

ENTRIA-Arbeitsbericht-10

„Identifizierung von Robustheits- defiziten für die vergleichende Bewertung von Referenzmodellen zur Tiefenlagerung“

Methodik und Ergebnisdarstellung

Transversalprojekt
Interdisziplinäre Risikoforschung
Arbeitspaket Interdisziplinäre Risikoforschung

Jürgen Kreusch
Wolfgang Neumann

Kontakt

Dipl.-Geol. Jürgen Kreusch
Dipl.-Phys. Wolfgang Neumann
intac GmbH i.L.
Kleine Düwelstr. 21
30171 Hannover
jkreusch@intac-hannover.de
wneumann@intac-hannover.de

ENTRIA ist ein in der Forschung zur Entsorgung radioaktiver Reststoffe in Deutschland neuartiges Verbundprojekt von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern aus unterschiedlichen Disziplinen, die bisher nur sporadisch kooperierten. Um seine neuen Arbeitsweisen und die Vielfalt integrierter disziplinärer Perspektiven transparent zu machen, werden in den Arbeitsberichten wichtige Zwischenergebnisse vorgestellt. Dies dient einerseits der projektinternen Information. Andererseits werden diese Zwischenergebnisse auch der interessierten Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt. Letzteres geschieht, um Einblicke in die ENTRIA-Forschungspraxis zu gewähren und Ausgangsmaterial für spätere Veröffentlichungen offen zu legen. ENTRIA lebt vom pluralen Austausch. Die Beiträge geben allein die Meinung der Autorin oder des Autors wieder.

ENTRIA wird vom BMBF unter dem Kennzeichen **15S9082 A bis E** gefördert (Zeitraum 2013 bis 2017).

Zitierweise

Kreusch, Jürgen; Neumann, Wolfgang (2018): Identifizierung von Robustheitsdefiziten für die vergleichende Bewertung von Referenzmodellen zur Tiefenlagerung. Methodik und Ergebnisdarstellung. Hannover, ENTRIA-Arbeitsbericht-10

ISSN (Online): 2367-3540

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Inhaltsverzeichnis

Seite

1	Aufgabenstellung	1
2	Beschreibung der Entria-Referenzmodelle	2
2.1	Die drei Referenzmodelle	2
2.2	Referenzmodell Tiefenlager mit sofortigem Verschluss (Typ TE)	3
2.2.1	Variante Endlager in Salzgestein (steile und flache Lagerung)	3
2.2.2	Variante Endlager in Tonstein	4
2.3	Referenzmodell Tiefenlager mit Monitoring und Vorkehrung zur Rückholbarkeit der Abfälle (Typ TM)	5
2.3.1	Variante Tiefenlager in Salzgestein (steile und flache Lagerung) mit Monitoring und Vorkehrung zur Rückholung der Abfälle	7
2.3.2	Variante Tiefenlager in Tonstein mit Monitoring und Vorkehrung zur Rückholung der Abfälle	7
3	Das Sicherheitskonzept der Referenzmodelle	8
3.1	Bedeutung des Sicherheitskonzepts	8
3.2	Das Sicherheitskonzept für Tiefenlagerung in Salzgestein	9
3.3	Das Sicherheitskonzept für Tiefenlagerung in Tonstein	11
4	Ableitung der Sicherheitsfunktionen für die Referenzmodelle	14
4.1	Grundsätzliches zu den Sicherheitsfunktionen	14
4.2	Systemkomponenten und abgeleitete Sicherheitsfunktionen	15
5	Grundsätze, Rahmenbedingungen und Konsequenzen der vergleichenden Bewertung der Referenzmodelle	21

	Seite
6	Methodische Vorgehensweise bei der Ermittlung von Robustheitsdefiziten
	23
6.1	Grundsätzliches zur Robustheit der Tiefenlager
	23
6.2	Beschreibung der Vorgehensweise bei der Ermittlung von Robustheitsdefiziten
	24
6.2.1	Schritt 1: Zusammenstellung der Informationsgrundlagen
	24
6.2.2	Schritt 2: Ableitung der Sicherheitsfunktionen für die Referenzmodelle
	26
6.2.3	Schritt 3: Ermittlung der Relevanz der Sicherheitsfunktionen
	27
6.2.4	Schritt 4: Bestimmung der Robustheit der Sicherheitsfunktionen
	40
6.2.5	Schritt 5: Ermittlung der Robustheitsdefizite aus dem Verhältnis zwischen Robustheit und Relevanz
	47
6.2.6	Schritt 6: Ergebnisanalyse und Schlussfolgerungen
	59
7	Ergebnisanalyse: Schlussfolgerungen aus den ermittelten Robustheitsdefiziten der Referenzmodellen der Tiefenlagerung
	60
8	Quellen
	66
9	Glossar
	69
10	Abkürzungsverzeichnis
	71

Verzeichnis der Abbildungen und Tabellen

Abbildungen:

Abb. 1:	Schematische Darstellung eines generischen Tiefenlagers mit Monitoring und der Möglichkeit der Rückholung der Abfälle	6
Abb. 2:	Schematische Darstellung der Komponenten eines Tiefenlagersystems.	17
Abb. 3:	Verfahrensablauf zur Ermittlung von Robustheitsdefiziten von Sicherheitsfunktionen mittels ihrer Relevanz und Robustheit	25

Tab. 1:	Radionuklidrückhaltende Sicherheitsfunktionen für Tiefenlager in Salzgestein (steile u. flache Lagerung) und Tonstein	20
Tab. 2-1 bis 2-10:	Relevanz der radionuklidrückhaltenden Sicherheitsfunktionen bei Lagerung in Salz und Tonstein	30 bis 39
Tab. 3:	Zusammenfassende Bewertung der Robustheit der rückhaltenden Sicherheitsfunktionen für die Systemkomponente Behälter für unterschiedliche Wirkzeiträume	44
Tab. 4:	Zusammenfassende Bewertung der Robustheit der rückhaltenden Sicherheitsfunktionen für die Systemkomponente Versatz für unterschiedliche Wirkzeiträume	45
Tab. 5:	Zusammenfassende Bewertung der Robustheit der rückhaltenden Sicherheitsfunktionen für die Systemkomponente Abdichtung/Dämme für unterschiedliche Wirkzeiträume	45
Tab. 6:	Zusammenfassende Bewertung der Robustheit der rückhaltenden Sicherheitsfunktionen für die Systemkomponente Schachtverschluss für unterschiedliche Wirkzeiträume	46
Tab. 7:	Zusammenfassende Bewertung der Robustheit der rückhaltenden Sicherheitsfunktionen für die Systemkomponente ewG für unterschiedliche Wirkzeiträume	46
Tab. 8:	Schema zur Ableitung von Robustheitsdefiziten von Sicherheitsfunktionen aus dem Verhältnis von Robustheit und Relevanz	49
Tab. 9:	Ermittlung der Robustheitsdefizite der Sicherheitsfunktionen der Komponente Abfallbehälter für die Tiefenlager TE und TM in Salz	50
Tab. 10:	Ermittlung der Robustheitsdefizite der Sicherheitsfunktionen der Komponente Abfallbehälter für die Tiefenlager TE und TM in Tonstein	51
Tab. 11:	Ermittlung der Robustheitsdefizite der Sicherheitsfunktionen der Komponente Versatz für die Tiefenlagertypen TE und TM bei Lagerung in Salz	52
Tab. 12:	Ermittlung der Robustheitsdefizite der Sicherheitsfunktionen der Komponente Versatz für die Tiefenlagertypen TE und TM in Tonstein	53
Tab. 13:	Ermittlung der Robustheitsdefizite der Sicherheitsfunktionen der Komponente Abdichtung/Dämme für die Tiefenlagertypen TE und TM bei Lagerung in Salz	54

	Seite
Tab. 14: Ermittlung der Robustheitsdefizite der Sicherheitsfunktionen der Komponente Abdichtung/Dämme für die Tiefenlagertypen TE und TM bei Lagerung in Tonstein	55
Tab. 15: Ermittlung der Robustheitsdefizite der Sicherheitsfunktionen der Komponente Schachtverschluss für die Tiefenlagertypen TE und TM bei Lagerung in Salz	56
Tab. 16: Ermittlung der Robustheitsdefizite der Sicherheitsfunktionen der Komponente Schachtverschluss für die Tiefenlagertypen TE und TM bei Lagerung in Tonstein	57
Tab. 17: Ermittlung der Robustheitsdefizite der Sicherheitsfunktionen der Komponente ewG für die Tiefenlagertypen TE und TM bei Lagerung in Salz	58
Tab. 18: Ermittlung der Robustheitsdefizite der Sicherheitsfunktionen der Komponente ewG bei Lagerung in Tonstein für die Tiefenlagertypen TE und TM bei Lagerung in Tonstein	59

ANHÄNGE: Bestimmung der Robustheit der radionuklidrückhaltenden Sicherheitsfunktionen

- ANHANG A: Komponente Abfallbehälter	Anhang A – S. 1 bis 27
- ANHANG B: Komponente Versatz	Anhang B – S. 1 bis 32
- ANHANG C: Komponente Abdichtung/Dämme	Anhang C – S. 1 bis 29
- ANHANG D: Komponente Schachtverschluss	Anhang D – S. 1 bis 31
- ANHANG E: Komponente ewG	Anhang E – S. 1 bis 52

1 Aufgabenstellung

In diesem Bericht werden zwei der drei im Projekt Entria zu betrachtenden Entsorgungsoptionen für radioaktive Abfälle auf mögliche Robustheitsdefizite mit Blick auf ihre Langzeitsicherheit hin untersucht. Dabei handelt es sich um zwei Optionen der Lagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen, nämlich die **Endlagerung mit schnellem Verschluss des Tiefenlagers am Ende der Betriebsphase** und **Tiefenlagerung mit Monitoring und der Möglichkeit der Rückholung von Abfällen**. Beide Optionen fallen unter den Oberbegriff Tiefenlagerung.

Hinzu kommt die Option **langfristige Oberflächenlagerung**. Auf diese Option wird in diesem Bericht nicht näher eingegangen. Gleiches gilt für die zeitweise obertägige Pufferlagerung von Abfällen bei End- bzw. Tiefenlager. Sie werden in einem separaten Bericht auf Robustheit und Robustheitsdefizite untersucht (Neumann & Kreusch 2017 a), weil hierbei nur die Betriebsphase(n) von Bedeutung sind.

Die Untersuchung der beiden Tiefenlageroptionen geschieht anhand generischer Referenzmodelle (s. Kap. 2.1), für deren Nachbetriebsphase mögliche Robustheitsdefizite ihrer relevanten Sicherheitsfunktionen abgeleitet werden. Robustheitsdefizite geben Hinweise auf tatsächliche oder potenzielle Schwächen der Sicherheitsfunktionen. Dadurch lassen sich Unterschiede hinsichtlich der Sicherheit bzw. des Risikos der Referenzmodelle erkennen. Damit bietet sich die Möglichkeit, auf der Ebene der Sicherheitsfunktionen einen qualitativen Vergleich der Referenzmodelle vornehmen zu können. Dass hierbei subjektive Gesichtspunkte nicht völlig ausgeschlossen werden können, muss in Kauf genommen werden.

Der methodische Ansatz wurde von der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit zwischen 2007 und 2010 im Rahmen des Projektes *„Durchführung vergleichender Sicherheitsanalysen für Endlagersysteme zur Bewertung der Methoden und Instrumentarien“* (VerSi) entwickelt (GRS 2010). Er bietet die Möglichkeit der qualitativen vergleichenden Bewertung von Tiefenlagersystemen, indem deren Sicherheitsfunktionen auf mögliche Robustheitsdefizite überprüft werden und diese als Vergleichsgrundlage dienen.

Eine detaillierte Darstellung der Anwendung der Methode in Entria wird in BERICHT A (2016) gegeben. Dort werden auch die durch die generischen Referenzmodelle bedingten notwendigen methodischen Anpassungen und Rahmenbedingungen beschrieben. Darauf wird hier nicht mehr näher eingegangen.

Mit Hilfe dieser Methode wird über die Ermittlung von Robustheitsdefiziten ein Baustein zur Zielerreichung des Arbeitspaketes AP 3.4.3 des Entria-Transversalprojektes *„Interdisziplinäre Risikoforschung“* geliefert, nämlich die vergleichende (Risiko-)Bewertung der Entria-Referenzmodelle.

Die methodische Vorgehensweise bei der Ermittlung von Robustheitsdefiziten ist in einzelne Arbeitsschritte gegliedert (s. Kap. 6). Auf diese Weise werden Ableitung und Relevanz der Sicherheitsfunktionen, die Bestimmung ihrer Robustheiten, die Ermittlung der Robustheitsdefizite aus dem Verhältnis zwischen Relevanz und Robustheit der Sicherheitsfunktionen sowie die Ergebnisanalyse der Robustheitsdefizite möglichst nachvollziehbar dargestellt. Da die konkreten Ermittlungen der Robustheiten der Sicherheitsfunktionen umfangreich sind, werden diese als Anhänge A bis E diesem Bericht angefügt.

2 Beschreibung der Entria-Referenzmodelle

2.1 Die drei Referenzmodelle

In Entria werden drei Referenzmodelle betrachtet. Sie sind generischer Natur und stehen beispielhaft für mögliche zu realisierende Entsorgungsoptionen. Anhand dieser Referenzmodelle sind die wesentlichen sicherheitsrelevanten Unterschiede zu ermitteln, die später für reale Entscheidungen herangezogen werden können. Von den drei Referenzmodellen werden in diesem Bericht nur die beiden Referenzmodelle zur Tiefenlagerung berücksichtigt. Die Risiken der Oberflächenlagerung werden in zwei speziellen Berichten behandelt (Neumann & Kreusch 2017a, 2017b).

Es handelt sich um die Referenzmodelle:

- **Tiefenlagerung ohne explizite Vorkehrungen zur Überwachung und Rückholung der Abfälle (abgekürzt TE).** Es handelt sich um **Endlager** in tiefen geologischen Formationen entsprechend den BMU-Sicherheitsanforderungen (BMU 2010), d.h. schneller Verschluss des Endlagers nach Beendigung der Einlagerung ohne über die Einlagerungsdauer hinausgehende Offenhaltung des Endlagerbergwerks und damit ohne Vorkehrungen zum Monitoring und zur Rückholung der Abfälle. Die Bergung der Abfälle muss aber für 500 Jahre nach dem Verschluss des Endlagers als Notfallmaßnahme gewährleistet werden (StandAG 2017, BMU 2010).
- **Tiefenlagerung mit Monitoring und Möglichkeit zur Rückholbarkeit der Abfälle (abgekürzt TM).** Das Endlagerbergwerk wird für einen festzulegenden Zeitraum nach Abschluss der Einlagerung (100 Jahre?) offen gehalten, gefüllte Einlagerungsfelder werden aber verschlossen. Das Monitoring wird über die gesamte Zeit der Offenhaltung durchgeführt, und die eventuelle Rückholung der Abfälle wird bereits bei ihrer Einlagerung berücksichtigt. Der Zeitpunkt des Verschlusses des Tiefenlagers sowie eine eventuelle Rückholung von Abfällen hängen von den Ergebnissen des Monitorings ab. Für den Fall der Rückholung sind weitere Maßnahmen erforder-

derlich und vorzusehen. Die Bergung von Abfällen muss ebenfalls für 500 Jahre gewährleistet werden.

- **Oberflächenlagerung (abgekürzt OL):** Lagerung der Abfälle in Behältern in einem Gebäude an der Erdoberfläche für einen bestimmten Zeitraum (ca. 200 Jahre). Im Anschluss an die Oberflächenlagerung sind weitere Maßnahmen erforderlich. Das Referenzmodell der Oberflächenlagerung wird in diesem Bericht **nicht** berücksichtigt.

Für die Tiefenlagerung kommen mehrere Wirtsgesteine in Betracht. Es sind dies: Ton, Tonstein, steilstehendes Salz (Salzstöcke), flachlagerndes Salz und Kristallin. Eine Betrachtung der Nachbetriebsphase (nach Verschluss des Tiefenlagers) wird in den Vertikalprojekten VP 5 und VP 6 von ENTRIA nur für die Wirtsgesteine Tonstein und Steinsalz (steil, flach) vorgenommen. Deshalb werden in diesem Bericht auch nur diese beiden Wirtsgesteine berücksichtigt.

Im Folgenden werden die Referenzmodelle, die in den Entria-Vertikalprojekten VP5 und VP6 entwickelt und in gemeinsamer Diskussion zwischen den betroffenen Entria-Teilprojekten festgelegt worden sind (v.a. ENTRIA-PROT 2016a, ENTRIA-PROT 2016b, ENTRIA-PROT 2015, ENTRIA-AB-03 2015), beschrieben. In ENTRIA-PROT (2016a) wurden auch die Wirkzeiträume für die verschiedenen Tiefenlagerkomponenten festgelegt. Sie wurden weitgehend für diesen Bericht übernommen.

Da über die Festlegungen innerhalb Entrias hinaus noch weitere Informationen benötigt werden, ist es notwendig, diese den einschlägigen Untersuchungen, Forschungsergebnissen usw. zu entnehmen. Dazu zählen beispielsweise Arbeiten zum Verhalten von Versatzmaterial, über die Wirksamkeit technischer Abdichtungen oder über die Eigenschaften der Wirtsgesteine Steinsalz und Tonstein.

2.2 Referenzmodell Tiefenlager mit sofortigem Verschluss (Typ TE)

2.2.1 Variante Endlager in Salzgestein (steile und flache Lagerung)

Dieses Referenzmodell sieht sowohl für die steile als auch für die flache Lagerung ein einsöhliges Endlagerbergwerk vor (nur Einlagerungssohle). Der Zugang soll über Schächte erfolgen. Die Einlagerungsstrecken und -felder werden nach und nach im Rückbau mit Abfällen befüllt und anschließend jeweils direkt verschlossen. Nach Abschluss der Einlagerung werden der Rest des Endlagerbergwerks sowie die Schächte ebenfalls verfüllt. Die langfristige Sicherheit des Endlagers soll dann durch den passiv sicheren Zustand der geologischen Barrieren gewährleistet werden. In Abb. 1 (s. Kap. 2.3) wird eine

schematische Darstellung des TM gegeben. Sie entspricht – bis auf die Monitoringstrecke – dem TE. Ein begrenztes Monitoring ist während der Betriebsphase vorgesehen, Vorkehrungen zur Rückholung von Abfällen sind nicht vorgesehen.

Vorgaben für die Endlagermodelle in Salzgestein (steile Lagerung - Salzstock und flachlagernde Salzformationen) nach ENTRIA-AB-03 (2015)

Als Einlagerungsteufe werden bei **steiler Lagerung** 800 m unter GOK (Geländeoberkante) angesetzt. Dabei soll die Salzmächtigkeit oberhalb der Einlagerungssohle bis zum Hutgestein mindestens 200 m betragen; es verbleiben demnach maximal 600 m für die Deckgebirgsmächtigkeit. Die Schutzzone zwischen Einlagerungsbereichen und Anhydrit bzw. anderen problematischen Gesteinsarten soll 100 m betragen. Jede einzelne Einlagerungstrecke wird nach Befüllung durch eine Abdichtung/Damm aus Salzbeton vom restlichen Grubengebäude hydraulisch abgetrennt. Sämtliche verbleibenden restlichen Hohlräume des Grubengebäudes werden so schnell wie möglich mit Salzgrus versetzt. Die Grenztemperatur an der Behälteraußenwand beträgt maximal 200 ° C.

Bei **flacher Lagerung** wird eine Einlagerungsteufe von mindestens 600 m unter GOK angenommen. Die Salzschiebt ist ca. 150 m mächtig. Oberhalb der Einlagerungssohle soll das Wirtsgestein mindestens 100 m mächtig sein. Die Deckgebirgsmächtigkeit beträgt somit rund 450 m. Für die Einlagerung der Abfälle, Abdichtungen, Verfüllung der Hohlräume und Grenztemperaturen gilt das für die steile Lagerung gesagte.

2.2.2 Variante Endlager in Tonstein

Das Referenzmodell des Endlagers in Tonstein entspricht im Grundsatz demjenigen in Salzformationen. Unterschiede zeigen sich beim Wirtsgestein Ton gegenüber Salzgestein v.a. hinsichtlich hydraulischer, geochemischer und gebirgsmechanischer Parameter sowie seiner geringeren Wärmeleitfähigkeit.

Vorgaben für die Endlagermodelle in Tonstein (nach ENTRIA-AB-03 2015)

Als Einlagerungsteufe werden 600 m unter GOK angenommen. Die Tonsteinformation soll 100 m mächtig sein, wobei die Tonsteinmächtigkeit oberhalb der Einlagerungssohle 50 m betragen soll. Die maximale Mächtigkeit des Deckgebirges beträgt damit 500 m.

Die einzelnen Einlagerungstrecken besitzen eine Länge von ca. 63 m. In jede Einlagerungstrecke werden sechs Behälter (Pollux) eingelagert. Jede Einlagerungstrecke wird nach Einbringen der Abfall-

behälter so schnell wie möglich mit Bentonit oder einem Bentonit-Sand-Gemisch versetzt. Zusätzlich wird sie durch eine Abdichtung/Damm aus Bentonit am Beginn jeder Einlagerungsstrecke vom restlichen Grubengebäude hydraulisch isoliert. Wegen des sich entwickelnden Quelldrucks des Bentonits bei seiner Aufsättigung ist zu Beginn jeder Einlagerungsstrecke ein Widerlager aus Beton oder Mauerstein zu errichten. Mit diesen Maßnahmen soll ein Wasserzutritt aus dem offenen Grubengebäude zu den Einlagerungsstrecken verhindert werden.

Die grubenseitigen Bereiche der Widerlager und sonstige verbleibende Grubenhohlräume werden mit Tonstein oder einem Bentonit-Sand Gemisch verfüllt. Die Abdichtung(en) des Schachtverschlusses sollen ebenfalls aus Bentonit bestehen.

Ein Ausbau der Strecken im Tonstein ist stark abhängig von ihrer Tiefenlage und sonstigen standort-spezifischen Verhältnissen. Genauere Aussage dazu sind für die generischen Referenzmodelle nicht festgelegt worden.

Die Grenztemperatur an der Behälteraußenwand beträgt zur Vermeidung von Schädigungen des Tonsteins und des Bentonits maximal 100 ° C.

2.3 Referenzmodell Tiefenlager mit Monitoring und Vorkehrung zu Rückholbarkeit der Abfälle (Typ TM)

Bei der Tiefenlagerung wird dem Prinzip der Reversibilität entsprochen. Es ermöglicht u.a., die eingelagerten Abfälle bei Bedarf oder Notwendigkeit mit überschaubarem Aufwand wieder aus dem Tiefenlager zu entfernen. Auf die eventuelle Rückholung von Abfällen wird deshalb bereits vorsorglich bei ihrer Einlagerung geachtet. Wie lange die Möglichkeit der Rückholung der Abfälle erhalten bleiben soll, wird unterschiedlich beurteilt. Bei Entria wird davon ausgegangen, dass sie mehrere Jahrzehnte nach Einlagerung aller Abfälle gewährleistet werden soll (mindestens 100 a für Einlagerungsphase plus Beobachtungsphase). Mit Beginn der Einlagerung der Abfallgebinde ist auch ihre Rückholbarkeit technisch und organisatorisch zu gewährleisten. Von den Monitoringstrecken aus sind Bohrungen bis ins Niveau der Einlagerungsstrecken vorgesehen, durch die Messinstrumente zur Überwachung des Systemverhaltens herabgelassen werden können. Eine schematische Darstellung des Referenzmodells der Tiefenlagerung (Typ TM) zeigt Abb. 1.

