Carpén, L., Rajala, P., Huttunen-Saarivirta, E., Raunio, M., Bomberg, M.: Microbial influence on corrosion of copper in the repository environment.

Präsentation, Copper corrosion seminar, Finnish Research Programme on Nuclear Waste Management (KYT): Espoo, Finland, 15. Dezember 2016.

/DBE 16/ DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC): Gutachten Flächenbedarf für ein Endlager für wärmeentwickelnde, hoch radioaktive Abfälle. Hrsg.: Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, K-MAT 58, 92 S., 2016.

/DVWK 87/ Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau (DVWK): Erkundung tiefer Grundwasser-Zirkulationssysteme, Grundlagen und Beispiele. Schriftenreihe des Deutschen Verbandes für Wasserwirtschaft und Kulturbau, Bd. 81, 223 S., ISBN 3-490-08197-8, Parey: Hamburg, 1987.

/ESK 11/ Entsorgungskommission (ESK): Rückholung/Rückholbarkeit hochradioaktiver Abfälle aus einem Endlager - ein Diskussionspapier. Hrsg.: RSK/ESK-Geschäftsstelle beim Bundesamt für Strahlenschutz, Ausschuss Endlagerung radioaktiver Abfälle (EL), 45 S., 2. September 2011.

/ESK 16/ Entsorgungskommission (ESK): Stellungnahme der ESK - Endlagerforschung in Deutschland: Anmerkungen zu Forschungsinhalten und Forschungssteuerung. 61 S., 12. Mai 2016.

/FIS 10/ Fischer-Appelt, K., Baltes, B.: Abwägungsmethodik für den Vergleich von Endlagersystemen in unterschiedlichen Wirtsgesteinsformationen - Anleitung zur Anwendung der Abwägungsmethodik, Abschlussbericht zum Vorhaben 3607R02589 VerSi „Evaluierung der Vorgehensweise“. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-A-3536: Köln, 1. Dezember 2010.

/FIS 13/ Fischer-Appelt, K., Baltes, B., Buhmann, D., Larue, P.-J., Mönig, J.: Synthesebericht für die VSG, Bericht zum Arbeitspaket 13, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-290, 424 S., ISBN 978-3-939355-66-3, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Köln, 2013.

/HAN 13/ Hans Magnusson, Karin Frisk: Thermodynamic evaluation of Cu-H-O-S-P system – Phase stabilities and solubilities for OFP-copper. Hrsg.: Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Technical Report, TR-13-11, 42 S., 2013.

- /HÖL 69/ Hölting, B.: Beiträge zur Hydrochemie der Tiefenwässer. Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft, Nr. 121, S. 19–44, 1969.
- /HUL 11/ Hultquist, G., Graham, M. J., Szakalos, P., Sproule, G. I., Rosengren, A., Gråsjö, L.: Hydrogen gas production during corrosion of copper by water. Corrosion Science, Bd. 53, Nr. 1, S. wurde 310–319, DOI 10.1016/j.corsci.2010.09.037, 2011.
- /HUT 16/ Huttunen-Saarivirta, E., Rajala, P., Carpén, L.: Corrosion behaviour of copper under biotic and abiotic conditions in anoxic ground water, Electrochemical study. Electrochimica Acta, Bd. 203, S. 350–365, DOI 10.1016/j.electacta.2016.01.098, 2016.
- /HUT 17/ Huttunen-Saarivirta, E., Rajala, P., Bomberg, M., Carpén, L.: Corrosion of copper in oxygen-deficient groundwater with and without deep bedrock micro-organisms, Characterisation of microbial communities and surface processes. Applied Surface Science, Bd. 396, S. 1044–1057, DOI 10.1016/j.apsusc.2016.11.086, 2017.
- /IAEA 11/ International Atomic Energy Agency (IAEA): Disposal of Radioactive Waste. IAEA Specific Safety Requirements, SSR-5, 62 S., ISBN 978-92-0-103010-8: Vienna, 2011.
- /JOB 16/ Jobmann, M., Becker, D.-A., Hammer, J., Jahn, S., Lommerzheim, A., Müller-Hoeppe, N., Noseck, U., Krone, J., Weber, J. R., Weitkamp, A., Wolf, J.: Projekt CHRISTA: Machbarkeitsuntersuchung zur Entwicklung einer Sicherheits- und Nachweismethodik für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle im Kristallingestein in Deutschland. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC), TEC-20-2016-AB, 20. Oktober 2016.
- /JOB 17/ Jobmann, M., Bebiolka, A., Jahn, S., Lommerzheim, A., Maßmann, J., Meleshyn, A., Mrugalla, S., Reinhold, K., Rübél, A., Stark, L., Ziefle, G.: Projekt ANSICHT, Sicherheits- und Nachweismethodik für ein Endlager im Tongestein in Deutschland, Synthesebericht. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, Bundesanstalt für Geowissenschaften

und Rohstoffe (BGR), DBE TECHNOLOGY GmbH (DBETEC), TEC-19-2016-AB, 30. März 2017.