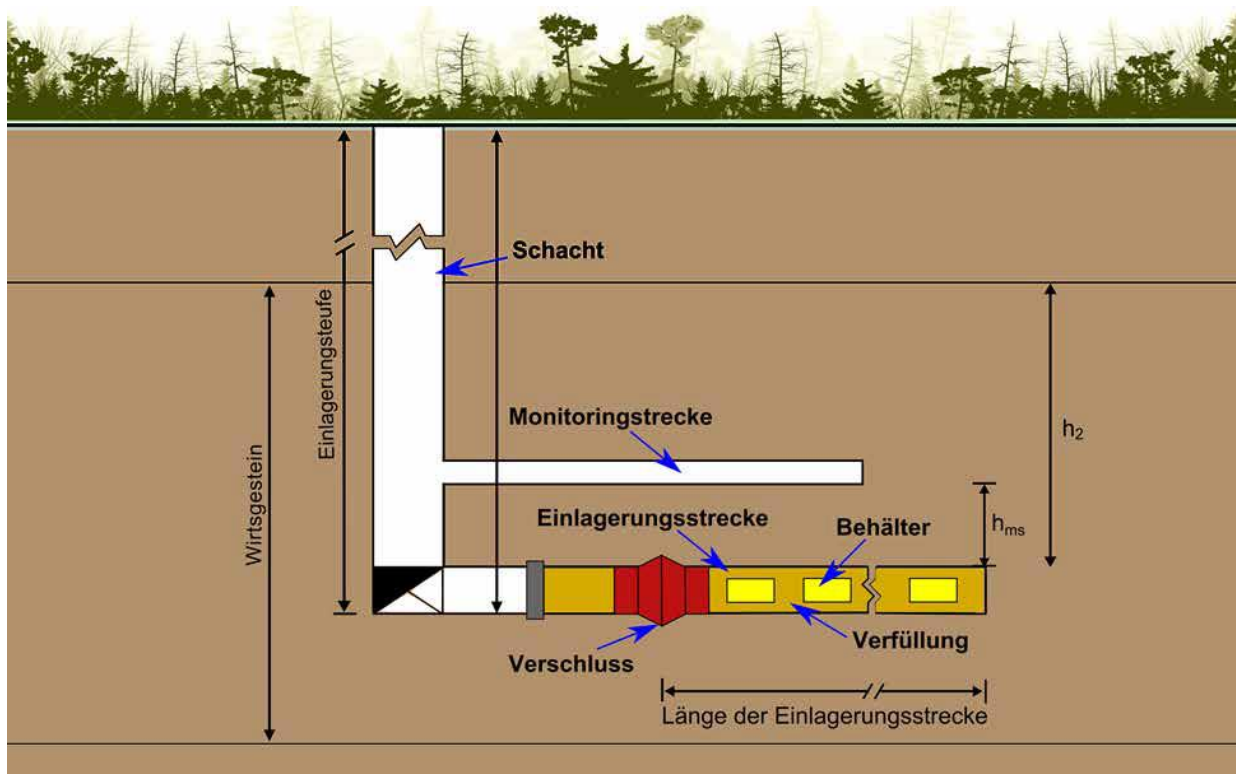


Abb. 1: Schematische Darstellung eines generischen Tiefenlagers mit Monitoring und der Möglichkeit der Rückholung der Abfälle (Quelle: ENTRIA-AB-03 (2015))

Die Rückholung der Abfälle wird als notwendig angesehen, wenn die Ergebnisse des Monitorings zeigen, dass das tatsächliche Verhalten sicherheitsrelevanter Größen bzw. Prozesse des Tiefenlagers sich von ihren berechneten oder prognostizierten Werten signifikant unterscheiden. Das damit zusammenhängende Entscheidungsproblem ist bis heute noch nicht wirklich gelöst. Dazu müssten vorab Kriterien festgelegt werden, anhand derer man die Entscheidung zur Rückholung trifft. Ungeklärt ist auch, wer diese Entscheidung trifft und wohin die Abfälle dann verbracht werden.

Ein weiteres Problem könnte sich daraus ergeben, dass die Messgrößen langfristig (über viele Jahrzehnte) zuverlässig ermittelt werden müssen (z.B. Problem der falsch negativen oder falsch positiven Messungen). Dies setzt voraus, dass defekte Messgeräte sicher erkannt und ausgetauscht werden können. Ob dies unter bergbaulichen Einsatzbedingungen immer gegeben ist, sei dahingestellt.

Treten keine Abweichungen von dem vorherberechneten Systemverhalten auf, soll das Tiefenlager am Ende der Monitoringphase in ein Endlager mit langfristig passiver Sicherheitsgewährleistung durch geologische Barrieren überführt werden.

2.3.1 Variante Tiefenlager in Salzgestein (steile und flache Lagerung) mit Monitoring und Vorkehrung zur Rückholbarkeit der Abfälle

Vorgaben für die Tiefenlagermodelle in Salzgestein für steile und flache Lagerung (nach ENTRIA-AB-03, 2015)

Der Tiefenlagertyp TM in Salzgestein entspricht hinsichtlich seiner Eigenschaften und sicherheitsrelevanten Merkmale prinzipiell dem Tiefenlager TE (s. Kap. 2.2). Der entscheidende Unterschied besteht darin, dass bei dem Entria-Referenzmodell TM eine zusätzliche Monitoringsohle rund 40 m oberhalb der Einlagerungssohle aufgefahren wird (s. Abb. 1). Die Monitoringsohle besteht aus einzelnen Monitoringstrecken (Höhe ca. 2,60 m), die jeweils parallel und mittig zwischen zwei Einlagerungstrecken aufgefahren werden. Von den Monitoringstrecken werden Bohrungen etwa auf Höhe der Einlagerungstrecken abgeteuft und mit Messinstrumenten bestückt; bei erkannter Fehlfunktion können diese über die Bohrungen ausgetauscht werden. Die Monitoringstrecken führen dazu, dass de facto ein zweisöhliges Endlagerbergwerk vorliegt.

Eine Variante besteht darin (Lux et al. 2017), die Monitoringstrecken rechtwinklig zu den Einlagerungstrecken verlaufen zu lassen. Damit kann man unmittelbar oberhalb der Einlagerungstrecken messen.

Sind alle Abfälle in einer Einlagerungstrecke bzw. in einem Einlagerungsfeld deponiert, wird die Strecke bzw. das Einlagerungsfeld wie bei den Endlagern abgeschlossen und durch eine hydraulische Abdichtung gegen Eindringen von Lösungen gesichert. Sind alle Einlagerungsfelder befüllt, wird die Einlagerungssohle entweder in Gänze bis zum Schacht verfüllt oder aber die Infrastrukturräume bleiben noch offen. Die Monitoringsohle und die Schächte müssen offen bleiben, solange ein Monitoring vorgesehen ist.

2.3.2 Variante Tiefenlager in Tonstein mit Monitoring und Vorkehrung zur Rückholbarkeit der Abfälle

Vorgaben für das Tiefenlagermodelle in Tonstein (nach ENTRIA-AB-03 2015)

Auch das Tiefenlager TM in Tonstein entspricht hinsichtlich seiner Eigenschaften und sicherheitsrelevanten Merkmale weitgehend dem Endlager in Tonstein (s. Kap. 2.2.2). Auch hier besteht der entscheidende Unterschied darin, dass bei TM in Tonstein eine zusätzliche Monitoringsohle rund 40 m über der Einlagerungssohle aufgefahren wird. Von jeder Monitoringsohle aus werden dann Bohrungen in Richtung der Einlagerungstrecken gestoßen.

Als Versatzmaterial der Einlagerungsstrecken und sonstiger Gruben Hohlräume ist Bentonit bzw. ein Bentonit-Sand-Gemisch vorgesehen. Aufgrund des Quelldrucks, der sich bei der Aufsättigung des Bentonits entwickelt, sind zur Aufrechterhaltung dieses Druckes in den Einlagerungsstrecken in den grubenseitigen Bereichen Widerlager erforderlich. Hierfür ist Beton oder ein Mauerwerk vorgesehen. Die grubenseitigen Bereiche der Einlagerungsstrecken können mit arteigenem Tonstein verfüllt werden.

Sämtliche Einlagerungsstrecken werden mit Abdichtungsbauwerken (Dämmen) aus Bentonit oder einem Bentonit-Sand-Gemisch zur Richtstrecke hin abgedichtet. Sie sollen Wasserzutritte aus dem noch offenen Grubengebäude in die Einlagerungsstrecken fernhalten. Gleiches gilt für die einzelnen Einlagerungsfelder, die jeweils aus mehreren Einlagerungsstrecken bestehen.

Da das Tiefenlagermodell TM in Tonstein eine deutlich längere Offenhaltungszeit für die obere Monitoringsohle und die Infrastrukturräume aufweist als die Einlagerungsstrecken und Infrastrukturräume des Endlagers TE, können Aspekte der Streckenstabilisierung und des Streckenausbaus ein besonderes Gewicht erlangen. Genauere Aussagen dazu sind in den generischen Referenzmodellen nicht festgelegt worden.

3 Das Sicherheitskonzept der Referenzmodelle

3.1 Bedeutung des Sicherheitskonzepts

Das Sicherheitskonzept für ein Tiefenlager beschreibt in allgemeiner und qualitativer Weise grundlegende Sicherheitsanforderungen, mit deren Hilfe die langfristig sichere Endlagerung der radioaktiven Abfälle gewährleistet werden kann. Es stellt damit den Ausgangspunkt für alle weiteren (und ins Detail gehenden) Arbeiten für die beiden Tiefenlagertypen TE und TM in einem bestimmten Wirtsgestein dar. Der zu betrachtende Nachweiszeitraum umfasst ca. 1 Mio. Jahre.

Ein solches Sicherheitskonzept ist in Deutschland zum ersten Mal im Rahmen der „*Vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben*“ (VSG) im Detail ausgearbeitet worden (GRS 2013). Dabei wurden Grundanforderungen formuliert (Einschlussgedanke, Integritätsgedanke, Wartungsfreiheit, Kritikalitätsausschluss), die wiederum mit Einzelanforderungen unterlegt sind.

Dieses Sicherheitskonzept hat den Vorteil, dass ihm ein Nachweiskonzept gegenüber gestellt werden kann, das für jede einzelne Sicherheitsanforderung spezielle Anforderungen an den Nachweis stellt.

Die in Kap. 3.2 und 3.3 dargestellten Sicherheitskonzepte orientieren sich an dem Sicherheitskonzept der VSG, denn die VSG ist für die Endlagerung im Salzstock Gorleben entwickelt worden und besitzt

alle Elemente, die für die Referenzmodelle von Entria zu gebrauchen sind. Mehr noch: Das Sicherheitskonzept kann auch auf das Wirtsgestein Tonstein übertragen werden. Sowohl bei Lagerung in Salz als auch in Tonstein gelten die gleichen Grundanforderungen, nämlich der möglichst weitgehende, sofortige und dauerhafte Einschluss der Abfälle in einem definierten Gebirgsbereich (einschlusswirksamer Gebirgsbereich – ewG).

Beide Tiefenlagertypen (TE, TM) beruhen auf diesem Sicherheitskonzept, denn auch das (End-)Ziel des Tiefenlagers TM besteht im dauerhaft passiven Einschluss der Abfälle in tiefliegenden geologischen Formationen, wie er bei TE vorgesehen ist.

3.2 Das Sicherheitskonzept für die Tiefenlagerung in Salzgestein

Das Sicherheitskonzept für die *Endlagerung (TE)* in Steinsalz für steile und flache Lagerung

Das Sicherheitskonzept legt fest, mit welchen Maßnahmen die in BMU (2010) vorgegebenen Schutzziele erreicht werden sollen und auf welchen Sicherheitsfunktionen der Sicherheitsnachweis für entsprechende Standorte in Steinsalz basieren soll. Es ist für die steile und die flache Lagerung identisch.

Das Wirtsgestein Steinsalz, speziell der **einschlusswirksame Gebirgsbereich (ewG)**, stellt die wichtigste Barriere dar (näheres zum ewG siehe Driftmann 2017). Wegen seiner extrem geringen Permeabilität, seinem ausgeprägt plastischen Verhalten und seiner guten Temperaturverträglichkeit kann Steinsalz – eine gute Standortauswahl vorausgesetzt - langfristig Lösungszuflüsse zu den Abfallgebinden bzw. Freisetzung und Transport von Lösungen mit Radionukliden aus den Abfallgebinden in die Biosphäre verhindern. Aufgrund seiner hydraulischen Eigenschaften ist Steinsalz nach ESK (2016) das einzige Wirtsgestein, in dem der **vollständige Einschluss** der Schadstoffe im ewG für den gesamten Nachweiszeitraum von 1 Mio. Jahre realisiert werden kann.

Die notwendige Durchörterung des Wirtsgesteins bzw. des ewG durch das Auffahren verschiedener Gruben Hohlräume führt zu einer unvermeidlichen Schwächung der Barriere Steinsalz. Sie muss kompensiert werden durch wirksame technische Verschlüsse aus arteigenem Material. Dazu dient der zum **Versatz** der (Rest-)Hohlräume des Endlagerbergwerks benutzte **Salzgrus**, der wegen seiner Kompaktion infolge der Gebirgskonvergenz im Verlaufe der Zeit seine Permeabilität und Porosität soweit verringern soll, dass er sich der Qualität des ungestörten Wirtsgesteins annähert. Der Zeitraum, bis die angestrebte Qualität erreicht wird, erstreckt sich nach derzeitigem Kenntnisstand in Abhängigkeit von verschiedenen Einflussgrößen (z.B. Temperatur, Feuchtegrad des Salzgruses) von einigen hundert Jahren bis zu wenigen tausend Jahren.

Insgesamt sind die Barriere **ewG und der Salzgrusversatz** im Verbund für die langfristige Isolationswirkung der Abfallprodukte über den gesamten Nachweiszeitraum von einer Mio. Jahre von entscheidender Bedeutung.

Bis der Salzgrusversatz seine volle Wirksamkeit erreicht hat, müssen **schnell wirksame Strecken- und Schachtabdichtungen** dafür sorgen, dass die Abdichtung der Einlagerungsfelder gegen den Zutritt von Lösungen gewährleistet wird. Die Abdichtungen in dieser frühen Nachbetriebsphase müssen also einen Zeitraum von einigen tausend bis ca. 10.000 Jahren abdecken. Die Strecken- und Schachtabdichtungen besitzen als geotechnische Bauwerke eine – bezogen auf den gesamten Nachweiszeitraum von 1 Mio. Jahre – nachgeordnete Bedeutung. Sie sind aber in den ersten Jahrtausenden bedeutsam, bis der ewG im Verbund mit dem kompaktierten Salzgrusversatz die Langzeitsicherheit gewährleistet.

Dem **Abfallbehälter** kommt im Salz nur eine zeitlich deutlich begrenzte Anforderung zu. Er soll mindestens 500 Jahre dicht gegenüber der Freisetzung radioaktiver Aerosole und innerhalb dieses Zeitraumes im Notfall auch bergbar sein (BMU 2010). Darüber hinaus werden an ihn keine weiteren Anforderungen gestellt. Der **Abfallbehälter** ist also nur während der Betriebsphase und zu Beginn der Nachbetriebsphase für einen Zeitraum bis 500 Jahre – vielleicht auch bis zu 1.000 Jahren – im Salzgestein bedeutsam.

Letztlich beruht das Sicherheitskonzept im Steinsalz auf der Wirksamkeit der geologischen Barriere, speziell des ewG und dem Salzgrusversatz. Langfristig soll sich das Endlager zu einem passiv-sicheren Zustand hin entwickeln, in dem die radioaktiven Abfälle von menschlichem Handeln und natürlichen Entwicklungen unabhängig sicher lagern.

Das über den ewG hinausgehende Wirtsgestein sowie das Deck- und Nebengebirge der Salzformation müssen als Sicherheitsreserven angesehen werden. Sie werden in diesem Bericht nicht weiter behandelt, da ihre Eigenschaften sehr von standortspezifischen Aspekten abhängen.

Das Sicherheitskonzept für die *Tiefenlagerung (TM)* in Steinsalz für steile und flache Lagerung

Das Sicherheitskonzept entspricht im Prinzip demjenigen des Endlagers für Salzgestein (s. o.). Allerdings stellt die Existenz der Monitoringsohle und der bis auf die Einlagerungsohle hinabreichenden Monitoringbohrungen sowie die längere Offenhaltung der Schächte und gegebenenfalls sonstiger Infrastruktureinrichtungen weitere Anforderungen an das Sicherheitskonzept, alleine deswegen schon, weil Monitoringsohle und Monitoringbohrungen innerhalb des ewG liegen. Dadurch ist die

langfristige Integrität des ewG durch vermehrte Hohlräume, die langfristig dicht verschlossen werden müssen, potenziell stärker gefährdet als bei der TE. Nach Abschluss der Monitoringphase müssen die Monitoringbohrungen abgedichtet werden, und die gesamte Monitoringsohle muss gleichfalls mit Salzgrus versetzt werden.

Eventuell offen gebliebene Infrastrukturräume auf der Einlagerungssohle werden gleichfalls mit Salzgrus versetzt. Nach abschließender Verfüllung der Schächte geht das Tiefenlager TM in ein langfristig passiv-sicheres Stadium über und entspricht dann einem Endlager.

Zur Erfüllung der Sicherheitsanforderungen (BMU 2010) müssen bei dem Tiefenlager TM zusätzlich die im Vergleich zu TE längere Offenhaltung des Tiefenlagerbergwerks und seine komplexere Geometrie innerhalb des ewG berücksichtigt werden.

Für den Fall der Rückholung von Teilen oder dem gesamten Inventar müssen die rückgeholten Abfälle entweder in ein Zwischenlager (möglichst vor Ort) oder langfristig in ein anderes Tiefenlager eingelagert werden. Denkbar wäre auch der Einsatz neuer Entsorgungstechnologien.

3.3 Das Sicherheitskonzept für Tiefenlagerung in Tonstein

Das Sicherheitskonzept für die *Endlagerung (TE)* in Tonstein

Das Sicherheitskonzept entspricht im Prinzip demjenigen des Endlagers in Salzgestein (s. Kap. 3.1 u. 3.2). Das bedeutet, dass die einzelnen Sicherheitskompartimente (z.B. Behälter, Versatz, ewG) die gleichen zeitabhängigen Funktionen erfüllen müssen wie bei Endlagerung in Salz. Auch hier kommt dem aus Tonstein bestehenden Wirtsgestein, insbesondere dem darin ausgewiesenen ewG, die Schlüsselrolle für die langfristige Sicherheit zu.

Unterschiede zur Lagerung in Salz ergeben sich aus den Eigenschaften des Tonsteins. Er weist eine vergleichsweise geringe Permeabilität auf, besitzt eine hohe Sorptionskapazität und zeichnet sich durch plastisches Verhalten aus. Die Permeabilität von Tonstein ist jedoch nicht so gering, dass ein Zutritt von Formationswässern an die Abfälle ausgeschlossen werden kann. Deshalb soll die Ausbreitung von Radionukliden im Tonstein in einem Endlager diffusionsdominiert sein; eine advective Ausbreitung von im Wasser gelösten Radionukliden ist zu vermeiden. Aus den genannten Gründen ist ein vollständiger Einschluss der Radionuklide im Tonstein innerhalb des ewG für den Nachweiszeitraum von 1 Mio. Jahre unter realen Bedingungen nicht erreichbar. Ein **sicherer Einschluss** im ewG, der das Übertreten vernachlässigbarer Schadstoffmengen vom ewG in das umgebende Wirtsgestein gestattet, ist bei guter Standortauswahl für den geforderten Nachweiszeitraum jedoch möglich.

Im Gegensatz zum Sicherheitskonzept für Salzformationen, bei dem der Einschluss der Radionuklide im ewG dadurch erreicht werden soll, dass ein Zutritt von Lösungen zu den Abfällen be- bzw. verhindert wird, erfolgt der Einschluss der Radionuklide im ewG des Tonsteins also primär durch die Behinderung des diffusionsdominierten Schadstofftransports und durch chemische und physikalische Prozesse der Rückhaltung innerhalb des ewG (GRS 2014). Diese Rückhaltung der Schadstoffe soll durch die Eigenschaften des Tonsteins im Verbund mit den technischen Barrieren, v.a. dem Hohlraumversatz durch Bentonit oder Tonstein gewährleistet werden. Als Folge des sehr langsamen Schadstofftransports wird ein erheblicher Anteil der Radioaktivität bereits während des Transports innerhalb des ewG durch radioaktiven Zerfall abgebaut.

Die auch in Tonstein durch das Auffahren von Kammern und Strecken notwendigen Perforationen der geologischen Barriere bzw. des ewG sind durch einen **Versatz** zu verschließen. Dazu bieten sich Bentonit oder ein Bentonit-Sand-Gemisch an, da sie wirtsgesteinsähnliche Eigenschaften aufweisen. Der Versatz erreicht die geforderten einschlusswirksamen Eigenschaften erst nach seiner homogenen Aufsättigung und Quellung. Die Zeitdauer dazu liegt nach heutigem Kenntnisstand bei bis zu einigen tausend Jahren.

Die Zeit bis zur endgültigen Aufsättigung und Quellung des Bentonit-Sand-Versatzes müssen schnellwirkende Barrieren (**Strecken- und Schachtabdichtungen**) die Abdichtung der Einlagerungsbereiche gegenüber Formationswässern oder Oberflächenwässern gewährleisten (bis ca. 10.000 Jahre).

Die Dichtheit des **Abfallbehälters** wird mit mindestens 1.000 Jahren angesetzt; in der Schweiz geht die NAGRA (2008) von einem deutlich längeren Zeitraum von bis zu 10.000 Jahren aus. Um jeden Abfallbehälter wird im Entrieferenzkonzept zudem ein ringförmiger Bentonitmantel mit einer Mächtigkeit von 2,55 m gelegt. Bis zu 10.000 Jahren wird von einer abnehmenden Behälterwirksamkeit ausgegangen. Der Behälter muss für einen Zeitraum von 500 a im Notfall bergbar sein. Sämtliche Hohlräume des Endlagerbergwerks in Tonstein benötigen einen nicht näher definierter Ausbau (Stahlmann 2015). Er könnte beispielsweise aus Beton oder Stahl bestehen. Sein Umfang hängt von der Tiefenlage des TE und den standortspezifischen Eigenschaften des Tonsteins ab.

Insgesamt sind die Barrieren Wirtsgestein (speziell der ewG) und der Bentonit bzw. Bentonit-Sand-Versatz für die langfristige Isolationswirkung der Abfallprodukte über den gesamten Nachweiszeitraum von einer Mio. Jahre von entscheidender Bedeutung. Die **Strecken- und Schachtabdichtungen** hingegen besitzen als geotechnische Bauwerke nur eine – bezogen auf den gesamten Nachweiszeitraum – nachgeordnete Bedeutung. Sie müssen in den ersten Jahrtausenden (bis 10.000 Jahre) ihre Funktion erfüllen, bis das Wirtsgestein im Verbund mit dem gequollenen Bentonit die Langzeitsicherheit gewährleistet. Der **Abfallbehälter** ist nur während der Betriebsphase und zu Beginn der Nachbe-

triebsphase für einen Zeitraum von mindestens 1.000 bis mehrere tausend Jahre im Tongestein bedeutsam.

Das Sicherheitskonzept des Tonsteins beruht also in seinem Kern wie beim Salz (s.o.) auf dem langfristigen passiv-sicheren Einschluss der Radionuklide im ewG und dem Versatzmaterial Bentonit. Freisetzen aus dem ewG ins weitere Wirtsgestein dürfen die Anforderungen der Geringfügigkeitsschwellen nicht überschreiten.

Das über den ewG hinausgehende Wirtsgestein sowie das Deck- und Nebengebirge der Tonsteinformation müssen als Sicherheitsreserven angesehen werden. Sie werden in diesem Bericht wegen der standortspezifischen Abhängigkeit ihrer Eigenschaften nicht weiter beachtet.

Das Sicherheitskonzept für die *Tiefenlagerung (TM)* in Tonstein

Das Sicherheitskonzept entspricht grundsätzlich demjenigen des Endlagers in Tonstein (s. o.). Es besitzt keine qualitativ neuen oder weitergehenden Anforderungen.

Allerdings stellt die Existenz der zusätzlichen Monitoringsohle und den bis auf die Einlagerungsohle hinabreichenden Monitoringbohrungen sowie die für die Beobachtungszeit (bis max. 200 Jahre) notwendige Offenhaltung der Schächte und der Monitoringstrecken zusätzliche Anforderungen, alleine deswegen schon, weil Monitoringsohle und Monitoringbohrungen innerhalb des ewG liegen. Die Anforderungen beziehen sich allerdings nur auf die Betriebszeit des Tiefenlagers TM (Einlagerungszeit plus Monitoringzeit) und haben nur indirekt Verbindung zur Langzeitsicherheit (z.B. mehr Strecken und Monitoringbohrungen stellen potenzielle Schwachpunkte innerhalb des ewG dar).

Entspricht das Systemverhalten des Tiefenlagers den Voraussagen, werden am Ende der Monitoringphase die Messinstrumente, Kabelzuleitungen usw. entfernt und die Monitoringsohle und die Monitoringbohrungen müssen langfristig zuverlässig abgedichtet werden, z.B. mit Bentonit. Eventuell offen gebliebene Infrastrukturräume auf der Einlagerungsohle werden gleichfalls verfüllt. Nach abschließender Verfüllung der Schächte geht das Tiefenlager TM in ein langfristig passiv-sicheres Stadium über und entspricht dann einem Endlager.

Für den Fall einer Rückholung von Teilen oder dem gesamten Inventar gibt es noch keine weitergehenden Überlegungen. Die rückgeholten Abfälle müssen entweder in ein Zwischenlager (möglichst vor Ort) oder in ein anderes geeignetes Endlager überführt werden. Denkbar wäre auch der Einsatz neuer Entsorgungstechnologie.

4 Ableitung der Sicherheitsfunktionen für die Referenzmodelle

4.1 Grundsätzliches zu den Sicherheitsfunktionen

Nach der Definition des BMU (2010) ist eine **Sicherheitsfunktion** „...eine Eigenschaft oder ein im Endlagersystem ablaufender Prozess, die bzw. der in einem sicherheitsbezogenem System oder Teilsystem oder bei einer Einzelkomponente die Erfüllung der sicherheitsrelevanten Anforderungen gewährleistet. Durch das Zusammenwirken solcher Funktionen wird die Erfüllung aller sicherheitstechnischen Anforderungen sowohl in der Betriebsphase als auch in der Nachverschlussphase des Endlagers gewährleistet“.

Die in diesem Bericht betrachteten Sicherheitsfunktionen der beiden Referenzmodelle zur Tiefenlagerung dienen der Erfüllung definierter sicherheitsrelevanter Anforderungen in der **Nachbetriebsphase**, d.h. nach endgültigem Verschluss der Tiefenlager. Ihre übergeordnete integrale Aufgabe besteht in der **Isolation der Schadstoffe** im ewG des TE- bzw. des TM. Damit stellt sich ein Bezug der Sicherheitsfunktionen zu den Sicherheitskonzepten der Referenzmodelle dar. Ein aktives sicherheitsgerichtetes menschliches Handeln während der Nachbetriebsphase, d.h. nach Verschluss und Stilllegung der Tiefenlager TE bzw. TM, ist nicht erforderlich.

Die sicherheitsgerichtete Absicht von Sicherheitsfunktionen zielt also hauptsächlich auf den Einschluss bzw. die Rückhaltung der Radionuklide ab (**radionuklidrückhaltende Sicherheitsfunktionen**). Sie begrenzen oder verhindern Lösungsbewegungen in Richtung der Einlagerungsbereiche oder den Radionuklidtransport aus den Einlagerungsbereichen hinaus. Sie sind für die Robustheitsbewertung wesentlich (Fischer-Appelt 2014). Nur diese Sicherheitsfunktionen werden hier bewertet.

Daneben existieren **integritätsbewahrende Sicherheitsfunktionen**, die dem Schutz der Integrität der rückhaltenden Sicherheitsfunktionen oder Barrieren dienen (z.B. Schutz der maßgeblichen Gesteinsbarrieren vor Erosion). Sie tragen gleichfalls zur Robustheit eines Referenzmodells bei, indem durch sie die jeweils korrespondierende rückhaltende Sicherheitsfunktion gegenüber äußeren Einflüssen geschützt wird. Der von der jeweiligen integritätsbewahrenden Sicherheitsfunktion geleistete Robustheitsbeitrag wirkt sich auf die entsprechende rückhaltende Sicherheitsfunktion aus und wird deshalb bei letzterer berücksichtigt (GRS 2010). Eine eigenständige Bewertung der integritätsbewahrenden Sicherheitsfunktionen findet deshalb nicht statt.

Die generelle Vorgehensweise zur Ableitung der radionuklidrückhaltenden Sicherheitsfunktionen für die Nachbetriebsphase der Tiefenlagermodelle wird in Kap. 4.2 beschrieben. Danach lassen sich Sicherheitsfunktionen räumlich dem jeweiligen Referenzmodell, Teilsystemen von diesem oder Systemkomponenten zuordnen, die als natürliche und technische Barrieren den Einschluss der Radionuklide über kürzere oder längere Zeiträume gewährleisten sollen.

Die Referenzmodelle und ihr Verhältnis zu den Sicherheitsfunktionen

Die Tiefenlagerung mit Monitoring und Vorkehrungen zur Rückholung der Abfälle unterscheidet sich von der Endlagerung für die Wirtsgesteine Salz (steil und flach lagernd) und Tonstein im Kern dadurch, dass oberhalb der Einlagerungssohle noch die Monitoringsohle und die Monitoringbohrungen aufgeföhren werden. Darüber hinaus werden die Monitoringsohle und die Schächte sowie eventuell Teile der Infrastrukturräume für mindestens 100 Jahre in Betrieb gehalten.

Die Sicherheitskonzepte für die Nachbetriebsphase sind für TE und TM im Prinzip identisch (vgl. Kap. 3). Deshalb sind auch die Sicherheitsfunktionen – speziell die für die vergleichende Bewertung benötigten radionuklidrückhaltenden Sicherheitsfunktionen – für beide Referenzmodelle im Rahmen des Betrachtungsmaßstabes identisch. Die Sicherheitsfunktionen gelten also für die Tiefenlager TE und TM genauso wie für die Wirtsgesteine Salz und Tonstein. Zu beachten ist, dass im Rahmen der generischen Referenzmodelle eine detailliertere Aufgliederung der Sicherheitsfunktionen nicht möglich ist und darüber hinaus zu keinem größeren Erkenntnisgewinn führen würde.

4.2 Systemkomponenten und abgeleitete Sicherheitsfunktionen

Ausgangspunkt der Ableitung und Zusammenstellung der Sicherheitsfunktionen ist das jeweilige **Sicherheitskonzept**, das den Referenzmodellen der beiden Tiefenlager TE und TM für die Gesteinsarten Salz- und Tonstein zugrunde liegt (s. Kap. 3). Daraus können Systemkompartimente bzw. Barrieren für beide Tiefenlagertypen identifiziert werden. Sie werden im Folgenden auf ihre vorgesehene rückhaltende Wirksamkeit hin überprüft, und die entsprechenden Sicherheitsfunktionen werden abgeleitet.

Die **Komponenten** der Entria-Referenzmodelle der Tiefenlager sind wegen der gleichen Sicherheitskonzepte für TE bzw. TM identisch. Es handelt sich um (s. Abb. 2):

- Den **Abfallbehälter** einschließlich des in diesem eingeschlossenen Abfallprodukts. Er stellt die erste (innerste) Barriere dar. Er kann sich in Abhängigkeit vom Wirtsgestein/der geochemischen Situation in seiner Barrierenwirkung unterschiedlich wirksam verhalten. Für Salz werden

1.000 Jahre volle Barrierewirkung angenommen, und für Tonstein eine Barrierewirkung bis zu 10.000 Jahre. Die Abfallmatrix wird hier nicht als radionuklidrückhaltende Komponente berücksichtigt.

- Den **Einlagerungsbereich**. Er umfasst den **Versatz** der Einlagerungsstrecken bzw. der Einlagerungsfelder und sonstiger Hohlräume oder Strecken innerhalb des ewG. Hinzu treten spezielle schnell wirksame **Abdichtungen** an beiden Enden der Einlagerungsstrecken (sowie bei Tonstein das **Widerlager**). Versatz und Abdichtungen werden hier betrachtet, da der Versatz langfristig eine herausragende Bedeutung besitzt, und den Abdichtungen in den ersten Jahrtausenden gleichfalls hohe Bedeutung zukommt (s. Kap. 3.1 u. 3.2).

Das Widerlager (s. Kap. 2.2.2) wird nicht behandelt. Ihm kommt bei den Tiefenlagern TE und TM im Tonstein vorrangig eine integritätserhaltende Funktion zu, denn seine Aufgabe besteht darin, den Quelldruck des Bentonits für seine Abdichtfunktion für den Versatz der Einlagerungsstrecken zu gewährleisten. Diese Abdichtfunktion wird aber schon beim Streckenversatz als radionuklidrückhaltende Sicherheitsfunktion behandelt. Die volle Wirkung der geotechnischen Barriere **Versatz** beginnt in Salz bei 1.000 Jahren und in Ton nach einigen 1.000 Jahren, spätestens jedoch nach 10.000 Jahren und soll bis 1 Mio. Jahre andauern. Die geotechnischen Barrieren **Abdichtungen** der Einlagerungsfelder sind sofort wirksam und behalten ihre volle Funktionsfähigkeit für 10.000 Jahre.

- Das **Tiefenlagerbergwerk** besteht bei TE und TM aus gegebenenfalls schon versetzten und abgedichteten Einlagerungsbereichen, den Infrastrukturräumen wie Zugangs- und Bewetterungsstrecken, den Schächten sowie gegebenenfalls den Monitoringstrecken samt Monitoringbohrungen. Die Aussagen zu Versatz und Abdichtungen zum Einlagerungsbereich (s.o.) gelten ebenso für das restliche Grubengebäude. Hinzu treten die geotechnischen Barrieren der **Schachtverschlüsse**, denen gleichfalls in den ersten Jahrtausenden eine hohe Bedeutung zukommt. Die volle Barrierenwirkung der Schachtabdichtungen soll sofort beginnen und zumindest für 10.000 Jahre voll funktionsfähig bleiben. Danach werden sie sicherheitstechnisch nicht mehr benötigt (s.u.).
- Die **Tiefenlager** selbst (zusammengesetzt aus Wirtsgestein bzw. dem im Wirtsgestein liegenden einschlusswirksamen Gebirgsbereich und dem TE- bzw. TM-Bergwerk). **Dem ewG kommt langfristig die größte Bedeutung für die Isolation der Abfallstoffe zu.** Die Barrierewirkung des ewG beginnt sofort und dauert über den gesamten Nachweiszeitraum von 1 Mio Jahren.

- Den **nicht zum ewG gehörigen Anteilen des Wirtsgesteins**. Ihm kommt eine hohe Bedeutung hinsichtlich des Schutzes des ewG zu, insbesondere auch mit Blick auf denkbare von außen einwirkende Kräfte (z.B. Eiszeiten). Er wird aber hier nicht näher betrachtet, weil standortspezifische Aspekte diesen Teil des Wirtsgesteins dominieren. Allerdings werden einige Gesichtspunkte im Zusammenhang mit langfristigen möglichen externen Einwirkungen auf Referenzmodelle erörtert (s. Anhang E).
- Das **Deck- und Nebengebirge** der Tiefenlager. Darunter werden die geologischen Schichten um das Wirtsgestein herum verstanden. Sie besitzen zwar – abhängig von ihren standortspezifischen Eigenschaften – auch ein mehr oder weniger hohes Rückhaltevermögen für Radionuklide, jedoch können dazu im Rahmen von Entria wegen des generischen Charakters der Referenzmodelle keine Aussagen getätigt werden. Die dem Deck- und Nebengebirge zugeordneten rückhaltenden Sicherheitsfunktionen können als Sicherheitsreserven angesehen werden. In diesem Bericht kommt dem Deck- und Nebengebirge nur insoweit eine Bedeutung zu, als es die Integrität der Barriere ewG gegenüber denkbaren zukünftigen Szenarien schützen kann. Darauf wird in Anhang E kurz eingegangen. Die rückhaltende Funktion von Deck- und Nebengebirge beginnt sofort und bleibt je nach Standortentwicklung mehr oder weniger lang bestehen.

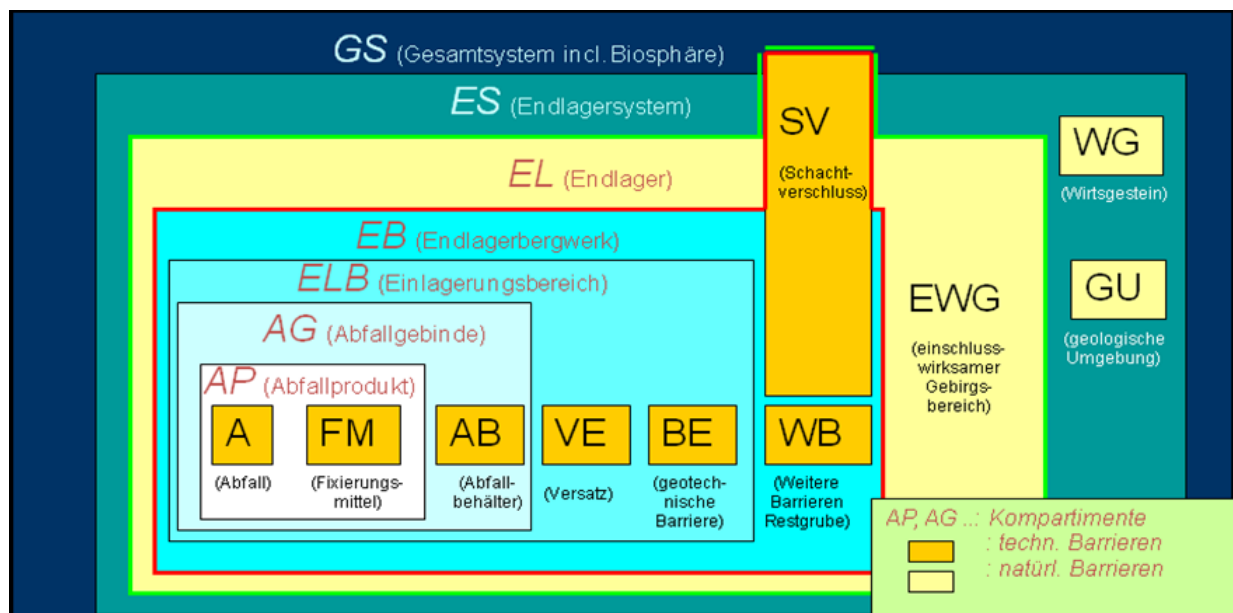


Abb. 2: Schematische Darstellung der Komponenten eines Tiefenlagersystems. Die rote Linie umfasst das Endlagerbergwerk, die grüne Linie den ewG (Quelle: GRS 2010)

Von den beschriebenen Kompartimenten bzw. Barrieren verbleiben demnach folgende **Komponenten, die alle innerhalb des ewG liegen** und damit für die Referenzmodelle der Tiefenlagersysteme TE und TM von vorrangiger Bedeutung sind (s. Abb. 2). Sie können jeweils verschiedene radionuklidrückhaltende Sicherheitsfunktionen umfassen (s. Tab. 1):

- Der **Abfallbehälter** (Typ Pollux): Je nach Wirtsgestein **wichtig** für die ersten tausend bis einige wenige tausend Jahre,
- Der **Versatz** von Strecken bzw. sonstigem Hohlraum innerhalb des ewG mittels weitgehend arteigenem Material wie Steinsalz, Bentonit, Bentonit-Sand-Gemisch oder Tonstein. Er ist **funktional unverzichtbar** für Zeiträume größer einige 1.000 a bis zum Ende des Nachweiszeitraumes von 1 Mio. Jahren. Der Versatz schließt die Schwachstellen des ewG und des weiteren Wirtsgesteins, die durch die Hohlraumerstellung hervorgerufen worden sind.
- Die **Abdichtungen/Dämme der Einlagerungsstrecken und Einlagerungsfelder** (Salzbeton, Bentonit) gegenüber dem restlichen Grubenbereich. Diese schnell wirkenden Abdichtungselemente müssen so lange ihre Funktion erfüllen (bis 10.000 a), bis der Hohlraumversatz seine volle Wirksamkeit erreicht hat.
- Die **Schachtverschlüsse** (Steinsalz, Betonit): Die Schachtverschlüsse sollen das Eindringen von Lösungen in das Tiefenlager verhindern (ggf. auch die Freisetzung von kontaminierten Lösungen aus diesem). Diese schnell wirkende Komponente soll ihre Funktion so lange aufrechterhalten, bis der Versatz zusammen mit dem ewG die Abfälle langfristig isoliert. Ihr Funktionszeitraum soll bis 10.000 Jahre betragen. Obwohl Schachtverschlüsse, insbesondere die Abdichtelemente, mit Blick auf die standortspezifischen Verhältnisse diversitär und redundant aufgebaut werden sollen, wird in diesem Bericht jeweils nur exemplarisch ein Dichtelement pro Wirtsgestein betrachtet.
- Der **einschlusswirksame Gebirgsbereich** (Steinsalz, Tonstein): Der ewG stellt das zentrale Element zur Isolation der Schadstoffe bei der Tiefenlagerung dar, das im Zusammenwirken mit geotechnischen Verschlüssen, insbesondere dem Versatz, den Einschluss der Abfälle sicherstellt. Der ewG ist deshalb **funktional unverzichtbar** für den gesamten Nachweiszeitraum von 1 Mio. a. Der ewG erhält seine Wirksamkeit nur dann, wenn der Hohlraumversatz seine volle

Funktionsfähigkeit erreicht und damit die durch das Auffahren von Strecken bzw. Hohlräumen in den oder innerhalb des ewG erzeugten Schwachstellen beseitigt werden.

Jenseits dieser Komponenten mit ihren verschiedenen primären Sicherheitsfunktionen, die die Isolationswirkung des ewG garantieren sollen, verbleiben noch zwei weitere Komponenten, die außerhalb des ewG liegen und deren Sicherheitsfunktionen als Sicherheitsreserven betrachtet werden können:

- Das über den ewG hinausreichende **weitere Wirtsgestein** (Steinsalz, Tonstein). Es besitzt eine bedeutsame Schutzfunktion für den ewG über den gesamten Nachweiszeitraum von 1 Mio. a.
- Das **Deck- und Nebengebirge** mit einer gleichfalls wichtigen Schutzfunktion (s. o. bei den Kompartimenten).

Diese beiden Komponenten werden nicht betrachtet.

Die in Tab. 1 dargestellten Komponenten der Tiefenlager TE und TM sowie ihrer Sicherheitsfunktionen ergeben sich aus den Sicherheitskonzepten (s. Kap. 3). Sie gelten gleichermaßen für die Gesteinsarten Salz und Tonstein. Tab. 1 enthält auch charakteristische Parameter für die Sicherheitsfunktionen, von denen einzelne als rückhaltende Sicherheitsfunktionsparameter (RSF-Parameter) eine wesentliche Bedeutung bei der Ermittlung der Robustheit von Sicherheitsfunktionen sind (z.B. Permeabilität, Diffusivität, Löslichkeitsgrenzen, Sorption).

Eine noch weiter ins Detail gehende Formulierung der Sicherheitsfunktionen ist im Rahmen der hier zu betrachtenden generischen Betrachtungsebene sinnlos, da die Sicherheitsfunktionen mit zunehmenden Detaillierungsgrad notwendigerweise immer stärker nur noch standortspezifisch beschreibbar und bewertbar sind. Mit Hilfe dieser Sicherheitsfunktionen und ausgewählten funktionalen Parametern werden in Kap. 6.2.4 die Robustheiten der einzelnen Sicherheitsfunktionen ermittelt.

Komponente	Radionuklidrückhaltende Sicherheitsfunktion	Charakteristische RSF-Parameter
1 Behälter		
	Begrenzung/Verhinderung Lösungszutritt zum Abfallprodukt wegen Dichtwirkung Behälterwandung	Dicke Behälterwandung, Korrosionbeständigkeit, Druck- u. Zugfestigkeit, Qualitätssicherung, → Standzeit, Ausfallrate
	Begrenzung der Radionuklidausbreitung durch Löslichkeitsgrenzen	pH, Temperatur, Redoxpotential, Lösungszusammensetzung, Komplexierung, Kinetik d. Auflösung, Ausfällung, Radionuklidspezifikation, Lösungsbewegung → Löslichkeitsgrenze
	Verzögerung d. Radionuklidausbreitung durch Sorption am Behältermaterial	Anzahl d. Sorptionsplätze, Elementarzusammensetzung
2 Versatz		
	Begrenzung/Verhinderung von Lösungsbewegung u. Radionuklidtransport	Porosität, Permeabilität, Diffusivität, diffusionsdominierter Transport, Selbstabdichtung durch Quellen oder Konvergenz, diffusionsdominierter Transport,
	Begrenzung der RN-Ausbreitung wegen Löslichkeitsgrenzen	pH, Temperatur, Redoxpotential, Lösungszusammensetzung, Komplexierung, Radionuklidspezifikation, Lösungsbewegung Kinetik d. Auflösung, Ausfällung → Löslichkeitsgrenze
	Verzögerte RN-Ausbreitung durch Sorption	Mineralzusammensetzung, Korngröße, Porosität, organischer Anteil, Belegung Sorptionsplätze, → Kd-Wert
3 Abdichtung, Dämme		
	Begrenzung/Verhinderung von Lösungsbewegung u. RN-Transport	Porosität, Permeabilität, Diffusivität, diffusionsdominierter Transport, Selbstabdichtung durch Quellen oder Konvergenz,
	Verzögerung d. RN-Ausbreitung durch Sorption	Mineralzusammensetzung, Korngröße, Porosität, organischer Anteil, Belegung Sorptionsplätze, → Kd-Wert
4 Schachtverschluss		
	Begrenzung/Verhinderung von Lösungsbewegung u. RN-Transport	Porosität, Permeabilität, Diffusivität, diffusionsdominierter Transport, Länge d. Abdichtung, Kontaktbündigkeit Nebengebirge, Selbstabdichtung durch Quellen oder Konvergenz (Bentonit)
	Verzögerung d. RN-Ausbreitung durch Sorption	Mineralzusammensetzung, Korngröße, Porosität, organischer Anteil, Belegung Sorptionsplätze, → Kd-Wert
5 Einschluss-wirksamer Gebirgsbereich		
	Begrenzung/Verhinderung von Lösungsbewegung u. RN-Transport	Porosität, Diffusivität, Permeabilität inkl. 2-Phasen-Parameter, Ausdehnung d. Wirtsgesteins um das EL-Bergwerk, für die die charakteristischen Eigenschaften der RSF gelten
	Verzögerung der RN-Ausbreitung durch Sorption	Mineralzusammensetzung, Korngröße, Porosität, organischer Anteil, Belegung Sorptionsplätze, → Kd-Wert
6 Weiteres Wirtsgestein		
Die konzeptionellen Anforderungen hinsichtlich der Isolationswirkung beschränken sich auf den ewG. Deshalb werden keine RSF betrachtet.		Zusätzliche Sicherheitsreserve / Schutzfunktion für den ewG
7 Deckgebirge		
Wegen Standortabhängigkeit keine Sicherheitsfunktion ausgewiesen. Berücksichtigung des Deckgebirges bei Einwirkung externen Szenarien		Keine RSF, sondern zusätzliche Sicherheitsreserve für das Gesamtsystem

Tab. 1: Radionuklidrückhaltende Sicherheitsfunktionen für Tiefenlager in Salzgestein (steile u. flache Lagerung) und Tonstein. Die grau unterlegten Komponenten „Weiteres Wirtsgestein“ und „Deck- u. Nebengebirge“ werden nicht betrachtet (Quelle: GRS 2010, verändert)

5 Grundsätze, Rahmenbedingungen und Konsequenzen der vergleichenden Bewertung der Referenzmodelle

Bei der vergleichenden Bewertung der Referenzmodelle anhand ihrer Sicherheitsfunktionen bzw. ihrer Robustheitsdefizite sind folgende Randbedingungen zu beachten:

- Bei den Referenzmodellen handelt es sich um **generische Modelle**. Das bedeutet, dass sie jeweils stellvertretend (modellhaft) für eine Vielzahl denkbarer realer Entsorgungsoptionen stehen. Generische Modelle haben keinen oder nur einen synthetischen Standortbezug, entsprechende reale standortspezifische Daten liegen also nicht vor. Deshalb werden für die wesentlichen Parameter der verschiedenen Wirtsgesteine und technischer und geotechnischer Barrieren Annahmen getroffen. Zudem liegt ein grobes Endlager- bzw. Tiefenlagerkonzept vor (s. dazu ENTRIA-AB-3 2015), auf das zurückgegriffen wird.
- Die vergleichende Bewertung der generisch angelegten Referenzmodelle kann wegen der fehlenden standortspezifischer Daten und aus methodenimmanenten Gründen nur **qualitativ** geschehen. Die Bedeutung der Sicherheitsfunktionen und ihrer Robustheiten im Hinblick auf die integrale Sicherheit des jeweiligen Referenzmodells werden deshalb anhand **ordinaler Skalierungen** mit Klasseneinteilungen entsprechend "relativ höherer bzw. geringerer Relevanz oder Robustheit" beurteilt. Wegen der Ordinalskalierung verbietet sich auch die rechentechnische Behandlung der Ergebnisse. Entsprechendes gilt analog für das Ausmaß der Veränderung der Sicherheitsfunktionen durch auf sie einwirkende innere und / oder äußere Einflüsse: Hier mögen zwar für einzelne Aspekte oder Indikatoren kardinal skalierte Größen vorliegen, sie müssen aber wegen ihrer Verknüpfung mit der Relevanz der Sicherheitsfunktionen in die Ordinalskala umgewandelt werden. Bei ordinal skalierten Größen bietet sich die verbalargumentative Bewertung als angemessen an.
- Der **direkte Vergleich von End- bzw. Tiefenlager mit dem Langzeitzwischenlager ist bei dem gewählten methodischen Ansatz nicht möglich**. Der Hauptgrund dafür liegt in der unterschiedlichen Zweckbestimmung des Langzeitzwischenlagers gegenüber den beiden Tiefenlagern TE und TM. Daraus erwachsen grundsätzliche methodische Probleme, die weit über den hier gewählten Ansatz hinausgehen und den Vergleich verschiedener Entsorgungsoptionen erschweren. Weitere Gründe liegen in der zeitlichen Wirkphase der Referenzmodelle, die für Tiefenlager um Größenordnungen über der beim Langzeitzwischenlager erforderlichen Wirkphase liegt. Daraus resultieren völlig andere Einflüsse auf die Referenzmodelle. Im Übr-

gen besitzt das Langzeitzwischenlager nur eine Betriebsphase, in der neben Monitoring auch Reparaturmöglichkeiten bestehen.