- /JOH 12/ Johansson, A. J., Brinck, T.: Mechanisms and energetics of surface reactions at the copper-water interface – A critical literature review with implications for the debate on corrosion of copper in anoxic water. Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Technical Report, TR-12-07, 33 S.: Stockholm, Schweden, 2012.
- /KIN 02/ King, F.: Corrosion of copper in alkaline chloride environments. Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), SKB Technical Report, TR-02-25, 71 S., August 2002.
- /KIN 11/ King, F., Lilja, C., Pedersen, K., Pitkänen, P., Vähänen, M.: An update of the state-of-the-art report on the corrosion of copper under expected conditions in a deep geologic repository. Technical Report, TR-10-67, Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), 2011.
- /KIN 13a/ King, F.: A review of the properties of pyrite and the implications for corrosion of the copper canister. Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Technical Report, TR-13-19, 50 S.: Stockholm, Schweden, 2013.
- /KIN 13b/ King, F., Lilja, C.: Localised corrosion of copper canisters in bentonite pore water. Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Technical Report, TR-13-27: Stockholm, Dezember 2013.
- /KIN 13c/ King, F., Lilja, C., Vähänen, M.: Progress in the understanding of the long-term corrosion behaviour of copper canisters. Journal of Nuclear Materials, Bd. 438, 1-3, S. 228–237, DOI 10.1016/j.jnucmat.2013.02.080, 2013.
- /KOM 16/ Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe: Abschlussbericht der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe. K-Drs. 268, 683 S.: Berlin, 30. August 2016.
- /LIU 06/ Liu, J.: Coupled Transport/Reaction Modelling of Copper Canister Corrosion Aided by Microbial Processes. Hrsg.: Swedish Nuclear Power Inspectorate (SKI), 71 S.: Stockholm, Sweden, 2006.

- /MAT 94/ Mattheß, G.: Die Beschaffenheit des Grundwassers. Lehrbuch der Hydrogeologie, Bd. 2, 3. Aufl., 499 S., ISBN 3443010083, Borntraeger: Berlin, Stuttgart, 1994.
- /MCN 92/ McNeil, M. B., Little, B. J.: Corrosion Mechanisms for Copper and Silver Objects in near-surface environments. Journal of the American Institute for Conservation, Bd. 31, Nr. 3, S. 355–366, 1992.
- /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.
- /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.
- /MÖS 14/ Möser, M.: Lochfraß an Kupferrohren einer Wasserleitung. Stand vom 10. Februar 2014, erreichbar unter [http://www.martin-moeser.de/Wasser/Lochfrass\\_Kupferrohr.html](http://www.martin-moeser.de/Wasser/Lochfrass_Kupferrohr.html), abgerufen am 1. Februar 2017.
- /MÜH 97/ Mühlenberg, U., Brasser, T., Hertés, U.: Charakterisierung von mineralisierten Tiefengrundwässern in nichtsalinaren Festgesteinen, Untersuchung von Wechselwirkungsreaktionen mit Abfällen bei der immissionsneutralen Ablagerung. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-A-2533, November 1997.
- /MÜL 75/ Müller, E. P., Papendieck, G.: Zur Verteilung, Genese und Dynamik von Tiefenwässern unter besonderer Berücksichtigung des Zechsteins. Zeitschrift für Geologische Wissenschaften, Bd. 3, Nr. 2, S. 167–196, 1975.
- /NUC 93/ Nuclear Regulatory Commission (Hrsg.): Review of Microbially Influenced Corrosion of High-Level Waste Containers. Center for Nuclear Waste Regulatory Analyses, CNWRA 93-014, 104 S.: San Antonio, Texas, 1993.