- Die Bestimmung der **Relevanz** der jeweiligen Sicherheitsfunktion bezieht sich auf ihre Einschlusswirkung der Abfälle im Tiefenlager TE und TM sowie im Langzeitzwischenlager. Die Relevanz einer Sicherheitsfunktion besitzt direkten Bezug zum „Sicherheitskonzept“ des Referenzmodells. Die Ermittlung der Relevanz erfolgt für alle Referenzmodelle unter dem gleichen Blickwinkel. Deshalb sind gleiche Relevanzklassen bei gleichem Sicherheitskonzept als „gleich“ anzusehen.
- Die zu ermittelnden **Robustheiten** hängen von inneren und äußeren Einwirkungen auf die Sicherheitsfunktionen ab. Bei den End- bzw. Tiefenlagern sind diese Einwirkungen standortabhängig. Die zur Ermittlung der Robustheit nötigen **Szenarien** können wegen der Standortabhängigkeit der generischen Referenzmodelle deshalb nur beispielhaft herangezogen werden, um mögliche gravierende Einflüsse auf die Sicherheitsfunktionen zu ermitteln (s. dazu Bericht C 2016). Dies geschieht, indem der Zusammenhang zwischen den räumlich bekannten Vorkommen betrachteter Wirtsgesteine und nachgewiesenen bzw. vermuteten Ereignissen der Vergangenheit für die entsprechenden Räume hergestellt werden
- Spätestens bei der Bestimmung der Robustheit einer Sicherheitsfunktion (s. Anhänge A bis E) muss eine **Aggregation von Teilergebnissen** stattfinden, die aus der Bewertung der einzelnen sicherheitsfunktionsspezifischen Kriterien (RSF-Kriterien) stammen. Diese Aggregation wird verbal-argumentativ für jede Sicherheitsfunktion vorgenommen. Die Gesamtbewertung der Referenzmodelle geschieht auf Grundlage der Robustheitsdefizite (s. Kap. 6.2.5) und besteht in der verbal-argumentativen Auseinandersetzung mit der sicherheitsmäßigen Bedeutung des Robustheitsdefizits, seinen Ursachen sowie der Frage, wie das Robustheitsdefizit vermieden oder in seiner Wirkung verringert werden kann.
- Den zu bewertenden Referenzmodellen wird eine **potenzielle Genehmigungsfähigkeit** nach heutigen deutschen Maßstäben unterstellt. (z.B. BMU 2010, ESK 2013). Wäre dies nicht der Fall, dann wären die Referenzmodelle hinfällig. Deshalb zielt die Ermittlung von Robustheitsdefiziten nur auf solche Defizite von Sicherheitsfunktionen, die die Sicherheits- bzw. Genehmigungsanforderungen wahrscheinlich erfüllen. Ob letzteres immer der Fall ist, sei dahingestellt.

- Die im Zusammenhang mit **Ungewissheiten** notwendigen methodenimmanenten Bewertungen (z.B. Einordnung der Relevanz und Robustheit der Sicherheitsfunktionen in verschiedene ordinale Klassen) enthalten notwendigerweise subjektiven Einschätzungen („Expertenabschätzungen“). Solche subjektive Aussagen sind so weit wie möglich zu vermeiden. Wo sie getroffen werden müssen, ist darauf hinzuweisen. Diese normativen Einschätzungen kann man in die Kategorie der subjektiven Wahrscheinlichkeiten einordnen, die als Grad der Überzeugung, dass bestimmte Ereignisse eintreten werden, zu verstehen sind. Nach Hand (2014) kann diese epistemische Auffassung von Wahrscheinlichkeit als Gradmesser der Ungewissenheit aufgefasst werden.
- Anders als bei der Bewertung der Langzeitsicherheit von Tiefenlagersystemen (z.B. in Genehmigungsverfahren) üblich, dürfen beim Vergleich von Referenzmodellen Defizite hinsichtlich Systemverständnis und -information nicht durch **konservative Annahmen** überbrückt werden; denn es besteht die Gefahr, dass diese Annahmen das Vergleichsergebnis in unzulässigem Maße beeinflussen (GRS 2010).

6 Methodische Vorgehensweise bei der Ermittlung von Robustheitsdefiziten

6.1 Grundsätzliches zur Robustheit der Tiefenlager

Diskussionen über die Robustheit leiden manchmal unter einem gewissen Mangel an Übereinstimmung darüber, was unter Robustheit zu verstehen ist. In diesem Bericht werden Begrifflichkeiten benutzt, wie sie BMU (2010) bzw. GRS (2010) definiert haben:

BMU (2010) definiert **Robustheit** folgendermaßen: „Mit Robustheit wird die Zuverlässigkeit und Qualität und somit die Unempfindlichkeit der Sicherheitsfunktionen des Endlagersystems und seiner Barrieren gegenüber inneren und äußeren Einflüssen und Störungen sowie die Unempfindlichkeit der Ergebnisse der Sicherheitsanalyse gegenüber Abweichungen von den zugrunde gelegten Annahmen bezeichnet“.

GRS (2010) unterteilt Robustheit in die Systemrobustheit und die Nachweisrobustheit:

Systemrobustheit: „Bedeutet die Unempfindlichkeit des Endlagersystems gegenüber veränderten Randbedingungen (Einwirkungsereignissen), die sich aus der Standortentwicklung oder endlagerinduzierten Prozessen ergeben“.

Nachweisrobustheit: „Robustheit im Sinne der Charakterisierbarkeit und Prognostizierbarkeit des Endlagersystems im Sinne des Vertrauens in die Erfüllung der Auslegungsanforderungen an das Endlager-system“.

Systemrobustheit und Nachweisrobustheit werden von GRS (2010) unter dem Begriff Robustheit subsumiert.

Unter **Robustheitsdefizit** versteht GRS (2010) folgendes: „Robustheitsdefizite ergeben sich aus einem unangemessenen Verhältnis zwischen der Relevanz und der Robustheit einer Sicherheitsfunktion. Sie weisen auf sicherheitsrelevante Abweichungen einer Sicherheitsfunktion hin“.

Ein angemessenes Verhältnis zwischen Relevanz und Robustheit einer Sicherheitsfunktion liegt nach GRS (2010) vor, wenn der Grad ihrer Robustheit in etwa ihrer Relevanz entspricht. Da Relevanz und Robustheit ordinal skaliert werden, liegt nach GRS (2010) ein Robustheitsdefizit vor, wenn das Verhältnis zwischen Robustheit und Relevanz bei einer Sicherheitsfunktion ≤ -2 ordinal skalierte Stufen beträgt (d.h. die ordinale Wertstufe der Relevanz ist zwei oder mehr Stufen höher als die ordinale Wertstufe der zugeordneten Robustheit). In diesem Falle liegt ein Robustheitsdefizit vor. (s. Kap. 6.2.5 u. Tab. 8).

6.2 Beschreibung der Vorgehensweise bei der Ermittlung von Robustheitsdefiziten

In den folgenden Unterkapiteln (Kap. 6.2.1 bis 6.2.6) werden die sechs Schritte vom Bereitstellen der Informationen über die Ermittlung der Robustheitsdefizite der Sicherheitsfunktionen bis hin zur Ergebnisanalyse beschrieben. Die Abb. 3 gibt einen Überblick über den Verfahrensablauf.

6.2.1 Schritt 1: Zusammenstellung der Informationsgrundlagen

Die Zusammenstellung vorhandener Informationen zu den drei Referenzmodellen ist notwendig, um ihre sicherheitsrelevanten Eigenschaften in ausreichendem Detaillierungsgrad für die späteren Ar-

beitsschritte abbilden zu können. Dies ist Voraussetzung für alle weiteren Verfahrensschritte (s. Verfahrensskizze in Abb. 3).

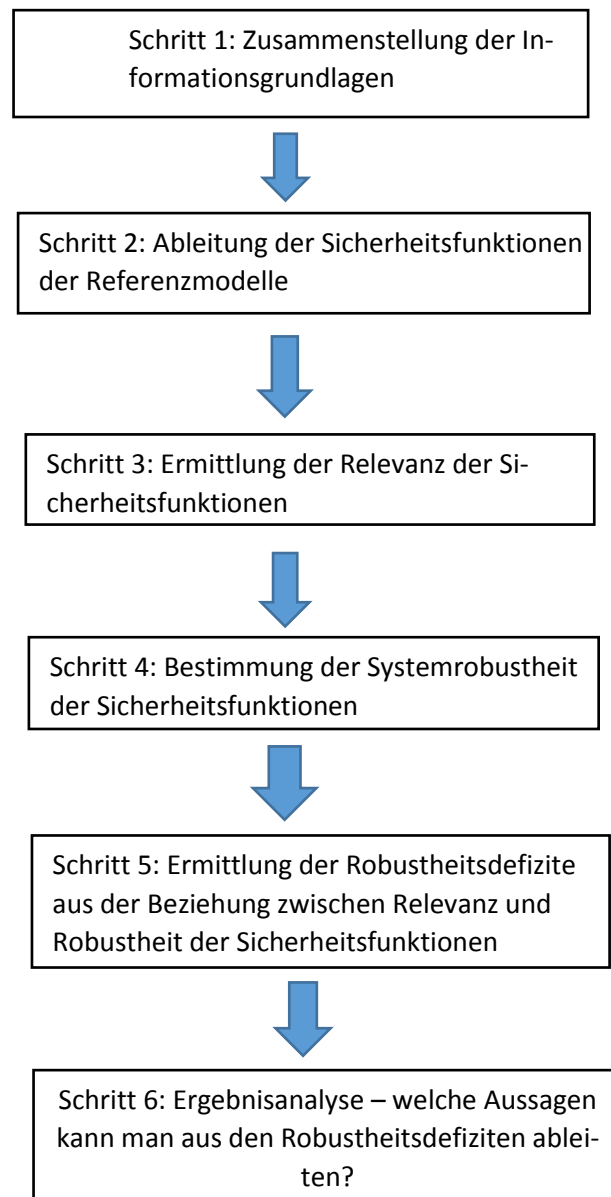


Abb. 3: Verfahrensablauf zur Ermittlung von Robustheitsdefiziten von Sicherheitsfunktionen mittels ihrer Relevanz und Robustheit

Dazu gehören für die **Tiefenlagermodelle** die vor allem auf die Langzeitsicherheit gerichteten Konzepte bzw. Anforderungen wie z.B. die Bedeutung und zeitliche Wirksamkeit der einzelnen Barrieren für die Rückhaltung/Isolation der Radionuklide.

Details zu den Tiefenlagern TE und TM können ENTRIA-AB-01 (2015), ENTRIA-AB-03 (2015) und ENTRIA-PROT (2015) entnommen werden (s. auch Kap. 2). Gleiches gilt für Informationen zu den verschiedenen Wirtsgesteinen (Salz, Ton) und ihren Eigenschaften. Hinzu tritt die einschlägige Fachliteratur, insbesondere auch Ergebnisse aus den Projekten *VerSi* (GRS 2010, GRS 2008) und der „*Vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben*“ (GRS 2013). Letztlich muss eine ausreichende Datenlage vorliegen, um die nächsten Schritte bewerkstelligen zu können. Für das Tiefenlager TM sind zusätzlich die Monitoringstrecken oberhalb der Einlagerungsfelder, die Überwachungsmaßnahmen und die längere Offenhaltung der Schächte und Infrastrukturräume zu beachten.

Ergebnis von Schritt 1:

Die notwendigen (Mindest-)Informationen zu den Tiefenlagertypen TE und TM für die folgenden Bewertungsschritte liegen vor.

6.2.2 Schritt 2: Ableitung der Sicherheitsfunktionen für die Referenzmodelle

Die Sicherheitsfunktionen der Referenzmodelle dienen der Erfüllung definierter sicherheitsrelevanter Anforderungen, speziell der Radionuklidrückhaltung. **Ihre übergeordnete integrale Aufgabe ist die Isolation der Schadstoffe** im Tiefenlager (v.a. im ewG) oder im Langzeitzwischenlager. Von **besonderer Bedeutung** sind all jene Eigenschaften von Sicherheitsfunktionen, die zur Rückhaltung der Radionuklide im Tiefenlager (oder im Zwischenlager) beitragen, das heißt die radionuklidzurückhaltenden Sicherheitsfunktionen (s. Kap. 4.1).

Die sicherheitsgewährleistende Wirkung der Sicherheitsfunktionen besteht bei **Tiefenlagern** in der möglichst weitgehenden Rückhaltung der Radionuklide im ewG/Wirtsgestein. Da das Wirtsgestein aber durch das Auffahren des Endlagerbergwerks „gestört“ wurde, müssen auch die geotechnischen Barrieren bewertet werden, die diese Störung kompensieren sollen (z.B. Versatz, Abdichtbauwerke). Die Wirkung der Sicherheitsfunktionen besteht neben der Rückhaltung der Radionuklide auch in der Verhinderung/Behinderung von Lösungszutritten zu den Abfällen, da so die Lösung und der Transport von Radionukliden begrenzt oder ganz unterbunden werden kann.

Sicherheitsfunktionen lassen sich räumlich dem Referenzmodell, Teilsystemen von diesem oder Komponenten zuordnen, die als natürliche, geotechnische oder technische Barrieren den Einschluss der Radionuklide über kürzere oder längere Zeiträume gewährleisten sollen. Die Wirksamkeit einzelner Sicherheitsfunktionen kann auf bestimmte Zeitabschnitte beschränkt sein.

Für Tiefenlager wird hier überwiegend mit folgenden **drei Wirkzeiträumen** gearbeitet: $t < 1.000$ a, t gleich 1.000 bis 10.000 a, $t > 10.000$ a. Lediglich bei den zwei Komponenten Schachtverschluss und ewG werden nur die zwei Wirkzeiträume $t < 10.000$ a und $t \geq 10.000$ a betrachtet (vgl. Tab. 6 und 7). Beim Schachtverschluss liegt der Grund dafür in der Annahme eines einzigen Verschlusselementes, was in der Realität nicht unbedingt zu erwarten ist (s. dazu Kap. 7, Robustheitsdefizit 3). Beim ewG ist dies dadurch bedingt, dass er während des gesamten Nachweiszeitraumes seine Wirksamkeit erbringen soll; hier wird nur zwischen der transienten und der stabilen Phase unterschieden.

Während einer Übergangsphase bis ca. 10.000 a laufen im End- bzw. Tiefenlager verschiedene, in komplexer Beziehung stehende Prozesse ab, die sicherheitsrelevant sind oder sein können (z.B. Temperatur- und Gasentwicklung, Konvergenz, Ausbildung von Dilatanzzonen, Aufsättigung). In der Zeit nach 10.000 a geht man davon aus, dass diese Prozesse mit Ausnahme der Gasbildung abgeschlossen bzw. vernachlässigbar sind und man in eine (quasi) stationäre Phase eintritt, die eher von langandauernden von außen auf das Tiefenlager wirkenden Prozessen bestimmt wird (z.B. Eisüberföhrung mit Rinnenbildung).

Die Begrenzung der Betrachtung auf die Wirtsgesteine Tonstein und Salz (steile und flache Lagerung) steht in Zusammenhang mit der in ENTRIA getroffenen Entscheidung, nur für diese Wirtsgesteine Langzeitbetrachtungen vorzunehmen.

Zur Ableitung und Zusammenstellung der Sicherheitsfunktionen aus dem Sicherheitskonzept siehe 4.2.

Ergebnis von Schritt 2

Identifizierung und Aufstellung von Listen mit Sicherheitsfunktionen, die für die zu betrachtenden Referenzmodelle bedeutsam sind.

6.2.3 Schritt 3: Ermittlung der Relevanz der Sicherheitsfunktionen

Die Bedeutung (Relevanz) einer Sicherheitsfunktion bezieht sich immer auf ein Referenzmodell und immer auf die grundlegenden Anforderungen an dieses Referenzmodell. Dabei wird eine möglichst hohe - bei Tiefenlagern auch sehr langfristige - Gesamtsicherheit für jedes Referenzmodell angestrebt, und jede Sicherheitsfunktion leistet dabei ihren räumlich und zeitlich spezifischen Beitrag zur Sicherheit. Dieser Beitrag ist in Abhängigkeit von der Ausbildung der Sicherheitsfunktion mehr oder weniger bedeutsam. Die wichtigsten Sicherheitsfunktionen der Referenzmodelle liefern den größten Beitrag zur übergeordneten und angestrebten langfristigen Gesamtsicherheit der Referenzmodelle. Auf diese Sicherheitsfunktionen muss sich die Ableitung der jeweiligen Relevanz konzentrieren. Die **Bestimmung**

der Relevanz orientiert sich also für alle Sicherheitsfunktionen grundsätzlich auf die Erfüllung der generellen Anforderung nach Einschluss der Radionuklide. Das gilt für alle betrachteten Referenzmodelle.

Diese Bedingung ist zwar erfüllt für die Tiefenlager, nicht aber für das Langzeitzwischenlager. Daraus folgt, dass die gleichen Relevanzklassen zwischen den Tiefenlagertypen TE und TM als gleichwertig zu betrachten sind¹, nicht aber für das Langzeitzwischenlager und das Pufferlager.

Die **Einteilung der Sicherheitsfunktionen der End- bzw. Tiefenlager in fünf Relevanzklassen** (s. u.) kann nur mittels Ordinalskalen geschehen, da wegen eingeschränkter Möglichkeiten zur Quantifizierung der Relevanz und fehlender quantitativer Maßstäbe lediglich Ordnungsaussagen möglich sind (z.B. bedeutsam, weniger bedeutsam), wobei die Abstände zwischen den einzelnen Rangplätzen nicht bekannt sind.

In der Praxis des Vergleichs von Referenzmodellen erfolgt die Zuordnung der Sicherheitsfunktionen zu Relevanzklassen im Wesentlichen auf **Grundlage von Expertenmeinung**. Eine objektive Quantifizierung der Relevanz ist bei den meisten Sicherheitsfunktionen wegen des vor allem in Bezug auf die Tiefenlagerung begrenzten Systemverständnisses und nichtlinearer komplexer Verknüpfungen von Eigenschaften und Sicherheitsfunktionen sowie mangelnder Informationen im Detail nicht gegeben (GRS 2010). Die Diskussion über die zeitabhängige Zuordnung von Relevanzklassen hat bei ENTRIA im Rahmen zweier Treffen stattgefunden (ENTRIA-PROT 2016a, ENTRIA-PROT 2016b), bei denen die entsprechenden Vertikal- und Transversalprojekte vertreten waren.

Die Bestimmung der Relevanz erfolgt für alle Sicherheitsfunktionen unter übereinstimmendem Blickwinkel. Von daher sind alle Sicherheitsfunktionen, die derselben Relevanzklasse zugeordnet werden, in ihrer Bedeutung für die Gesamtsicherheit des jeweiligen **Tiefenlagertyps TE bzw. TM** als "**gleichwertig**" anzusehen. Dabei ist jedoch zu beachten, dass Sicherheitsfunktionen mit übereinstimmender Referenzklasse auch funktional zu gleichwertigen Referenzmodellen zugehören. Diese Aussage gilt auch für die Sicherheitsfunktionen mit übereinstimmenden Relevanzklassen bei Tiefenlagersystemen unterschiedlichen Typs. Die Relevanz der Sicherheitsfunktionen wird jeweils für die **Wirkzeiträume** einer Sicherheitsfunktion angegeben.

Die Bestimmung der Relevanz der Sicherheitsfunktion für das Referenzmodell **Langzeitzwischenlager** geschieht in analoger Form. Allerdings sind die hier benutzten Sicherheitsfunktionen, die einer Relevanzklasse zugehören, nicht vergleichbar mit den Sicherheitsfunktionen der gleichen Relevanzklasse

¹ Allein aus diesem Grunde verbietet sich ein unmittelbarer Vergleich des Langzeitzwischenlagers mit den Tiefenlagern auf der Ebene der Sicherheitsfunktionen bzw. deren Robustheitsdefizite.

bei den Tiefenlagern (s.o.). Gründe dafür sind unter anderen die um Größenordnungen kürzeren Zeithorizonte, die permanente Überwachung der technischen Barrieren sowie bei Bedarf ihre Reparatur. Insofern ergibt ein direkter Vergleich von Tiefenlager und Langzeitzwischenlager alleine mit Hilfe von Robustheitsdefiziten ein unsinniges Ergebnis.