- /OLL 13/ Ollila, K.: Copper corrosion experiments under anoxic conditions. Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), SKB Report, R-13-34, June 2013.
- /OTT 16/ Ottosson, M., Boman, M., Berastegui, P., Andersson, Y., Hahlin, M., Korvela, M., Berger, R.: Copper in ultrapure water. Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Technical Report, TR-16-01, 78 S.: Stockholm, Sweden, April 2016.
- /PAP 99/ Papp, R.: GEISHA, Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten in Salz und Hartgestein. Hrsg.: Projektträgerschaft des BMBF für Entsorgung (PTE), Forschungszentrum Karlsruhe GmbH (FZK), Wissenschaftliche Berichte, FZKA-PTE Nr. 3, 200 S.: Karlsruhe, Mai 1999.
- /PED 10/ Pedersen, K.: Analysis of copper corrosion in compacted bentonite clay as a function of clay density and growth conditions for sulfate-reducing bacteria. *Journal of applied microbiology*, Bd. 108, Nr. 3, S. 1094–1104, DOI 10.1111/j.1365-2672.2009.04629.x, 2010.
- /PER 11/ Persson, J., Lydmark, S., Edlund, J., Pääjärvi, A., Pedersen, K.: Microbial incidence on copper and titanium embedded in compacted bentonite clay. Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), SKB Report, R-11-22, 28 S.: Stockholm, Schweden, 2011.
- /POS 09/ Poston, P.: Opal Creek Wilderness Area, Ruth Mine/Jawbone Flats Tailings Pile Water Analysis. Wester Oregon University, Stand vom 9. März 2009, erreichbar unter <http://www.wou.edu/las/physci/poston/ruthmine.htm>, abgerufen am 15. Februar 2017.
- /POS 12/ 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, Dezember 2012.
- /PUI 00/ Puigdomenech, I., Taxén, C.: Thermodynamic data for copper, Implications for the corrosion of copper under repository conditions. Hrsg.: Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Technical Report, Bd. 2000, TR-00-13, 93 S.: Stockholm, Sweden, 2000.



- /RAI 12/ Raiko, H., Pastina, B., Jalonen, T., Nolvi, L., Pitkänen, J., Salonen, T.: Canister production line 2012, Design production and initial state of the canister. POSIVA, 2012-16, 174 S., ISBN 978-951-652-197-1, Posiva Oy: Oululuoto, 2012.
- /ROS 12/ Rosborg, B., Kosec, T., Kranjc, A., Kuhar, V., Legat, A.: The corrosion rate of copper in a bentonite test package measured with electric resistance sensors. Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), SKB Report, R-13-15, 64 S.: Stockholm, Schweden, 2012.
- /ROT 09/ Rothe, P.: Die Geologie Deutschlands, 48 Landschaften im Portrait. 3. Aufl., 240 S., ISBN 9783896786845, Wissenschaftliche Buchgesellschaft: Darmstadt, 2009.
- /RSK 06/ Reaktor-Sicherheitskommission (RSK): STELLUNGNAHME zum Synthesebericht des BfS „Konzeptionelle und sicherheitstechnische Fragen der Endlagerung radioaktiver Abfälle – Wirtsgesteine im Vergleich“, 395. Sitzung. 28 S., 13. September 2006.
- /RÜB 14/ Rübél, A., Meleshyn, A.: Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein, Sicherheitskonzept und Nachweisstrategie, BMWi-Vorhaben, FKZ 02E11061A. GRS-338, 33 S., ISBN 978-3-944161-18-1, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Braunschweig, 2014.
- /SCH 15/ Schreiber, U., Jentzsch, G., Ewert, T.: Geologische Potentiale zur Einlagerung von radioaktiven Abfallstoffen unterhalb von stratiformen Salzformationen, Konzeptstudie für ein alternatives Endlagermodell. Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, K-MAT 42, 28 S., 22. April 2015.
- /SEN 10/ Sena, C., Salas, J., Arcos, D.: Aspects of geochemical evolution of the SKB near field in the frame of SR-Site. Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Technical Report, TR-10-59, 104 S.: Stockholm, Schweden, 2010.