Unterschiede zwischen der **Relevanz der Sicherheitsfunktionen der Tiefenlagertypen TE und TM** sind auf der hier vorliegenden generischen Betrachtungsebene für die jeweiligen Wirtsgesteine Salz und Tonstein nicht erkennbar. Grund dafür ist, dass beide Entsorgungskonzepte letztendlich das Ziel der passiv sicheren Lagerung der Radionuklide anstreben und deshalb gleiche Sicherheitskonzepte verfolgen (s. Kap. 3).

In Anlehnung an GRS (2010) werden **fünf ordinale Relevanzklassen** unterschieden von „unverzichtbar/sehr hohe Relevanz“ (5) über „hohe“ (4), „mittlere“ (3) und „geringe“ (2) bis hin zu „keine/vernachlässigbare Relevanz“ (1).

Die Relevanzklassen der Sicherheitsfunktionen der Referenzmodelle können – getrennt nach den Wirtsgesteinen Salz und Tonstein und differenziert nach den drei Wirkzeiträumen – der Abb. 2 entnommen werden.

Ergebnis von Schritt 3

Am Ende von Schritt 3 werden die Sicherheitsfunktion – differenziert nach Referenzmodellen und Wirksamkeitszeiträumen – einer von fünf Referenzklassen zugeordnet.

In den Tabellen 2-1 bis 2-10 wird die Relevanz der radionuklidrückhaltenden Sicherheitsfunktionen für die jeweiligen Wirkzeiträume getrennt nach den Wirtsgesteinen Salz und Tonstein dargestellt. Die ermittelten Werte der Relevanz gelten für beide Arten von Tiefenlager (TE, TM) gleichermaßen.

Relevanz der radionuklidrückhaltenden Sicherheitsfunktionen Tiefenlager TE und TM in Salz (steil- u. flachlagernd)				
KOMPONENTE ABFALLBEHÄLTER				
Sicherheitsfunktion	Relevanz			Anmerkungen
Wirkzeiträume	$t < 1.000 \text{ a}$	$t = 1.000 - 10.000 \text{ a}$	$t > 10.000 \text{ a}$	Wesentliche rückhaltende Sicherheitsfunktion für $t < 1000 \text{ a}$.
Begrenzung/Verhinderung Lösungszutritt zum Abfallprodukt wegen Dichtwirkung Behälterwandung	5	1	1	Bergbarkeit bis 500 a gefordert, deshalb Dichtwirkung gegeben; Behälterwirkung gering belastbar für $t > 1.000 \text{ a}$; deshalb Relevanzstufe 1
Verzögerung d. Radionuklidausbreitung durch Sorption am Behältermaterial	1	1	1	Für alle Zeiträume: Sorptionsmechanismen an Behältermaterial nicht gut bekannt u. quantifizierbar;
Begrenzung der Radionuklid- ausbreitung durch Löslichkeitsgrenzen	1	1	1	Für alle Zeiträume: löslichkeitssteuernde Prozesse u. Parameter an Behältermaterial nicht gut bekannt u. wenig belastbar quantifizierbar;

Tab. 2-1: Relevanz der radionuklidrückhaltenden Sicherheitsfunktionen für Tiefenlager in Salz (Komponente Abfallbehälter)

Relevanz der radionuklidrückhaltenden Sicherheitsfunktionen Tiefenlager TE und TM in Salz (steil- u. flachlagernd) KOMPONENTE VERSATZ (SALZGRUS)				
Sicherheitsfunktion	Relevanz			Anmerkungen
Wirkzeiträume	<i>t < 1.000 a</i>	<i>t = 1.000 – 10.000 a</i>	<i>t > 10.000 a</i>	Entscheidende rückhaltende Sicherheitsfunktion für t > 1.000 a bis zum Ende des Nachweiszeitraumes.
Begrenzung/Verhinderung von Lösungsbewegung u. Radionuklidtransport	3	5	5	Versatz entwickelt die vollen einschlusswirksamen Eigenschaften erst bei t > 1.000 a
Begrenzung der RN-Ausbreitung wegen Löslichkeitsgrenzen	2	2	2	Für alle Zeiträume: löslichkeitssteuernde Prozesse u. Parameter nicht ausreichend bekannt
Verzögerte RN-Ausbreitung wg. Sorption	n.b.	n.b.	n.b.	nicht Relevant für Salz

Tab. 2-2: Relevanz der radionuklidrückhaltenden Sicherheitsfunktionen für Tiefenlager in Salz (Komponente Versatz)

Relevanz der radionuklidrückhaltenden Sicherheitsfunktionen Tiefenlager TE und TM in Salz (steil- u. flachlagernd)				
KOMPONENTE ABDICHTUNG/DÄMME DER EINLAGERUNGSSTRECKEN GEGENÜBER RESTLICHEM GRUBENGEBÄUDE				
Sicherheitsfunktion	Relevanz			Anmerkungen
Wirkzeiträume	$t < 1.000 \text{ a}$	$t = 1.000 - 10.000 \text{ a}$	$t > 10.000 \text{ a}$	Wesentliche schnell wirkende rückhaltende Sicherheitsfunktion für $t < 10.000 \text{ a}$.
Begrenzung/Verhinderung von Lösungsbewegung u. RN-Transport	5	5	1	Wirksamkeit Abdichtung für $t > 10.000 \text{ a}$ nicht gesichert (z.B. Korrosion)
Verzögerung d. RN-Ausbreitung durch Sorption	n.b.	n.b.	n.b.	Keine Relevanz bei Salz

Tab. 2-3: Relevanz der radionuklidrückhaltenden Sicherheitsfunktionen für Tiefenlager in Salz (Komponente Abdichtung/Dämme der Einlagerungsstrecken gegenüber dem restlichen Grubengebäude)

Relevanz der radionuklidrückhaltenden Sicherheitsfunktionen Tiefenlager TE und TM in Salz (steil- u. flachlagernd)			
KOMPONENTE SCHACHTVERSCHLUSS			
Sicherheitsfunktion	Relevanz		Anmerkungen
<i>Wirkzeiträume</i>	$t \leq 10.000 \text{ a}$	$t > 10.000 \text{ a}$	Wesentliche schnell wirkende rückhaltende Sicherheitsfunktion bis $t = 10.000 \text{ a}$. Abdichtung Grubengebäude/ewG nach außen
Begrenzung/Verhinderung von Lösungsbewegung u. RN-Transport	5	1	Für $t < 10.000$ bedeutsam, für $t > 10.000 \text{ a}$ zunehmend weniger bedeutsam u.a. wegen möglicher kaltzeitlicher Änderungen im Deckgebirge
Verzögerung d. RN-Ausbreitung durch Sorption	n.b.	n.b.	Für den gesamten Betrachtungszeitraum für Salz nicht relevant

Tab. 2-4: Relevanz der radionuklidrückhaltenden Sicherheitsfunktionen für Tiefenlager in Salz (Komponente Schachtverschluss)

Relevanz der radionuklidrückhaltenden Sicherheitsfunktionen Tiefenlager TE und TM in Salz (steil- u. flachlagernd)			
KOMPONENTE EINSCHLUSSWIRKSAMER GEBIRGSBEREICH (ewG)			
Sicherheitsfunktion	Relevanz		Anmerkungen
Wirkzeiträume	<i>t bis 10.000 a</i>	<i>t > 10.000 a bis 1 Mio. a</i>	Entscheidende rückhaltende Sicherheitsfunktion für den gesamten Nachweiszeitraum
Begrenzung/Verhinderung von Lösungsbewegung u. RN-Transport	5	5	Primäre Sicherheitsfunktion für den gesamten Nachweiszeitraum von 1 Mio. a
Verzögerung d. RN-Ausbreitung durch Sorption	n.b.	n.b.	Für Salz vernachlässigbar; nicht bewertet

Tab. 2-5: Relevanz der radionuklidrückhaltenden Sicherheitsfunktionen für Tiefenlager in Salz (Komponente einschlusswirksamer Gebirgsbereich)

Relevanz der radionuklidrückhaltenden Sicherheitsfunktionen Tiefenlager TE und TM in Tonstein KOMPONENTE ABFALLBEHÄLTER				
Sicherheitsfunktion	Relevanz			Anmerkungen
<i>Wirkzeiträume</i>	<i>t < 1.000 a</i>	<i>t = 1.000 – 10.000 a</i>	<i>t > 10.000 a</i>	Wesentliche rückhaltende Sicherheitsfunktion für t < 10.000 a
Begrenzung/Verhinderung Lösungszutritt zum Abfallprodukt wegen Dichtwirkung Behälterwandung	5	4	1	Bergbarkeit bis 500 a gefordert; Behälter ist bis 1.000 a wichtige Barriere. Für t = 1.000 bis 10.000 a Behälterwirkung abnehmend; Behälterwirkung nicht belastbar für t > 10.000 a, deshalb Relevanzstufe 1
Verzögerung d. Radionuklid-ausbreitung durch Sorption am Behältermaterial	1	1	1	Sorptionsmechanismen an Behältermaterial nicht ausreichend bekannt u. wenig belastbar quantifizierbar;
Begrenzung der Radionuklid-ausbreitung durch Löslichkeitsgrenzen	1	1	1	löslichkeitssteuernde Prozesse u. Parameter am Behältermaterial nicht ausreichend bekannt u. wenig belastbar quantifizierbar;

Tab. 2-6: Relevanz der radionuklidrückhaltenden Sicherheitsfunktionen für Tiefenlager in Tonstein (Komponente Abfallbehälter)

Relevanz der radionuklidrückhaltenden Sicherheitsfunktionen Tiefenlager TE und TM Tonstein KOMPONENTE VERSATZ (Bentonit)				
Sicherheitsfunktion	Relevanz			Anmerkungen
Wirkzeitraum	<i>t < 1.000 a</i>	<i>t = 1.000 – 10.000 a</i>	<i>t > 10.000 a</i>	Entscheidende rückhaltende Sicherheitsfunktion für t > 10.000 a bis zum Ende des Nachweiszeitraumes.
Begrenzung/Verhinderung von Lösungsbewegung u. Radionuklidtransport	3	4	5	Für Zeitraum bis t = 10.000 a erfolgt langsame Entwicklung des Versatzes in Richtung einschlusswirksam; volle einschlusswirksame Eigenschaften erst ab t > 10.000 a
Begrenzung der RN-Ausbreitung wegen Löslichkeitsgrenzen	2	2	2	Für alle Zeiträume: löslichkeitssteuernde Prozesse u. Parameter womöglich nicht ausreichend bekannt
Verzögerte RN-Ausbreitung durch Sorption	5	5	5	Während der gesamten Zeit relevant u. dauerhaft wirksam

Tab. 2-7: Relevanz der radionuklidrückhaltenden Sicherheitsfunktionen für Tiefenlager in Tonstein (Komponente Versatz)

Relevanz der radionuklidrückhaltenden Sicherheitsfunktionen Tiefenlager TE und TM in Tonstein KOMPONENTE ABDICHTUNG/DÄMME DER EINLAGERUNGSSTRECKEN GEGENÜBER RESTLICHEM GRUBENGEBÄUDE				
Sicherheitsfunktion	Relevanz			Anmerkungen
Wirkzeitraum	$t < 1.000 \text{ a}$	$t = 1.000 - 10.000 \text{ a}$	$t > 10.000 \text{ a}$	Wesentliche schnell wirkende rückhaltende Sicherheitsfunktion bis 10.000 a
Begrenzung/Verhinderung von Lösungsbewegung u. RN-Transport	5	5	1	Hohe Relevanz für $t < 10.000 \text{ a}$; danach Abdichtung durch Versatz
Verzögerung d. RN-Ausbreitung durch Sorption	4	4	4	Während der gesamten Zeit relevant u. dauerhaft wirksam

Tab. 2-8: Relevanz der radionuklidrückhaltenden Sicherheitsfunktionen für Tiefenlager in Tonstein (Komponente Abdichtung/Dämme der Einlagerungsstrecken gegenüber dem restlichen Grubengebäude)

Relevanz der radionuklidrückhaltenden Sicherheitsfunktionen Tiefenlager TE und TM in Tonstein KOMPONENTE SCHACHTVERSCHLUSS			
Sicherheitsfunktion	Relevanz		Anmerkungen
Wirkzeitraum	$t < 1.000 \text{ a}$	$t = 1.000 - 10.000 \text{ a}$	Wesentliche schnell wirkende rückhaltende Sicherheitsfunktion bis 10.000 a. Abdichtung Grubengebäude/ewG nach außen
Begrenzung/Verhinderung von Lösungsbewegung u. RN-Transport	5	1	Für $t < 10.000 \text{ a}$ bedeutsam, für $t \geq 10.000 \text{ a}$ zunehmend weniger bedeutsam u.a. wegen möglicher kaltzeitlicher Änderungen im Deckgebirge
Verzögerung d. RN-Ausbreitung durch Sorption	4	3	Für den gesamten Betrachtungszeitraum mäßig relevant

Tab. 2-9: Relevanz der radionuklidrückhaltenden Sicherheitsfunktionen für Tiefenlager in Tonstein (Komponente Schachtverschluss)

Relevanz der radionuklidrückhaltenden Sicherheitsfunktionen Tiefenlager TE und TM in Tonstein KOMPONENTE EINSCHLUSSWIRKSAMER GEBIRGSBEREICH (ewG)			
Sicherheitsfunktion	Relevanz		Anmerkungen
<i>Wirkzeitraum</i>	<i>t bis 10.000 a</i>	<i>t > 10.000 a bis 1 Mio. a</i>	Entscheidende rückhaltende Sicherheitsfunktion für den gesamten Nachweiszeitraum
Begrenzung/Verhinderung von Lösungsbewegung u. RN-Transport	5	5	Primäre Sicherheitsfunktion für den gesamten Nachweiszeitraum von ca. 1 Mio. a
Verzögerung d. RN-Ausbreitung durch Sorption	5	5	Primäre Sicherheitsfunktion für den gesamten Nachweiszeitraum von ca. 1 Mio. a

Tab. 2-10: Relevanz der radionuklidrückhaltenden Sicherheitsfunktionen für Tiefenlager in Tonstein (Komponente einschlusswirksamer Gebirgsbereich)

6.2.4 Schritt 4: Bestimmung der Robustheit der Sicherheitsfunktionen

Unter der Robustheit einer Sicherheitsfunktion versteht man ihre Unempfindlichkeit gegenüber inneren und äußeren Einflüssen (Systemrobustheit) sowie gegenüber dem Grad der Ungewissheiten hinsichtlich ihrer Charakterisierbarkeit und Prognostizierbarkeit (Nachweisrobustheit), s. dazu Kap. 6.1. Die Bestimmung der Robustheit ist neben der Bestimmung der Relevanz (s. Kap. 6.2.3) der zweite wichtige Teilschritt bei der Beurteilung von Sicherheitsfunktionen der Referenzmodelle.

Bei der Bestimmung der Robustheit werden also die systemimmanenten Auswirkungen von inneren und äußeren Entwicklungen (Szenarien) auf die Sicherheitsfunktionen der Referenzmodelle beurteilt sowie die Aussagesicherheit bzw. Ungewissheiten hinsichtlich der Charakterisierbarkeit und Prognostizierbarkeit von Parametern.

Sicherheitsfunktionen stellen qualitative Beschreibungen sicherheitsgerichteter **Anforderungen** an einzelne Systemkomponenten der Referenzmodelle dar. Deshalb können sie nicht direkt einer Robustheitsbewertung unterzogen werden. Vielmehr können nur ihre **funktionalen Bestandteile**, vor allem die Parameter der radionuklidrückhaltenden Sicherheitsfunktionen (**RSF-Parameter**), aber auch Auslegungsanforderungen, einwirkende Kräfte, Ungewissheiten usw., die der Sicherheitsfunktion eigen sind bzw. auf sie einwirken, bestimmt und bewertet werden. Diese – und gegebenenfalls andere – Aspekte dienen gleichsam als **Bewertungsgrößen**. Sie werden mit Hilfe verschiedener **Bewertungsmaßstäbe** bewertet, die zu folgenden **Bewertungsfeldern** gehören, und von GRS (2010) abgeleitet worden sind:

- **Vertrauen in die Charakterisierung der RSF-Parameter im Ist-Zustand**

Hierzu gehören die Charakterisierbarkeit der RSF-Parametergröße in Abhängigkeit von den Untersuchungsmethoden, ihre Übertragbarkeit auf Standortverhältnisse (upscaling), ihre Aussagesicherheit mit Blick auf den Untersuchungsaufwand.

- **Vertrauen in die Ermittlung der langfristigen Prognostizierbarkeit und Charakterisierung der RSF-Parameter**

Hierzu gehört vor allem die Abschätzung der Veränderungen der RSF-Parameterwerte im Zeitverlauf unter Berücksichtigung von Ungewissheiten in der langfristigen Entwicklung des Tiefenlagersystems. Ebenfalls in die Bewertung ein geht das Prozessverständnis.

- **Auswirkungen interner und/oder externer Vorgänge des Tiefenlagersystems bzw. seiner Umgebung auf die Sicherheitsfunktionen (Systemrobustheit).**

Hierzu gehören sich aus der Standortentwicklung ergebenden äußeren (z.B. glaziale Rinnenbildung) und inneren (Gas, Wärmeentwicklung) Auswirkungen auf Sicherheitsfunktio-

nen. Findet die Änderung stets zur „sicheren Seite“ hin oder führt sie nur zu sehr geringen Auswirkungen, spricht das für Systemrobustheit.

- **Vertrauen in die Erfüllung sicherheitskonzeptioneller Auslegungsanforderungen**

Dies betrifft vor allem die RSF-Parameter im Verhältnis zu auslegungsbedingten Anforderungen (v.a.: können die Anforderungen an die RSF-Parameter von diesen eingehalten werden?).

Die einzelnen Bewertungen müssen zu einer Gesamtbeurteilung der Robustheit der Sicherheitsfunktion **aggregiert** werden, damit die Robustheit als ordinaler Kennwert verfügbar ist. Diese Aggregation muss sorgfältig vorgenommen und verbal-argumentativ begründet werden. Dennoch sind subjektive Einflüsse unvermeidbar.

Bei der Bewertung der RSF-Parameter der verschiedenen Komponenten sind die drei (bzw. für zwei Komponenten nur zwei) verschiedenen Wirkzeiträume (s. Kap.6.2.2) zu berücksichtigen. Die beschriebenen Kriterien können nicht alle umfänglich oder in der gewünschten Detailtiefe abgehandelt werden, da einerseits wegen des generischen Charakters der Referenzmodelle teilweise nur sehr allgemeine Angaben vorliegen und andererseits kein Standortbezug gegeben ist. Allerdings liegen für wichtige Kriterien erste Abschätzungen der Robustheiten durch die GRS (2010) an einem realen Salzstandort (Gorleben) und einem fiktiven Tonstandort in Norddeutschland vor, die hilfsweise und im Einzelfall nach Überprüfung übernommen werden.

Abschließend werden die einzelnen Teilbewertungen einer rückhaltenden Sicherheitsfunktion durch Aggregation zur Gesamtrobustheit der Sicherheitsfunktion zusammengeführt, und zwar getrennt für den Nachweiszeitraum bzw. die drei Wirkzeiträume. Anders ausgedrückt lässt sich nach GRS (2010) die Gesamtrobustheit auch als Vertrauen in die Erfüllung von Auslegungsanforderungen der entsprechenden rückhaltenden Eigenschaften der Sicherheitsfunktion formulieren. Diese epistemische Auffassung von Robustheit kann in gewissem Sinne auch als Gradmesser der Ungewissheit aufgefasst werden.

In den folgenden Kapiteln werden für die Tiefenlagertypen TE und TM die Robustheiten der rückhaltenden Sicherheitsfunktionen getrennt nach den Wirtsgesteinen Steinsalz und Tonstein anhand der dargelegten Kriterien bestimmt. Dabei können die Tiefenlager gemeinsam behandelt werden, und auch Steinsalz steillagernd und flachlagernd können zusammen behandelt werden. Wenn Unterschiede in der Bewertung der beiden Referenzmodelle Endlagerung mit sofortigem Verschluss und Tiefenlagerung mit Monitoring und Rückholbarkeit auftreten, wird darauf hinge-

wiesen. Diese Unterschiede sind von besonderem Interesse für die Beurteilung der Referenzmodelle.

Bei der Ermittlung des Ausmaßes von Veränderungen auf der Parameterebene der Sicherheitsfunktionen ist zu beachten, dass einzelne Sicherheitsfunktionen durch verschiedene Einwirkungen in unterschiedlicher Weise und unterschiedlichem Ausmaß beeinträchtigt werden können. Zudem kann eine Zeitabhängigkeit gegeben sein. Es ist sicher zu stellen, dass die bei der Ermittlung des Ausmaßes berücksichtigten Einwirkungen die gesamte Bandbreite möglicher Einwirkungen in angemessener Weise erfassen. Die zu berücksichtigenden Einwirkungen werden aus den als relevant betrachteten beispielhaften Szenarien bzw. zugehörigen FEPs (Features, Events, Processes) abgeleitet (s. dazu Bericht C 2016).

Ähnlich wie bei der Relevanz der Sicherheitsfunktionen gilt auch für die Robustheit, dass eine quantitative Bestimmung allenfalls für einige wenige Sicherheitsfunktionen möglich ist. Sinnvoll und möglich ist daher auch hier die Einordnung der Robustheit in eine **Ordinalskala**. Aber selbst wenn die Robustheit ausnahmsweise quantitativ bestimmt werden kann, muss sie in eine ordinale Größe umgewandelt werden, damit sie mit der ordinal skalierten Relevanz der Sicherheitsfunktionen verknüpft werden kann. Quantitative und qualitativ ermittelte Größen für das Ausmaß der Einwirkungen müssen also in eine einheitliche ordinale Klassenzuordnung münden.

Es werden **fünf ordinale Robustheitsklassen** unterschieden: Sehr hohe Robustheit (5), hohe Robustheit (4), mittlere bzw. mäßige Robustheit (3), geringe Robustheit (2) und eine sehr geringe bzw. vernachlässigbare Robustheit (1). Hinsichtlich der Zuordnung der Robustheit zu diesen Klassen (z.B. Spannweite der einzelnen Klassen, Unterschiede zwischen den Klassen, "Gleichheit" innerhalb einer Klasse) treffen die für ordinale Skalen gültigen Möglichkeiten und Grenzen zu, wie sie bereits für die Relevanzklassen (s. Kap.6.2.3) beschrieben worden sind.

Die detaillierte Ermittlung der Robustheiten der Sicherheitsfunktionen ist dem Anhang zu entnehmen (Anhänge A bis E für die fünf Komponenten der Tiefenlager)

Die Zuordnung einer Sicherheitsfunktion zu einer der fünf Robustheitsklassen setzt voraus, dass für ein in Frage kommendes Szenario tatsächlich eine Auswirkung auf die Sicherheitsfunktion auftritt bzw. auftreten kann. Diese Bedingung trifft (möglicherweise) nicht für alle Sicherheitsanforderungen und Szenarien zu, und zwar dann nicht,

- wenn innere und/oder äußere Einwirkungen auf eine Sicherheitsfunktion auf Grund des Systemverständnisses und der Prognostizierbarkeit künftiger Ereignisse und Prozesse ausgeschlossen werden können,

- wenn innere und/oder äußere Einwirkungen auf eine Sicherheitsfunktion auf Grund des Systemverständnisses und der Prognostizierbarkeit künftiger Ereignisse und Prozesse zwar erwartet werden müssen, sie aber so gering sind, dass Zweifel bestehen, ob sie überhaupt irgendwelche substantielle Veränderungen zur Folge haben können,
- wenn eine Sicherheitsfunktion nicht bei allen der zu vergleichenden Referenzmodelle erforderlich bzw. vorhanden ist.

Für den bewertungstechnischen Umgang mit diesen und ähnlichen Situationen müssen daher in der konkreten Situation u. U. spezielle Regeln festgelegt werden (z.B. ähnlich GRS 2010, Appel & Kreusch 2009).

Ergebnis von Schritt 4

Ermittlung der Robustheit der Sicherheitsfunktionen für die betrachteten Referenzmodelle. Die Robustheiten aller Sicherheitsfunktionen sind, differenziert nach Wirtsgestein und Wirkzeiträumen, einer der fünf Robustheitsklassen zuzuordnen. Da die Bestimmung der Robustheiten für die Sicherheitsfunktionen umfangreich ist, liegen sie diesem Bericht separat als Anhänge A bis E vor.

Ergebnisse der Robustheitsbewertung:

Hier werden die aggregierten Ergebnisse der Robustheitsbewertungen der rückhaltenden Sicherheitsfunktionen in tabellarischer Form dargestellt; zur detaillierten Ableitung der Robustheitsbewertungen s. Anhänge A bis E.

Die Ergebnisse sind den folgenden Tabellen 3 bis 7 zu entnehmen.

Komponente ABFALLBEHÄLTER (Ableitung der Robustheitswerte s. Anhang A):

Robustheit der Sicherheitsfunktionen der Systemkomponente Abfallbehälter						
Radionuklidrückhaltende Sicherheitsfunktionen	Salz (steile u. flache Lagerung) Versatz Salzgrus Tiefenlager TE + TM			Tonstein Versatz Bentonit Tiefenlager TE + TM		
	<i>t < 1.000 a</i>	<i>1.000 bis 10⁴ a</i>	<i>t > 10⁴ a</i>	<i>t < 1.000 a</i>	<i>1.000 bis 10⁴ a</i>	<i>t > 10⁴ a</i>
Wirkzeiträume						
Begrenzung/Verhinderung Lösungsbewegung Lösungszutritt zum Abfallprodukt wg. Dichtwirkung d. Behälterwandung	Ro4	n.b.	n.b.	Ro4	Ro3	n.b.
Begrenzung RN-Ausbreitung wegen Löslichkeitsgrenzen	Ro2	Ro2	Ro2	Ro2	Ro2	Ro2
Verzögerte RN-Ausbreitung durch Sorption am Behältermaterial	Ro2	Ro2	Ro2	Ro2	Ro2	Ro2

Tab 3: Zusammenfassende Bewertung der Robustheit der rückhaltenden Sicherheitsfunktionen für die Systemkomponente Behälter für unterschiedliche Wirkzeiträume und Wirtsgesteine (n.b.: nicht bewertet). Bewertung: Ro1 = vernachlässigbare/sehr geringe Robustheit bis Ro5 sehr hohe Robustheit).

Komponente VERSATZ (Ableitung der Robustheitswerte s. Anhang B):

Robustheit der Systemkomponente VERSATZ						
Radionuklidrückhaltende Sicherheitsfunktionen	Salz (steile u. flache Lagerung) Versatz Salzgrus Tiefenlager TE + TM			Tonstein Versatz Bentonit Tiefenlager TE + TM		
Wirkzeiträume	$t < 1.000\ a$	$1.000\ bis\ 10^4\ a$	$t > 10^4\ a$	$t < 1.000\ a$	$1.000\ bis\ 10^4\ a$	$t > 10^4\ a$
Begrenzung/Verhinderung Lösungsbewegung u. RN-Transport	Ro3	Ro3	Ro3	Ro3	Ro4	Ro4
Begrenzung RN-Ausbreitung wegen Löslichkeitsgrenzen	Ro4	Ro4	Ro4	Ro4	Ro4	Ro4
Verzögerte RN-Ausbreitung durch Sorption	n.b.	n.b.	n.b.	Ro4	Ro4	Ro4

Tab 4: Zusammenfassende Bewertung der Robustheit der rückhaltenden Sicherheitsfunktionen für die Systemkomponente Versatz für unterschiedliche Wirkzeiträume und Wirtsgesteine (n.b.: nicht bewertet). Bewertung: Ro1 = vernachlässigbare/sehr geringe Robustheit bis Ro5 sehr hohe Robustheit).

Komponente STRECKENABDICHTUNG/DÄMME (Ableitung der Robustheitswerte s. Anhang C):

Robustheit der Systemkomponente Streckenabdichtung/Dämme						
Radionuklidrückhaltende Sicherheitsfunktionen	Salz (steile u. flache Lagerung) Abdichtung Salzbeton Tiefenlager TE + TM			Tonstein Abdichtung Bentonit Tiefenlager TE + TM		
Wirkzeiträume	$t < 1.000\ a$	$1.000\ bis\ 10^4\ a$	$t > 10^4\ a$	$t < 1.000\ a$	$1.000\ bis\ 10^4\ a$	$t > 10^4\ a$
Begrenzung/Verhinderung von Lösungsbewegung und Radionuklidtransport	Ro3	Ro3	Ro3	Ro4	Ro4	Ro4
Verzögerte RN-Ausbreitung durch Sorption	n.b.	n.b.	n.b.	Ro4	Ro4	Ro4

Tab 5: Zusammenfassende Bewertung der Robustheit der rückhaltenden Sicherheitsfunktionen für die Systemkomponente Abdichtung/Dämme für unterschiedliche Wirkzeiträume und Wirtsgesteine (n.b.: nicht bewertet). Bewertung: Ro1 = vernachlässigbare/sehr geringe Robustheit bis Ro5 sehr hohe Robustheit).

Komponente SCHACHTVERSCHLUSS (Ableitung der Robustheitswerte s. Anhang D):

Robustheit der Systemkomponente Schachtverschluss				
Radionuklidrückhaltende Sicherheitsfunktionen	Salz (steile u. flache Lagerung) Dichtelement Salzgrus Tiefenlager TE + TM		Tonstein Dichtelement Bentonit Tiefenlager TE + TM	
<i>Wirkzeiträume</i>	<i>t bis 10.000 a</i>	<i>t > 10.000 a</i>	<i>T bis 10.000 a</i>	<i>t > 10⁴ a</i>
Begrenzung/Verhinderung von Lösungsbewegung und Radionuklidtransport	Ro3	Ro3	Ro4	Ro4
Verzögerte RN-Ausbreitung durch Sorption	n.b.	n.b.	Ro4	Ro4

Tab 6: Zusammenfassende Bewertung der Robustheit (Ro) der radionuklidrückhaltenden Sicherheitsfunktionen für die Systemkomponente Schachtverschluss für unterschiedliche Wirkzeiträume und Wirtsgesteine (Ro1 = vernachlässigbare/sehr geringe Robustheit bis Ro5 = sehr hohe Robustheit; n.b.: nicht bewertet).

Komponente einschlusswirksamer Gebirgsbereich - ewG (Ableitung der Robustheitswerte s. Anhang E):

Robustheit der Systemkomponente ewG				
Radionuklidrückhaltende Sicherheitsfunktionen	Salz (steile u. flache Lagerung) ewG Tiefenlager TE + TM		Tonstein ewG Tiefenlager TE + TM	
<i>Wirkzeiträume</i>	<i>t < 10.000 a</i>	<i>t ≥ 10.000 a</i>	<i>t < 10.000 a</i>	<i>t ≥ 10.000 a</i>
Begrenzung/Verhinderung Lösungsbewegung u. RN-Transport	Ro4	Ro4 (steile L.) Ro5 (flache L.)	Ro4	Ro3
Verzögerte RN-Ausbreitung durch Sorption	n.b.	n.b.	Ro5	Ro4

Tab 7: Zusammenfassende Bewertung der Robustheit der rückhaltenden Sicherheitsfunktionen für die Systemkomponente ewG für unterschiedliche Wirkzeiträume und Wirtsgesteine (n.b. = nicht bewertet). Bewertung: Ro1 = vernachlässigbare/sehr geringe Robustheit bis Ro5 = sehr hohe Robustheit).

6.2.5 Schritt 5: Ermittlung der Robustheitsdefizite aus dem Verhältnis zwischen Robustheit und Relevanz

Nach GRS (2010) ist der Begriff „*Robustheitsdefizit*“ als Abweichung des betrachteten Endlagersystems (Entria: Referenzmodells) von einem Endlagersystem (Entria: Referenzmodell) mit „idealer“ Robustheit zu verstehen. In Anlehnung daran wird davon ausgegangen, dass ein Referenzmodell dann eine „ideale“ Robustheit aufweist, wenn alle Sicherheitsfunktionen eine – bezogen auf ihre Relevanz – angemessene Robustheit aufweisen. Sicherheitsfunktionen, die eine unverzichtbare hohe Relevanz aufweisen, müssen also auch eine entsprechend hohe Robustheit aufweisen. So gelten für Sicherheitsfunktionen mit der höchsten Relevanzstufe 5 entsprechend hohe Erwartungen an die Robustheit. Hier wäre mindestens eine angemessene Robustheit der Stufe 4 (hoch) zu erwarten. Gleiches gilt für Sicherheitsfunktionen mit geringer Relevanzeinstufung.

Man könnte nun einwenden, dass Sicherheitsfunktionen mit hoher Relevanz eine **geplante** hohe Robustheit aufweisen müssen und insofern die Sicherheit gewährleistet ist. Robustheitsdefizite wären dann nicht zu erwarten. Das Problem besteht jedoch darin, dass die geplante hohe Robustheit nicht in jedem Fall erreicht werden kann, weil die Einwirkungen von inneren und äußeren Szenarien auf die Sicherheitsfunktionen in vielen Fällen nicht sicher prognostiziert werden können. Hinzu treten sonstige Ungewissheiten, die auf Parameterebene nicht immer in erforderlichem Maße reduziert werden können. Defizite in der Nachweisrobustheit spiegeln in gewissem Maße also Ungewissheiten wider.

In diesem fünften Schritt werden mögliche **Robustheitsdefizite** für die einzelnen **Sicherheitsfunktionen** identifiziert, indem die Ergebnisse der Schritte 3 (s. Kap. 6.2.3) und 4 (s. Kap. 6.2.4) zusammengeführt werden. **Dazu wird die Robustheit einer Sicherheitsfunktion mit ihrer Relevanz in Beziehung gesetzt.** Dies geschieht mit Hilfe von Tab. 8, bei der die ordinale Rangzahl der Robustheit einer jeden Sicherheitsfunktion ins Verhältnis zu der zugeordneten ordinalen Rangzahl der Relevanz ermittelt wird. Von Interesse sind die rötlichen Felder und Zahlen, da sie auf Robustheitsdefizite hinweisen, weil der ordinale Klassenunterschied zwischen Robustheit und Relevanz dort zwei oder mehr beträgt.

Diese „Differenz“ darf nicht als rechnerische Differenz aufgefasst werden, sondern sie stellt die ordinalen Klassenunterschiede dar. Wenn in der Beziehung zwischen den beiden ordinalen Größen Robustheit und Relevanz ein Unterschied von zwei oder mehr Ordinalklassen ersichtlich ist (Bewertungsziffer $Ro/Re - 2$ und kleiner), dann ist dies ein Indiz für ein Robustheitsdefizit (GRS 2010). Oder anders ausgedrückt: Wenn eine Robustheitseinstufung um zwei oder mehr Ordinalklassen geringer ausfällt als die entsprechende Relevanzeinstufung der Sicherheitsfunktion, be-

steht ein mögliches Robustheitsdefizit. Bei Bewertungen, die um eine oder keine Ordinalklasse differieren (Bewertungsziffer Ro/Re -1 oder 0), ist nach GRS (2010) kein Robustheitsdefizit erkennbar, weil dieser geringe Klassenunterschied der Ungenauigkeit des Verfahrens geschuldet sein kann. Dies gilt auch für alle Fälle, wo die Robustheit die Relevanz übersteigt (s. weiße Felder in Tab. 8).

Allerdings ist darauf zu achten, dass Robustheitseinstufungen, die höher sind als die Relevanzeinstufungen und die folglich zu positiven Bewertungsziffern führen, nicht zu einem „Robustheitsgewinn“ der Sicherheitsfunktion führen. Ein solcher „Robustheitsgewinn“ einer Sicherheitsfunktion ist unsinnig, da die ihr zugeordnete Sicherheitsanforderung nur voll erfüllt oder in bestimmten Maße nicht erfüllt werden kann. Eine Übererfüllung der Anforderung ist nicht möglich.

An dieser Stelle sei nochmals darauf hingewiesen, dass identifizierte Robustheitsdefizite nicht eine potenzielle „Genehmigungsfähigkeit“ der Referenzmodelle betreffen, sondern sich nur auf Defizite im Rahmen einer potenziellen Genehmigungsfähigkeit beziehen. Festgestellte Robustheitsdefizite können also im Vergleich der Referenzmodelle jeweils Nachteile für Modelle anzeigen, unabhängig davon, ob die potenzielle Genehmigungsfähigkeit davon betroffen ist.

Sicherheitsfunktion		Relevanz der Sicherheitsfunktion				
		Sehr hohe Relevanz (5)	Hohe Relevanz (4)	Mittlere Relevanz (3)	Geringe Relevanz (2)	Sehr geringe Relevanz (1)
Robustheit der Sicherheitsfunktion	Sehr hohe Robustheit (5)	Ro5/Re5 0	Ro5/Re4 +1	Ro5/Re3 +2	Ro5/Re2 +3	Ro5/Re1 +4
	Hohe R. (4)	Ro4/Re5 -1	Ro4/Re4 0	Ro4/Re3 +1	Ro4/Re2 +2	Ro4/Re1 +3
	Mittlere R. (3)	Ro3/Re5 -2	Ro3/Re4 -1	Ro3/Re3 0	Ro3/Re2 +1	Ro3/Re1 +2
	Geringe R. (2)	Ro2/Re5 -3	Ro2/Re4 -2	Ro2/Re3 -1	Ro2/Re2 0	Ro2/Re1 +1
	Sehr geringe R. (1)	Ro1/Re5 -4	Ro1/Re4 -3	Ro1/Re3 -2	Ro1/Re2 -1	Ro1/Re1 0

Tab.: 8: Schema zur Ableitung von Robustheitsdefiziten (violette Felder, rote Nummern) von Sicherheitsfunktionen aus Robustheit und Relevanz. Das Verhältnis des ordinalen Robustheitswertes zu dem ordinalen Relevanzwert einer Sicherheitsfunktion ist entscheidend. (Quelle: GRS 2010, verändert). Ab einer ordinalen Klassendifferenz von ≤ -2 liegt ein mögliches Robustheitsdefizit vor.

Ergebnis von Schritt 5

Ergebnis ist die Identifizierung von Robustheitsdefiziten einzelner Sicherheitsfunktionen für die untersuchten Referenzmodelle. Festgestellte Robustheitsdefizite deuten auf mögliche Schwachpunkte der Referenzmodelle hin.

Erst die Ergebnisanalyse (s. Kap. 6.2.6) und die Gesamtbewertung der Referenzmodelle können immanente Schwächen der Referenzmodelle offen legen.

Ermittlung der Robustheitsdefizite:

Die möglichen Robustheitsdefizite der rückhaltenden Sicherheitsfunktionen als Ergebnis des ordinalen Verhältnisses zwischen Robustheit und Relevanz werden in tabellarischer Form dargestellt

(s. Tab. 9 bis 18). Sie beruhen auf der oben beschriebenen Vorgehensweise unter Anwendung von Tabelle 8. Die Robustheitsdefizite der Tiefenlager werden differenziert nach dem jeweiligen Wirtsgestein und den verschiedenen Wirkzeiträumen bewertet.

Robustheitsdefizite Komponente ABFALLBEHÄLTER: Lagerung in Steinsalz

Systemkomponente ABFALLBEHÄLTER Lagerung in Salz	Robustheit d. Si- cherheitsfunktion Salz (steile u. fla- che Lagerung) TE + TM			Relevanz d. Si- cherheitsfunktion Salz TE + TM			Robustheitsdefizite im Salz Verhältnis Robustheit zu Relevanz TE + TM		
Sicherheitsfunktionen									
Wirkzeiträume	$t < 1.00$ $0 a$	1.00 0 bis $10^4 a$	$t > 10^4$ a	$t < 1.00$ $0 a$	1.00 0 bis $10^4 a$	$t > 10^4$ a	$t < 1.000 a$	1.000 bis $10^4 a$	$t > 10^4 a$
Begren- zung/Verhinderung Lö- sungsbewegung u. RN- Transport	Ro4	n.b.	n.b.	Re5	Re1	Re1	Ro4/Re 5 -1	n.b.	n.b.
Begrenzung RN- Ausbreitung wegen Lös- lichkeitsgrenzen	Ro2	Ro2	Ro2	Re1	Re1	Re1	Ro2/Re 1 1	Ro2/Re 1 1	Ro2/Re 1 1
Verzögerte RN- Ausbreitung durch Sorp- tion am Behältermateri- al	Ro2	Ro2	Ro2	Re1	Re1	Re1	Ro2/Re 1 1	Ro2/Re 1 1	Ro2/Re 1 1

Tab. 9: Ermittlung der Robustheitsdefizite der Sicherheitsfunktionen der Komponente Abfallbehälter für die Tiefenlagertypen (TE) und (TM) in Salz (Re = Relevanz, Ro = Robustheit, Ro/Re = ordinales Verhältnis zwischen Robustheit und Relevanz; n.b. = nicht bewertet).

Ergebnis: Kein Robustheitsdefizit.

Robustheitsdefizite Komponente ABFALLBEHÄLTER: Lagerung in Tonstein

Systemkomponente ABFALLBEHÄLTER Lagerung in Tonstein	Robustheit d. Sicherheitsfunktion Tonstein			Relevanz d. Sicherheitsfunktion Tonstein			Robustheitsdefizite im Tonstein Verhältnis Robustheit zu Relevanz TE + TM		
Sicherheitsfunktionen	TE + TM			TE + TM					
Wirkzeiträume	$t < 1.000 a$	$1.000 bis 10^4 a$	$t > 10^4 a$	$t < 1.000 a$	$1.000 bis 10^4 a$	$t > 10^4 a$	$t < 1.000 a$	$1.000 bis 10^4 a$	$t > 10^4 a$
Begrenzung/Verhinderung Lösungsbewegung u. RN-Transport	Ro4	Ro3	n.b.	Re5	Re4	Re1	Ro4/Re5 -1	Ro3/Re4 -1	n.b.
Begrenzung RN-Ausbreitung wegen Löslichkeitsgrenzen	Ro2	Ro2	Ro2	Re1	Re1	Re1	Ro2/Re1 1	Ro2/Re1 1	Ro2/Re1 1
Verzögerte RN-Ausbreitung durch Sorption	Ro2	Ro2	Ro2	Re1	Re1	Re1	Ro2/Re1 1	Ro2/Re1 1	Ro2/Re1 1

Tab. 10: Ermittlung der Robustheitsdefizite der Sicherheitsfunktionen der Komponente Abfallbehälter für die Tiefenlagertypen TE und TM in Tonstein (Re = Relevanz, Ro = Robustheit, Ro/Re = ordinales Verhältnis zwischen Robustheit und Relevanz n.b. = nicht bewerte).

Ergebnis: Kein Robustheitsdefizit.

Robustheitsdefizite Komponente VERSATZ: Lagerung in Steinsalz

Systemkomponente VERSATZ Lagerung in Salz	Robustheit d. Sicherheitsfunktion Salz (steile u. flache Lagerung) TE + TM			Relevanz d. Sicherheitsfunktion Salz TE + TM			Robustheitsdefizite im Salz Verhältnis Robustheit zu Relevanz TE + TM		
Sicherheitsfunktion									
Wirkzeiträume	$t < 1.000 a$	$1.000 \text{ bis } 10^4 a$	$t > 10^4 a$	$t < 1.000 a$	$1.000 \text{ bis } 10^4 a$	$t > 10^4 a$	$t < 1.000 a$	$1.000 \text{ bis } 10^4 a$	$t > 10^4 a$
Begrenzung/Verhinderung Lösungsbewegung u. RN-Transport	Ro3	Ro3	Ro3	Re3	Re5	Re5	Ro3/Re3 0	Ro3/Re5 -2	Ro3/Re5 -2
Begrenzung RN-Ausbreitung wegen Löslichkeitsgrenzen	Ro4	Ro4	Ro4	Re2	Re2	Re2	Ro4/Re2 2	Ro4/Re2 2	Ro4/Re2 2
Verzögerte RN-Ausbreitung durch Sorption	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.

Tab. 11: Ermittlung der Robustheitsdefizite der Sicherheitsfunktionen der Komponente Versatz für die Tiefenlagertypen TE und TM bei Lagerung in Salz (Re = Relevanz, Ro = Robustheit, Ro/Re = ordinales Verhältnis zwischen Robustheit und Relevanz; n.b. = nicht bewertet).

Ergebnis: **Robustheitsdefizit** der Sicherheitsfunktion „Begrenzung/Verhinderung der Lösungsbewegung u. Radionuklidtransport“ für $t \geq 1.000 a$.

Robustheitsdefizite Komponente VERSATZ: Lagerung in Tonstein

Systemkomponente VERSATZ Lagerung in Tonstein	Robustheit d. Sicherheitsfunktion Tonstein			Relevanz d. Sicherheitsfunktion Tonstein			Robustheitsdefizite im Tonstein Verhältnis Robustheit zu Relevanz TE + TM		
Sicherheitsfunktion	TE + TM			TE + TM			TE + TM		
Wirkzeiträume	$t < 1.000 a$	$1.000 \text{ bis } 10^4 a$	$t > 10^4 a$	$t < 1.000 a$	$1.000 \text{ bis } 10^4 a$	$t > 10^4 a$	$t < 1.000 a$	$1.000 \text{ bis } 10^4 a$	$t > 10^4 a$
Begrenzung/Verhinderung Lösungsbewegung u. RN-Transport	Ro3	Ro4	Ro4	Re3	Re4	Re5	Ro3/Re3 0	Ro4/Re4 0	Ro4/Re5 -1
Begrenzung RN-Ausbreitung wegen Löslichkeitsgrenzen	Ro4	Ro4	Ro4	Re2	Re2	Re2	Ro4/Re2 2	Ro4/Re2 2	Ro4/Re2 2
Verzögerte RN-Ausbreitung durch Sorption	Ro4	Ro4	Ro4	Re5	Re5	Re5	Ro4/Re5 -1	Ro4/Re5 -1	Ro4/Re5 -1

Tab. 12: Ermittlung der Robustheitsdefizite der Sicherheitsfunktionen der Komponente Versatz für die Tiefenlagertypen TE und TM in Tonstein (Re = Relevanz, Ro = Robustheit, Ro/Re = ordinales Verhältnis zwischen Robustheit und Relevanz; n.b. = nicht bewertet).

Ergebnis: Kein Robustheitsdefizit.

**Robustheitsdefizite Komponente STRECKENABDICHTUNG/DÄMME: Lagerung in Stein-
salz**

Systemkomponente ABDICHTUNG/DÄMME Lagerung in Salz	Robustheit d. Sicherheitsfunktion Salz (steile u. flache Lagerung) TE + TM			Relevanz d. Sicherheitsfunktion Salz TE + TM			Robustheitsdefizite im Salz Verhältnis Robustheit zu Relevanz TE + TM		
Sicherheitsfunktion									
<i>Wirkzeiträume</i>	$t < 1.000 a$	$1.000 bis 10^4 a$	$t > 10^4 a$	$t < 1.000 a$	$1.000 bis 10^4 a$	$t > 10^4 a$	$t < 1.000 a$	$t \geq 1.000 bis 10.000 a$	$t > 10.000 a$
Begrenzung/Verhinderung Lösungsbewegung u. RN-Transport	Ro3	Ro3	Ro3	Re5	Re5	Re1	Ro3/Re5 -2	Ro3/Re5 -2	Ro3/Re1 2
Verzögerte RN-Ausbreitung durch Sorption	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.

Tab. 13: Ermittlung der Robustheitsdefizite der Sicherheitsfunktionen der Komponente Abdichtung/Dämme für die Tiefenlagertypen TE und TM bei Lagerung in Salz (Re = Relevanz, Ro = Robustheit, Ro/Re = ordinales Verhältnis zwischen Robustheit und Relevanz; n.b. = nicht bewertet).