- /SKB 83/ The Swedish Corrosion Research Institute and its reference group: Corrosion resistance of a copper canister for spent nuclear fuel. Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), Technical Report, 83-24, 104 S.: Stockholm, Schweden, 1983.
- /SKB 10a/ Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB): Spent nuclear fuel for disposal in the KBS-3 repository. SKB Technical Report, TR-10-13, 91 S.: Stockholm, Sweden, 2010.
- /SKB 10b/ Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB): Radionuclide transport report for the safety assessment SR-Site. SKB Technical Report, TR-10-50, 318 S.: Stockholm, Sweden, 2010.
- /SKB 10c/ Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB): Data report for the safety assessment SR-Site. Technical Report, TR-10-52: Stockholm, Dezember 2010.
- /SKB 11a/ Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB): Volume I. In: Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB): Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark, Main report of the SR-Site project. SKB Technical Report, TR-11-01, S. 1–276: Stockholm, Sweden, März 2011.
- /SKB 11b/ Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB): Volume II. In: Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB): Long-term safety for the final repository for spent nuclear fuel at Forsmark, Main report of the SR-Site project. SKB Technical Report, TR-11-01, S. 279–552: Stockholm, Sweden, März 2011.
- /SMA 05/ Smart, N. R., Rance, A. P., Fennell, P. A.H.: Galvanic corrosion of copper-cast iron couples. Serco Assurance, Technical Report, TR-05-06, Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), 2005.
- /SPE 17/ Spektrum Verlag: Lexikon der Geowissenschaften, Eh-pH-Diagramme. Stand vom 13. Februar 2017, erreichbar unter <http://www.spektrum.de/lexikon/geowissenschaften/eh-ph-diagramme/3729>, abgerufen am 13. Februar 2017.

- /SSM 08/ Swedish Radiation Safety Authority (SSM, Strål Säkerhets Myndigheten):  
The Swedish Radiation Safety Authority's Regulations concerning the Protection of Human Health and the Environment in connection with the Final Management of Spent Nuclear Fuel and Nuclear Waste. Hrsg.: Yngvesson, U., SSMFS 2008:37, 18 S., 19. Dezember 2008.
- /SSV 17/ Verordnung über den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen (Strahlenschutzverordnung - StrlSchV) in der Fassung vom 20. Juli 2001 (BGBl. I 2001 Nr. 38 S. 1714; 2002 I S. 1459), zuletzt geändert 27. Januar 2017 (BGBl. I 2017 S. 114, 1222).
- /STA 15/ Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz – StandAG) in der Fassung vom 23. Juli 2013 (BGBl. I 2013 Nr. 41 S. 2553), zuletzt geändert 31. August 2015 (BGBl. I 2015 S. 1474).
- /STA 17a/ Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz – StandAG) in der Fassung vom 15. Mai 2017 (BGBl. I 2017 Nr. 26 S. 1074), zuletzt geändert 20. Juli 2017 (BGBl. I 2017 Nr. 52 S. 2808).
- /STA 17b/ Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz – StandAG) in der Fassung vom 15. Mai 2017 (BGBl. I 2017 Nr. 26 S. 1074).
- /SZA 12/ Szakálos, P., Seetharaman, S.: Corrosion of copper canister. Swedish Radiation Safety Authority (SSM, Strål Säkerhets Myndigheten), Technical Note no., 2012:17, 46 S., 2012.
- /TAK 05/ Takeno, N.: Atlas of Eh-pH diagrams, Intercomparison of thermodynamic databases. Hrsg.: National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Research Center for Deep Geological Environments, Geological Survey of Japan Open File Report, Nr. 419, 287 S., 2005.
- /TAX 14/ Taxén, C., Sparr, M.: Corrosion properties of copper materials. Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB), SKB Report, R-14-15, March 2014.

/WIK 17a/ Wikipedia: Pivot-Tabelle. Stand vom 22. Mai 2017, erreichbar unter <https://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=161351082>, abgerufen am 6. Juni 2017.

/WIK 17b/ Wikipedia: Kupfer. Stand vom 9. Februar 2017, erreichbar unter <https://de.wikipedia.org/wiki/Kupfer>, abgerufen am 9. Februar 2017.



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

Schwertnergasse 1  
**50667 Köln**

Telefon +49 221 2068-0

Telefax +49 221 2068-888

Boltzmannstraße 14

**85748 Garching b. München**

Telefon +49 89 32004-0

Telefax +49 89 32004-300

Kurfürstendamm 200

**10719 Berlin**

Telefon +49 30 88589-0

Telefax +49 30 88589-111

Theodor-Heuss-Straße 4

**38122 Braunschweig**

Telefon +49 531 8012-0

Telefax +49 531 8012-200

[www.grs.de](http://www.grs.de)