Ergebnis: Robustheitsdefizit der Sicherheitsfunktion „Begrenzung/Verhinderung der Lösungsbewegung u. Radionuklidtransport“ für $t < 1.000 a$ bis $10.000 a$

Robustheitsdefizite Komponente STRECKENABDICHTUNG/DÄMME: Lagerung in Tonstein

Systemkomponente ABDICHTUNG/DÄMME Lagerung in Tonstein	Robustheit d. Sicherheitsfunktion Tonstein			Relevanz d. Sicherheitsfunktion Tonstein			Robustheitsdefizite im Tonstein Verhältnis Robustheit zu Relevanz TE + TM		
Sicherheitsfunktion	TE + TM			TE + TM			TE + TM		
Wirkzeiträume	$t < 1.000 a$	$1.000 \text{ bis } 10^4 a$	$t > 10^4 a$	$t < 1.000 a$	$1.000 \text{ bis } 10^4 a$	$t > 10^4 a$	$t < 1.000 a$	$1.000 \text{ bis } 10^4 a$	$t > 10^4 a$
Begrenzung/Verhinderung Lösungsbewegung u. RN-Transport	Ro4	Ro4	Ro4	Re5	Re5	Re1	Ro4/Re5 -1	Ro4/Re5 -1	Ro4/Re1 3
Verzögerte RN-Ausbreitung durch Sorption	Ro4	Ro4	Ro4	Re4	Re4	Re4	Ro4/Re4 0	Ro4/Re4 0	Ro4/Re4 0

Tab. 14: Ermittlung der Robustheitsdefizite der Sicherheitsfunktionen der Komponente Abdichtung/Dämme für die Tiefenlagertypen TE und TM bei Lagerung in Tonstein (Re = Relevanz, Ro = Robustheit, Ro/Re = ordinales Verhältnis zwischen Robustheit und Relevanz; n.b. = nicht bewertet).

Ergebnis: Kein Robustheitsdefizit der Sicherheitsfunktionen.

Robustheitsdefizite Komponente SCHACHTVERSCHLUSS: Lagerung in Steinsalz

Systemkomponente SCHACHTVER- SCHLUSS Lagerung in Salz	Robustheit d. Si- cherheitsfunktion Salz (steile u. flache Lagerung)		Relevanz d. Sicher- heitsfunktion Salz		Robustheitsdefizite im Salz Verhältnis Robustheit zu Relevanz	
Sicherheitsfunktion	TE + TM		TE + TM		TE + TM	
Wirkzeiträume	<i>t bis 10.000</i>	<i>t > 10 000 a</i>	<i>t bis 10.000 a</i>	<i>t > 10.000 a</i>	<i>t bis 10.000 a</i>	<i>T < 10.000 a</i>
Begrenzung/Ver- hinderung Lösungs- bewegung u. RN- Transport	Ro3	Ro3	Re5	Re1	Ro3/Re5 -2	Ro3/Re1 2
Verzögerte RN- Ausbreitung durch Sorption	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.

Tab. 15: Ermittlung der Robustheitsdefizite der Sicherheitsfunktionen der Komponente Schachtverschluss für die Tiefenlagertypen TE und TM bei Lagerung in Salz (Re = Relevanz, Ro = Robustheit, Ro/Re = ordinales Verhältnis zwischen Robustheit und Relevanz; n.b. = nicht bewertet).

Ergebnis: **Robustheitsdefizit** der Sicherheitsfunktion „Begrenzung/Verhinderung der Lösungsbewegung u. Radionuklidtransport“ für *t bis 10.000 a*

Robustheitsdefizite Komponente SCHACHTVERSCHLUSS: Lagerung in Tonstein

Systemkomponente SCHACHTVER- SCHLUSS Lagerung in Ton- stein	Robustheit d. Si- cherheitsfunktion Tonstein TE + TM		Relevanz d. Sicher- heitsfunktion Tonstein TE + TM		Robustheitsdefizite im Ton- stein Verhältnis Robustheit zu Relevanz TE + TM	
Sicherheitsfunktion						
Wirkzeiträume	<i>t bis 10.000</i>	<i>t > 10 000 a</i>	<i>t bis 10.000 a</i>	<i>t > 10.000 a</i>	<i>t bis 10.000 a</i>	<i>T < 10.000 a</i>
Begrenzung/Ver- hinderung Lösungs- bewegung u. RN- Transport	Ro4	Ro4	Re5	Re1	Ro4/Re5 -1	Ro4/Re1 3
Verzögerte RN- Ausbreitung durch Sorption	Ro4	Ro4	Re4	Re3	0	Ro4/Re3 1

Tab. 16: Ermittlung der Robustheitsdefizite der Sicherheitsfunktionen der Komponente Schachtverschluss für die Tiefenlagertypen TE und TM bei Lagerung in Tonstein (Re = Relevanz, Ro = Robustheit, Ro/Re = ordinales Verhältnis zwischen Robustheit und Relevanz; n.b. = nicht bewertet).

Ergebnis: Kein Robustheitsdefizit

Robustheitsdefizite Komponente ewG: Lagerung in Steinsalz

Systemkomponente ewG Lagerung in Salz	Robustheit d. Sicherheitsfunktion Salz (steile u. flache Lagerung) TE + TM		Relevanz d. Sicherheitsfunktion Salz TE + TM		Robustheitsdefizite im Salz Verhältnis Robustheit zu Relevanz TE + TM	
Sicherheitsfunktion						
Wirkzeiträume	<i>t</i> bis 10.000	<i>t</i> > 10 000 a	<i>t</i> bis 10.000 a	<i>t</i> > 10.000 a	<i>t</i> bis 10.000 a	<i>T</i> < 10.000 a
Begrenzung/Verhinderung Lösungsbewegung u. RN-Transport	Ro4	Ro4 (steile Lagerung) Ro5 (flache Lagerung)	Re5	Re5	Ro4/Re5 -1	Ro4/Re5 (steile L.) -1 Ro5/Re5 (flache L.) 0
Verzögerte RN-Ausbreitung durch Sorption	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.

Tab. 17: Ermittlung der Robustheitsdefizite der Sicherheitsfunktionen der Komponente ewG für die Tiefenlagertypen TE und TM bei Lagerung in Salz (Re = Relevanz, Ro = Robustheit, Ro/Re = ordinales Verhältnis zwischen Robustheit und Relevanz; n.b. = nicht bewertet).

Ergebnis: Kein Robustheitsdefizit.

Robustheitsdefizite Komponente ewG: Lagerung in Tonstein

Systemkomponente ewG Lagerung in Ton- stein	Robustheit d. Si- cherheitsfunktion Tonstein TE + TM		Relevanz d. Sicher- heitsfunktion Tonstein TE + TM		Robustheitsdefizite im Ton- stein Verhältnis Robustheit zu Relevanz TE + TM	
Sicherheitsfunktion						
Wirkzeiträume	<i>t bis 10.000</i>	<i>t > 10 000 a</i>	<i>t bis 10.000 a</i>	<i>t > 10.000 a</i>	<i>t bis 10.000 a</i>	<i>t > 10.000 a</i>
Begrenzung/Ver- hinderung Lösungs- bewegung u. RN- Transport	Ro4	Ro3	Re5	Re5	Ro4/Re5 -1	Ro3/Re5 -2
Verzögerte RN- Ausbreitung durch Sorption	Ro5	Ro4	Re5	Re5	Ro5/Re5 0	Ro4/Re5 -1

Tab. 18: Ermittlung der Robustheitsdefizite der Sicherheitsfunktionen der Komponente ewG für die Tiefenlagertypen TE und TM bei Lagerung in Tonstein (Re = Relevanz, Ro = Robustheit, Ro/Re = ordinales Verhältnis zwischen Robustheit und Relevanz; n.b. = nicht bewertet).

*Ergebnis: **Robustheitsdefizit** der Sicherheitsfunktion „Begrenzung /Verhinderung der Lösungsbewegung u. Radionuklidtransport“ für $t > 10.000 a$*

6.2.6 Schritt 6: Ergebnisanalyse und Schlussfolgerungen

Dieser letzte Arbeitsschritt interpretiert die gewonnen Ergebnisse, erarbeitet Vorschläge zur Behebung von Robustheitsdefiziten und zieht Schlussfolgerungen für den Vergleich der Referenzmodelle zur Tiefenlagerung. Wegen seines Umfangs wird Schritt 6 in einem speziellen Kapitel (s. Kap. 7) behandelt.

7 Ergebnisanalyse: Schlussfolgerungen aus den ermittelten Robustheitsdefiziten der Referenzmodelle der Tiefenlagerung

Allgemeines

Im Laufe der Bearbeitung stellte sich heraus, dass auf Grundlage der generischen Referenzmodelle, insbesondere wegen ihres fehlenden Standortbezuges, eine direkte Bewertung der Robustheitsdefizite von Endlager (TE) und Tiefenlager mit Monitoring und der Möglichkeit zur Rückholung (TM) in dem ursprünglich angestrebten Umfang nicht möglich ist.

Es zeigte sich aber, dass die den beiden Lagertypen zugrunde liegenden Sicherheitskonzepte für beide Wirtsgesteinstypen (Salzgestein, steil und flach lagernd; Tonstein) mit Blick auf die Langzeitsicherheit auf der Betrachtungsebene quasi gleich sind. Daraus ergab sich die Möglichkeit, beide generischen Referenzmodelle TE und TM in die in Frage kommenden Wirtsgesteinstypen einzubinden und mit Blick auf mögliche Robustheitsdefizite zu bearbeiten. An Stelle fehlender standortspezifischer Daten wurden die charakteristischen Eigenschaften der Wirtsgesteinstypen benutzt. In einigen Fällen (externe Auswirkungen auf den ewG, speziell Kaltzeiten mit Eisüberfahung und tiefer Rinnenbildung) konnten spezifische regionale Annahmen getroffen werden.

Diese Vorgehensweise führt bei der Ermittlung von Robustheitsdefiziten zwangsläufig zu einer Art „generischer Ergebnisse“, die hinsichtlich denkbarer Schwachpunkte einzelner Sicherheitsfunktionen der Wirtsgesteine als beispielhaft betrachtet werden sollten.

Welche Robustheitsdefizite liegen vor?

Es wurden die Robustheitsdefizite (1) bis (4) identifiziert:

- **(1)** Bei der Komponente **Versatz** im **Salzgestein** für die Sicherheitsfunktion „*Begrenzung/Verhinderung von Lösungsbewegung und Radionuklidtransport*“ für den Zeitraum ab 1.000 Jahren bis zum Ende des Nachweiszeitraumes von 1 Mio. Jahre. Das ist genau der Zeitraum, für den der Versatz die ihm zugedachte Sicherheitsfunktion erfüllen muss.
- **(2)** Bei der Komponente **Streckenabdichtung/Dämme** im **Salzgestein** für die Sicherheitsfunktion „*Begrenzung/Verhinderung von Lösungsbewegung und Radionuklidtransport*“ für den Zeitraum $t < 1.000$ Jahren bis zu 10.000 Jahren. Das ist genau der Zeitraum, für den

Streckenabdichtungen/Dämme ihre Funktion als schnellwirkender Verschluss gemäß Sicherheitskonzept erfüllen müssen.

- **(3)** Bei der Komponente **Schachtverschluss** im **Salzgestein** für die Sicherheitsfunktion „*Begrenzung/Verhinderung von Lösungsbewegung und Radionuklidtransport*“ für den Zeitraum $t < 1.000$ Jahren bis zu 10.000 Jahren. Das ist genau der Zeitraum, für den der Schachtverschluss seine Funktion als schnellwirkender Verschluss gemäß Sicherheitskonzept erfüllen muss.
- **(4)** Bei der Komponente **einschlusswirksamer Gebirgsbereich (ewG)** im **Tonstein** für die Sicherheitsfunktion „*Begrenzung/Verhinderung von Lösungsbewegung und Radionuklidtransport*“ für den Zeitraum ab 10.000 Jahren bis zum Ende des Nachweiszeitraumes von 1 Mio. Jahre. Für diesen Zeitraum besitzt der ewG höchste Relevanz, denn ab ca. 10.000 Jahren muss man vom Funktionsverlust der schnellwirkenden Barrieren ausgehen.

Wo liegen die Ursachen der Robustheitsdefizite?

Die Ursachen der **Robustheitsdefizite bei (1) und (3)** haben einen gemeinsamen Grund. Es handelt sich hierbei um die derzeit immer noch vorhandene Ungewissheit darüber, ob die Kompaktion von Salzgrus bei sehr kleinen Porositäten tatsächlich zu Eigenschaften führt, die denen des „gewachsenen“ Steinsalzes gleich oder zumindest so nahe kommen, dass die erforderliche Isolation der Schadstoffe gewährleistet ist.

Man muss folgendes bedenken: Das heutige Sicherheitskonzept für das Wirtsgestein Salz beruht ganz wesentlich auf der ausreichenden Kompaktion des Salzgrusversatzes, mit dem die Zuwegungen in den und innerhalb des ewG verschlossen werden müssen. Fällt dies weg oder kann der Nachweis nicht erbracht werden, dann wird das Sicherheitskonzept obsolet. Dies betrifft insbesondere den Strecken- und sonstigen Hohlraumversatz unter (1).

Die Ursache des **Robustheitsdefizites bei (3)** liegt ebenfalls in dem derzeit unzureichenden Kenntnisstand über die Kompaktion des Abdichtelementes Salzgrus im Schachtverschluss. Dieses Robustheitsdefizit bezieht sich allerdings nur auf das Dichtelement Salz, und nur dieses ist hier bewertet worden. In der Realität werden aber redundante und diversitäre Dichtungen beim Schachtverschluss zum Einsatz kommen. Es gibt eine Vielfalt entsprechender Vorschläge, die im-

mer standortspezifisch sein müssen. Wegen des fehlenden Standortbezuges konnte dies nicht berücksichtigt werden. Die Ursache des Robustheitsdefizits beim Abdichtelement Salz darf also nicht gleichgesetzt werden mit einem eventuellen nicht vorhandenen Robustheitsdefizit eines gesamten Schachtverschlusses.

Das **Robustheitsdefizit (2)** ergibt sich aus den Eigenschaften von Salzbeton, der für Streckenabdichtungen benutzt wird. Bei ihm tauchen zwei Probleme auf: Zum einen die thermisch induzierte Rissbildung während des Hydratationsprozesses, zum zweiten mögliche chemische Lösungseinkwirkungen, die zur Salzkorrosion führen können. Für beide Probleme liegen derzeit noch keine abgesicherten Lösungen bereit.

Das **Robustheitsdefizit (4)** ist zurückzuführen auf den (angenommenen) Standort des Referenzmodells (TE oder TM) in Norddeutschland in einem Bereich, in dem Eisüberfahrungen mit tiefer Rinnenbildung nicht auszuschließen sind. Für den betroffenen Tonsteinstandort kann dies zu einem schwerwiegenden Problem für den ewG führen, wenn es zu einer tiefen Rinnenbildung kommt und gleichzeitig das TE oder TM nicht genügend Teufe aufweisen. Hier tritt das klassische Zielproblem auf zwischen dem aus Sicherheitsgründen möglichst tief liegenden TE bzw. TM einerseits und andererseits zwischen der Beherrschbarkeit eines tiefliegenden TL in Tonstein. Bei einem TM in Tonstein stellt sich das Problem wegen der längeren Offenhaltungszeit noch schärfer. Dieses Dilemma gilt prinzipiell auch für Salzgestein, stellt sich in der Realität aber nicht in der Schärfe wie bei Tonstein, weil Salz selbst in größeren Teufen ohne Ausbau noch beherrschbar ist.

Welcher Art sind die mit den Robustheitsdefiziten verbundenen Ungewissheiten?

Die Robustheitsdefizite (1) und (3) beruhen auf Ungewissheiten, die mit der Kompaktion von Salzgrus zusammenhängen. Es sind im Sinne von Eckhardt & Rippe (2016) „*bekannte Bekannte*“, d.h. es sind Informationen darüber verfügbar und der vorhandene Informationsstand wird auch benutzt. Daraus ergibt sich ein nicht quantifizierbares, aber beschreibbares Risiko, das von der entsprechenden Komponente Versatz derzeit ausgeht. Dieses Risiko ist nicht vernachlässigbar. Sofern es nicht gelingt, den Nachweis einer ausreichenden Kompaktion zu erbringen, besteht ein hohes Risiko für das Versagen des Isolationsvermögens bei TE bzw. TM.

Dieses epistemische Risiko greift also von der Komponente Versatz über die entsprechende Sicherheitsfunktion auf das dem TE und TM zugrundeliegende Sicherheitskonzept in Salz über und kann dieses wegen der zentralen Bedeutung des Versatzes zu Fall bringen.

Das Robustheitsdefizit (2) ist ebenfalls der Kategorie „*bekannte Bekannte*“ zuzuordnen, ist aber nicht von solch zentraler Bedeutung für das Sicherheitskonzept für TE und TM in Salz. Vor allem bezieht sich dieses Robustheitsdefizit nur auf eines von mehreren geplanten Dichteelementen, und man kann gegebenenfalls auch auf dieses Element verzichten bzw. es durch ein anderes Material ersetzen, wenn die Frage der Kompaktion von Salzgrus nicht gelöst werden sollte.

Das Robustheitsdefizit (4) ist von anderer Qualität als die drei Vorhergehenden. Es handelt sich hierbei um zukünftige Vorgänge (Eisüberfahung mit tiefer Rinnenbildung), die mit einer gewissen (aleatorischen) Wahrscheinlichkeit eintreten werden und gegebenenfalls das Isolationsvermögen des TE- oder TM-Systems beeinträchtigen können. Dem Aktualitätsprinzip zufolge darf man annehmen, dass in der Zukunft in bestimmten Gebieten entsprechende Vorgänge stattfinden werden, weil sie nachweislich in der Vergangenheit dort stattgefunden haben. Diese Vorgänge kann man nicht verhindern, man kann ihnen nur räumlich aus dem Wege gehen (anderer Standort und/oder größere Tiefenlage).

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Robustheitsdefizite (1) bis (3) Wissenslücken zum Vorschein bringen. Diese Wissenslücken müssen geschlossen werden. Wenn dies beispielweise für die Kompaktion des Salzgrusversatzes gelingen sollte, dann würde das entsprechende Robustheitsdefizit wegfallen. Damit wäre ein gehöriger Schritt in Richtung eines validen Nachweiskonzeptes getan.

Bei Robustheitsdefizit (4) geht es nicht um das Schließen von Wissenslücken, sondern um rationales Handeln vor dem Hintergrund zukünftiger wahrscheinlich stattfindender Vorgänge im Bereich bestimmter Gebiete in Norddeutschland mit potenziell geeigneten Tonvorkommen. Hierzu kann das für Deutschland vorgesehene neue Standortauswahlverfahren einen gewichtigen Beitrag liefern.

Wie geht man mit Robustheitsdefiziten um?

Soweit die Robustheitsdefizite auf unzureichender Kenntnislage zu sicherheitsrelevanten Prozessabläufen beruhen - wie die Defizite (1) bis (3) - dann besteht der erste Schritt darin, die Kenntnislücken zu schließen. Da diese Kenntnislücken auch Vorgänge umfassen, die in der weiteren Zukunft liegen, ist diese Aufgabe nicht unbedingt trivial zu lösen (z.B. wie weist man eine ausreichende Salzgruskompaktion mit den geforderten hydraulischen Eigenschaften nach, die vielleicht erst nach einigen hundert Jahren erreicht werden?).

Ein weiterer Ansatz wäre, die Komponenten Streckenabdichtung/Dämme oder die Dichtelemente der Schachtverschlüsse auf die umgebenden Standorteigenschaften zu optimieren und/oder mit alternativen Baustoffen zu arbeiten.

Kann oder will man die Kenntnislücken nicht schließen, dann bleiben die mit den Robustheitsdefiziten identifizierten Schwachstellen bestehen. Sie beziehen sich einerseits auf die Wirtsgesteine Salz und Tonstein, andererseits hängen sie aber auch vom Sicherheitskonzept des TE bzw. des TM ab, denn dieses gibt die Relevanz der einzelnen Systemkomponenten vor und stellt zugleich die Verbindung zum Wirtsgestein dar.

Als ersten Schritt zur Lösung könnte man also auf ein Wirtsgestein mit nicht lösbaren Robustheitsdefiziten verzichten und sich auf ein anderes konzentrieren, das geringere Probleme mit sich bringt (sofern das der Fall sein sollte).

Will man diesen Weg nicht gehen oder ist er versperrt, verbleibt die Möglichkeit, das Sicherheitskonzept von Salz bzw. Tonstein für die Tiefenlager zu verändern. Dabei könnte man beispielsweise die zeitabhängige Relevanz der einzelnen Komponenten verändern oder andere Komponenten zu einem völlig neuen Sicherheitskonzept vereinen. Es wäre aber nicht akzeptabel, die Anforderungen an eine Sicherheitsfunktion mit einem Robustheitsdefizit abzuschwächen, ohne einen nachweisbaren Ersatz durch eine andere (neue) Sicherheitsfunktion zu ermöglichen.

Die im Robustheitsdefizit (4) zu Tage tretende Standortabhängigkeit des Tonsteins kann nur durch die Auswahl eines Standortes gelöst werden, bei dem das Problem der tiefen Rinnenbildung mit Eisüberfahung nicht auftritt.

Was bedeuten die Ergebnisse für die Bewertung der Referenzmodelle?

Die identifizierten Robustheitsdefizite beziehen sich auf die generischen Referenzmodelle der Tiefenlager TE und TM, denen ein gemeinsames Sicherheitskonzept mit bestimmten Komponenten/Sicherheitsfunktionen zugrunde liegt, die in ihrer zeitabhängigen Wirksamkeit aufeinander abgestimmt sind. Dieses Sicherheitskonzept gilt für beide betrachteten Wirtsgesteinstypen. Die Ermittlung der Robustheitsdefizite zeigt den starken Einfluss der Wirtsgesteine in Verbindung mit dem Sicherheitskonzept auf.

Vor- oder Nachteile des Referenzmodelles TE gegenüber dem Referenzmodell TM ergeben sich durch die Ermittlung der Robustheitsdefizite für die Langzeitsicherheit nicht. Das gilt sowohl für Lagerung in Salz als auch in Tonstein. Der Grund dafür liegt im Wesen der Langzeitsicherheit, die

über extrem lange Zeiträume Sicherheit gewährleisten soll. Vor diesen langen Zeiträumen erscheinen Maßnahmen zu Monitoring und Rückholung bei TM, die maximal einige wenige Jahrhunderte dauern, von sehr geringer Bedeutung. Dies gilt jedenfalls dann, wenn das Tiefenlager gut ausgewählt worden ist und man während des Monitoringzeitraums Maßnahmen vermeidet, die Auswirkungen auf die langzeitwirksamen Sicherheitsfunktionen haben. Im Übrigen besteht das eigentliche Hauptziel des TM ja genau darin, in ein dem berechneten Systemverhalten entsprechendes Endlager überzugehen.

Die Ermittlung einer höheren Zahl von Robustheitsdefiziten für Lagerung in Salz gegenüber der in Tonstein zeigt zwar auf Schwachstellen hin, ist aber für den Vergleich von TE und TM auf der gewählten generischen Ebene nicht von Bedeutung. Löst man das Problem der Salzgruskomaktion und spezifische Probleme des Salzbetons, dann sind wesentliche Robustheitsdefizite gelöst. Das gleiche gilt für Tonstein: Findet man einen guten Standort außerhalb der Region mit tiefer Rinnenbildung, dann kann man ein schwerwiegendes Robustheitsdefizit des ewG vermeiden.

Wie die Ermittlung der Robustheitsdefizite und die damit zusammenhängenden Überlegungen zeigen, ist auch die Bewertung von TE bzw. TM sehr stark standortabhängig. An einem schlecht ausgewählten Standort ist weder ein TE noch ein TM risikominimiert zu realisieren, und umgekehrt gilt das Gleiche: Sowohl ein TE als auch ein TM kann nur an einem gut ausgewählten Standort optimal umgesetzt werden („Endlagerstandort mit bestmöglicher Sicherheit“ nach EL-Kommission 2016 bzw. „Standort mit der bestmöglichen Sicherheit“ nach StandAG , §1 Abs. 2, Satz 2).

Dass dabei die immanenten Nachteile eines TM gegenüber einem TE auch bei der Bewertung berücksichtigt werden müssen, sollte selbstverständlich sein. Dazu gehören beispielsweise die nach Ende der Einlagerungsphase längere Offenhaltung des Tiefenlagers während der Monitoringphase, die stärkere Durchörterung des Wirtsgesteins und des ewG (z.B. zweite Sohle, viele Monitoringbohrungen), Fragen der Proliferation/Safeguards usw. Wie bereits angesprochen (s.o.), spielen diese Aspekte mit Blick auf den sehr langen Nachweiszeitraum keine besondere Rolle, stellen aber während des Monitoringzeitraums ein spezielles Risiko dar. Dies gilt nicht zuletzt mit Blick auf die Entwicklung der menschlichen Gesellschaft und ihrer Handlungsmöglichkeiten (Eckhardt 2017).

Die Entscheidung, ob ein TE oder ein TM „sicherer“ oder „besser“ ist, wird nicht alleine naturwissenschaftlich-technisch entschieden (Blick auf die Sicherheit). Es werden dabei auch übergreifende gesellschaftliche Aspekte von Bedeutung sein.

8 Quellen

Appel, D. & Kreusch, J. (2009): Grundlagen der Methodik und Anforderungen bei der vergleichenden Bewertung von Endlagern in verschiedenen geologischen Situationen.- Endbericht für UA 2742 des Projektes VerSi für GRS Köln, Juni 2009, Hannover.

Bericht A (2016): Beschreibung der methodischen Vorgehensweise und der Randbedingungen bei der vergleichenden Bewertung von Referenzmodellen mit Hilfe von Sicherheitsfunktionen und Robustheitsdefiziten.- Interner Arbeitsbericht Entria, Autoren: Kreusch J. & Neumann W., intac-GmbH, Stand Juli 2016, Hannover.

Bericht C (2016): Identifizierung beispielhafter Szenarien äußerer Einwirkungen auf die Referenzmodelle im Rahmen ihrer vergleichenden Bewertung mit Hilfe von Sicherheitsfunktionen und Robustheitsdefiziten.- Interner Arbeitsbericht Entria, Autoren: Kreusch J. & Neumann W., intac-GmbH, Stand August 2016, Hannover.

Driftmann, Ch. (2017): Das Endlagerkonzept des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs – eine interdisziplinäre Betrachtung.- Braunschweigische Rechtswissenschaftliche Studien, 180 S.,- Berliner Wissenschafts Verlag.

BMU (2010): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle.- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.- Stand 30. September 2010.

Eckhardt, A. (2017): Vergleichende Risikobewertung von Entsorgungsoptionen für hoch radioaktive Abfälle.- Entria-Arbeitsbericht.

Eckhardt, A. & Rippe, K.P. (2016): Risiko und Ungewissheit bei der Entsorgung hochradioaktiver Abfälle,- 179 S., vdf-Verlag Zürich, 2016.

EL-Kommission (2016): Abschlussbericht der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe, Abschlussbericht (Vorabfassung).- KDrs 268, 04.17.2016, Berlin.

ENTRIA-AB-01 (2015): Entria Arbeitsbericht 01 - Darstellung von Entsorgungsoptionen. Transversalprojekt Interdisziplinäre Risikoforschung.- Bearbeiter: Appel, D., Kreusch, J & Neumann, W.; Hannover, 2015.

- ENTRIA-AB-03 (2015): ENTRIA-Arbeitsbericht-03 „Generische Tiefenlagermodelle mit Option zur Rückholung der radioaktiven Reststoffe: Geologische und Geotechnische Aspekte für die Auslegung“.- Bearbeiter: Stahlmann, J., Leon-Vargas, R., Mintzlaff, V.; Braunschweig, 2015.
- ENTRIA-PROT (2016a): Protokoll des Abstimmungstreffens Sicherheitskonzepte End/Tiefenlager.- 23.03.2016, TU Braunschweig.
- ENTRIA-PROT (2016b): Protokoll des Abstimmungstreffens zum Sicherheitskonzept der Langzeit-zwischenlagerung.- 20.04.2016, TU Braunschweig.
- ENTRIA-PROT (2015): Ergebnisprotokoll der Abstimmung der ENTRIA-Referenzmodelle im iBMB an der TU Braunschweig, 23.06.2015.
- ESK – Entsorgungskommission (2016): Endlagerforschung in Deutschland – Anmerkungen zu Forschungsinhalten und Forschungssteuerung.- Empfehlung der ESK v. 12. Mai 2016.
- ESK – Entsorgungskommission (2013): Empfehlung der Entsorgungskommission: Leitlinien für die trockene Zwischenlagerung bestrahlter Brennelemente und Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle in Behältern.- Revidierte Fassung vom 10.06.2013
- Fischer-Appelt (2014): Vergleich von Endlagersystemen in unterschiedlichen Wirtsgesteinsformationen – Das Vorhaben VerSi.- Vortrag im Endlagerausschuss der Entsorgungskommission, 20. Oktober 2014, Bonn.
- GRS - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH (2014): Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein. Sicherheitskonzept und Nachweisstrategie.- Bericht GRS – 338, Autoren: Rübel, A. & Meleschyn, A., 33 S., Köln/Braunschweig.
- GRS - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH (2013): Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben – Synthesebericht.- Bericht zum Arbeitspaket 13, Bericht GRS-290, Autoren: Fischer-Appelt, K., Baltes, B., Buhmann, D., Larue, J., Mönig, J., März 2013, Köln.
- GRS – Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH (2010): Abwägungsmethodik für den Vergleich von Endlagersystemen in unterschiedlichen Wirtsgesteinsformationen. Anleitung zur Anwendung der Abwägungsmethodik.- Abschlussbericht zum Vorhaben 3607R02589 „Evaluierung der Vorgehensweise“; Bericht GRS – A – 3536; Autoren: Fischer-Appelt, K. & Baltes, B., Dezember 2010, Köln.

- GRS – Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH (2008): Synoptischer Sachstandsbericht Endlagersysteme Tonstein/Steinsalz.- Zwischenbericht zum VerSi-Teilvorhaben SR 2589 „Evaluierung“; Autor: Fischer-Appelt, K., Dezember 2008, Köln.
- Hand, D. J. (2014): The Improbability Principle. Why Concurrences, Miracles, and Rare Events Happen Every Day.- Scientific American, Farrar, Straus & Giroux, New York.
- Lux, K.H., Wolters, R., Zhao, J, Rutenberg, M, Feierabend, J., Pan, T. (2017): TH2M-basierte multiphysikalische Modellierung und Simulation von Referenz-Endlagersystemen im Salinar- und Tonsteingebirge ohne bzw. mit Implementierung einer Möglichkeit für ein direktes Monitoring des längerfristigen Systemverhaltens auch noch nach Verschluss der Einlagerungssohle. - Ein Beitrag zur Verbesserung der Robustheit von Sicherheitsfunktionen mit sehr hoher Relevanz im Hinblick auf die Entwicklung von Bewertungsgrundlagen zum Vergleich von Entsorgungsoptionen.- Arbeitsbericht der ENTRIA-Teilprojekte VP 5.1 und VP 5.2 sowie VP 6.7mod – Februar, Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik, TU Clausthal, Stand Februar.
- Nagra (2008): Begründung der Abfallzuteilung, der Barrierensysteme und der Anforderungen an die Geologie. Bericht zur Sicherheit und Machbarkeit.- Technischer Bericht 08-05, Oktober 2008, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle,- Wettingen.
- Neumann, W. & Kreusch, J. (2017a): Vergleichende Sicherheitsbewertung für Auswirkungen von schwerwiegenden menschlichen Einwirkungen von außen (EVA) bei den ENTRIA-Referenzmodellen.- Entria-Arbeitsbericht, Oktober 2017, Hannover.
- Neumann W. & Kreusch J. (2017b): Vergleichende Risikobewertung - Qualitativer Vergleich der radiologischen Risiken während der Betriebsphase der Entsorgungsoptionen.- Entria-Arbeitsbericht, Oktober 2017, Hannover.
- Stahlmann, J. (2015): Referenzmodelle für ein Tiefenlager mit Vorkehrungen zur Rückholung.- Vortrag auf dem Abstimmungstreffen zu den Entria-Referenzmodellen am 23.06.2015 im iBMB an der TU Braunschweig
- StandAG (2017): Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz – StandAG) v. 05. Mai 2017; BGBl. I 2017 Nr. 26 S. 1074.

9 Glossar

Bergung: Ungeplantes Herausholen von radioaktiven Abfällen aus einem Endlager (Definition nach StandAG 2017) bzw. die Rückholung radioaktiver Abfälle aus dem Endlager als Notfallmaßnahme (BMU 2010).

Einschlusswirksamer Gebirgsbereich: Der ewG ist Teil des Endlagersystems, der im Zusammenwirken mit den technischen Verschlüssen (Schachtverschlüsse, Kammerabschlussbauwerke, Dammbauwerke, Versatz etc.) den Einschluss der Abfälle sicherstellt (Definition nach BMU 2010).

End- bzw. Tiefenlagersystem: Es besteht aus dem End- bzw. Tiefenlagerbergwerk, dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich und aus den diesen Gebirgsbereich umgebenden oder überlagernden geologischen Schichten bis zur Erdoberfläche, soweit sie sicherheitstechnisch bedeutsam sind und damit im Sicherheitsnachweis zu berücksichtigen sind (Definition BMU 2010).

End- bzw. Tiefenlager: Es ist Teil des End- bzw. Tiefenlagersystems. Das End- bzw. Tiefenlager umfasst das End- bzw. Tiefenlagerbergwerk, die eingelagerten radioaktiven Abfälle sowie den einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG) mit seinen technischen Verschlüssen (Definition nach GRS 2010).

Komponente: Eine Komponente ist ein wesentlicher Teil des End- bzw. Tiefenlagersystems, der eine Barrierenwirkung aufweist (z.B. Abfallbehälter, Versatz, ewG). Jeder Komponente können eine oder mehrere Sicherheitsfunktionen zugeordnet werden.

Monitoring: Ist die Überwachung von Vorgängen. Es ist ein Überbegriff für alle Arten von systematischer Erfassung (Protokollierung), Messung oder Beobachtung eines Vorgangs oder Prozesses mittels technischer Hilfsmittel oder anderer Beobachtungssysteme (Definition aus Wikipedia). Die wesentliche Funktion des Monitorings bei der Tiefenlagerung besteht darin festzustellen, ob prognostizierte Prozesse oder Verhältnisse im Lager den gewünschten Verlauf nehmen. Ansonsten kann steuernd eingegriffen werden (z.B. durch Rückholung von Abfällen).

Oberflächenlager: Lagerung der Abfallbehälter in einem Gebäude an der Erdoberfläche für einen festgelegten Zeitraum (bei Entria: ca. 200 Jahre). Die Oberflächenlagerung bedarf einer permanenten menschlichen Überwachung.

Robustheit: Die Robustheit bezeichnet die Unempfindlichkeit der Sicherheitsfunktionen des Endlagersystems gegenüber inneren und äußeren Einflüssen sowie ihre Charakterisierbarkeit und Prognostizierbarkeit im Sinne des Vertrauens in die Erfüllung der Auslegungsanforderungen (Definition nach GRS 2010).

Robustheitsdefizit: Robustheitsdefizite zeigen Schwachstellen in der Robustheit von Sicherheitsfunktionen auf. Diese Schwachstellen sind gekennzeichnet durch eine deutliche Diskrepanz zwischen der Bedeutung einer Sicherheitsfunktion (Relevanz) und ihrer Robustheit. Bezogen auf ein End- bzw. Tiefenlager lassen sich auf diese Weise bei Überprüfung wesentlicher Sicherheitsfunktionen auf ihre Robustheit mögliche Schwachstellen des Gesamtsystems feststellen.

Sicherheitsfunktion: Eine Sicherheitsfunktion ist eine Eigenschaft oder ein im Endlagersystem ablaufender Prozess, die bzw. der in einem sicherheitsbezogenem System oder Teilsystem oder bei einer Einzelkomponente die Erfüllung der sicherheitsrelevanten Anforderungen gewährleistet. Durch das Zusammenwirken solcher Funktionen wird die Erfüllung aller sicherheitstechnischen Anforderungen sowohl in der Betriebsphase als auch in der Nachverschlussphase des Endlagers gewährleistet“ (Definition nach BMU 2010).

Sicherheitsfunktionen lassen sich in zwei funktionale Untergruppen aufteilen:

(1) Radionuklidrückhaltende Sicherheitsfunktion: Sicherheitsfunktion, deren sicherheitsgerichtete Wirkungsweise hauptsächlich auf den Einschluss und/oder die Rückhaltung der Radionuklide im ewG im Verbund mit den geotechnischen Barrieren abzielt.

(2) Integritätsbewahrende Sicherheitsfunktionen: Sie dienen dem Schutz der Integrität der radionuklidrückhaltenden SF oder Barrieren gegenüber Einflüssen von innen und außen. Der von der jeweiligen integritätsbewahrenden Sicherheitsfunktion geleistete Robustheitsbeitrag wirkt sich auf die entsprechende rückhaltende Sicherheitsfunktion aus und wird deshalb bei letzterer berücksichtigt.

Tiefenlager: Anlage zur wartungsfreien, zeitlich unbefristeten und passiv sicheren Entsorgung von radioaktivem Abfall im tiefen Untergrund – mit oder ohne zeitlich begrenztem Monitoring und Möglichkeit der Rückholung der Abfälle.

10 Abkürzungsverzeichnis

ewG: Einschlusswirksamer Gebirgsbereich: Der ewG ist Teil des Endlagersystems, der im Zusammenwirken mit den technischen Verschlüssen (Schachtverschlüsse, Kammerabschlussbauwerke, Dammbauwerke, Versatz etc.) den Einschluss der Abfälle sicherstellt (Definition nach BMU 2010).

OL: Oberflächenlager: Lagerung der Abfälle Behältern in einem Gebäude an der Erdoberfläche für einen festgelegten Zeitraum (bei Entria: ca. 200 Jahre). Die Oberflächenlagerung bedarf einer permanenten menschlichen Überwachung (Monitoring).

RSF-Parameter: Charakteristische Eigenschaften rückhaltender Sicherheitsfunktionen (z.B. Permeabilität, Kd-Wert). Die Bewertung von Sicherheitsfunktionen gelingt nur mit Hilfe maßgeblicher RSF-Parameter.

SF: Sicherheitsfunktion: Eine Sicherheitsfunktion ist eine Eigenschaft oder ein im Endlagersystem ablaufender Prozess, die bzw. der in einem sicherheitsbezogenem System oder Teilsystem oder bei einer Einzelkomponente die Erfüllung der sicherheitsrelevanten Anforderungen gewährleistet. Durch das Zusammenwirken solcher Funktionen wird die Erfüllung aller sicherheitstechnischen Anforderungen sowohl in der Betriebsphase als auch in der Nachverschlussphase des Endlagers gewährleistet“ (Definition nach BMU 2010).

RSF: Radionuklidrückhaltende Sicherheitsfunktion: Sicherheitsfunktion, deren sicherheitsgerichtete Wirkungsweise hauptsächlich auf den Einschluss und/oder die Rückhaltung der Radionuklide im ewG im Verbund mit den geotechnischen Barrieren abzielt.

ISF: Integritätsbewahrende Sicherheitsfunktionen: Sie dienen dem Schutz der Integrität der radionuklidrückhaltenden SF oder Barrieren gegenüber Einflüssen von innen und außen. Der von der jeweiligen integritätsbewahrenden Sicherheitsfunktion geleistete Robustheitsbeitrag wirkt sich auf die entsprechende rückhaltende Sicherheitsfunktion aus und wird deshalb bei letzterer berücksichtigt.

TL: Tiefenlager: Anlage zur wartungsfreien, zeitlich unbefristeten und passiv sicheren Entsorgung von radioaktivem Abfall im tiefen Untergrund – mit oder ohne zeitlich begrenztem Monitoring und Möglichkeit der Rückholung der Abfälle.

TE: Tiefenlager: Tiefenlager mit schnellem Verschluss nach Einlagerung der Abfälle ohne explizite Vorkehrungen zur Überwachung und Rückholung der Abfälle (Synonym für Endlager). Eine Bergung der Abfälle muss für 500 Jahre gewährleistet sein.

TM: Tiefenlager: Tiefenlager mit Monitoring und Vorkehrungen zur Rückholung der Abfälle über die Einlagerungsphase hinaus. Eine Bergung der Abfälle muss für 500 Jahre gewährleistet sein.

Anhang A: Bestimmung der Robustheit der radionuklidrückhalten- den Sicherheitsfunktion der Komponente Abfallbehälter

<u>Inhaltsverzeichnis:</u>	Seite
A.1 Einleitung	3
A.2 Charakterisierung des Ist-Zustandes der RSF-Parameter der Komponente Behälter	4
A.2.1 Charakterisierung des Ist-Zustandes bei Lagerung in Steinsalz	4
A.2.2 Charakterisierung des Ist-Zustandes bei Lagerung in Tonstein	6
A.2.3 Zusammenfassende Bewertung der Charakterisierbarkeit der RSF-Parameter des Abfallbehälters im Ist-Zustand	8
A.3 Vertrauen in die Prognostizierbarkeit der RSF-Parameter der Abfallbehälter für verschiedene Wirkzeiträume	9
A.3.1 Vertrauen in die Prognostizierbarkeit der RSF-Parameter bei der Tiefenlagerung der Abfallbehälter in Salz	9
A.3.2 Vertrauen in die Prognostizierbarkeit bei RSF-Parameter bei der Tiefenlagerung der Abfallbehälter Tonstein	11
A.3.3 Zusammenfassende Bewertung des Vertrauens in die Prognostizierbarkeit der RSF-Parameter des Behälters	12
A.4 Bewertung der Auswirkungen interner Systementwicklungen auf die RSF-Parameter der Komponente Abfallbehälter (Systemrobustheit)	14
A.4.1 Auswirkungen von Gas und Wärme auf die Komponente Behälter bei Lagerung in Salz	14
A.4.2 Auswirkungen von Gas und Wärme auf die Komponente Behälter bei Lagerung in Tonstein	16
A.4.3 Zusammenfassende Bewertung der Auswirkungen von Gas- und Wärmeentwicklung auf die Behälter	18

	Seite
A.5	Vertrauen in die Erfüllung sicherheitskonzeptioneller Auslegungsanforderungen an den Abfallbehälter
	19
A.5.1	Vertrauen in die Erfüllung der Auslegungsanforderung an die Behälter- Standzeit bei Lagerung in Steinsalz
	20
A.5.2	Vertrauen in die Erfüllung der Auslegungsanforderung an die Behälter- Standzeit bei Lagerung in Tonstein
	21
A.5.3	Zusammenfassende Bewertung des Vertrauens in die Erfüllung sicherheits- konzeptioneller Anforderungen an den Abfallbehälter
	22
A.6	Aggregation der Einzelbewertungen zur Robustheit der Komponente Abfall- behälter für Lagerung in Salz und Tonstein
	22
A.7	Quellen zu Anhang A
	26

Verzeichnis der Tabellen

Tab. A-1:	Rückhaltende Sicherheitsfunktionen und die zugehörigen charakteristischen Parameter für die Komponente Abfallbehälter	4
Tab. A-2:	Zusammenfassung der Ergebnisse der Charakterisierung der RSF-Parameter im Ist-Zustand für den Abfallbehälter bei Endlager (TE) bzw. Tiefenlager mit Rückhol- barkeit (TM)	8
Tab. A-3:	Zusammenfassung der zeitabhängigen Ergebnisse für das Vertrauen in die Prognostizierbarkeit der RSF-Parameter für den Behälter	13
Tab. A-4:	Aggregierte Ergebnisse für die Bewertung des Vertrauens in die Prognostizier- barkeit der RSF-Parameter der Sicherheitsfunktionen des Behälters	13
Tab. A-5:	Bewertung der ausgewählten zeitabhängigen Systementwicklungen Gas (G) und Wärme (W) auf die RSF-Parameter der Komponente Abfallbehälter	18
Tab. A-6:	Aggregierte Ergebnisse für die ausgewählten Systementwicklungen Gas (G) und Wärme (W) auf die RSF-Parameter und die zugehörigen Sicherheitsfunktionen der Komponente Abfallbehälter	19
Tab A-7:	Vertrauen in die Erfüllung der Auslegungsanforderung Standzeit des Behälters	22
Tab A-8:	Zusammenfassende Bewertung der Robustheit der rückhaltenden Sicherheits- funktionen für die Komponente Behälter über alle radionuklidrückhaltenden Sicherheitsfunktionen und für unterschiedliche Wirkzeiträume	23

A.1 Einleitung

In Anhang A wird die Robustheit der radionuklidrückhaltenden Sicherheitsfunktionen der Komponente Abfallbehälter als qualitative Größe bestimmt (s. Bericht, Kap. 6.2.4). Sie dient im Zusammenspiel mit der Relevanz der entsprechenden Sicherheitsfunktionen der Identifizierung von Robustheitsdefiziten der Sicherheitsfunktionen (vgl. Bericht, Kap. 6.2.5).

Die für Entria durchgeführten generischen Betrachtungen beziehen sich auf verschiedene Abfallbehälter. Zum einen wurden POLLUX-Behälter (POLLUX-10 für abgebrannte DWR-Brennelemente) und ein als POLLUX-9 bezeichneter Endlagerbehälter für verglaste Spaltproduktlösungen (HAW-Kokillen) für die Streckenlagerung im Salz untersucht. Zudem steht der POLLUX-3 zur Tiefenlagerung in Tonstein zur Verfügung (mit geringerer Oberflächentemperatur). Weiterhin wurden die im Rahmen von Entria entwickelten ENCON-Behälter für die Streckenlagerung in den Wirtsgesteinen Salz, Tonstein und Kristallin (ENCON-S, ENCON-T und ENCON-K) mit den Brennstäben aus acht, drei bzw. fünf DWR-Brennelementen untersucht. Da diese Untersuchungen überwiegend generischen Charakter aufweisen und sich nicht gezielt auf die hier zu berücksichtigenden RSF-Parameter beziehen, werden die ENCON-Behälter nicht berücksichtigt, sondern es wird nur die Streckenlagerung mit POLLUX-Behältern für Salz und Tonstein den Betrachtungen zugrunde gelegt.

Nach GRS (2011) stellt sich die Streckenlagerung von POLLUX-Behältern im Vergleich zur Bohrlochlagerung als insgesamt einfache und robuste Einlagerungstechnik dar. Die Machbarkeit und die generelle Genehmigungsfähigkeit dieser Einlagerungstechnik wurde bereits Anfang der 1990er Jahre aufgezeigt. Die Robustheit der Streckenlagerung wird insbesondere durch eine hohe passive Sicherheit gekennzeichnet. Auch im Hinblick auf die Auswahl des Wirtsgesteins und der Forderung der Bergbarkeit stellt sich die Streckenlagerung in Behältern als die robustere Einlagerungsvariante dar. Die Streckenlagerung kann sowohl im Tonstein als auch im Salzgestein verfolgt werden.

Die Bestimmung der Robustheit der Abfallbehälter geschieht für die folgenden drei **radionuklidrückhaltende Sicherheitsfunktionen (RSF)** mit Hilfe der sie kennzeichnenden **RSF-Parameter** (s. Tab. A-1) und Tab. 1 in Bericht.

- Begrenzung/Verhinderung von Lösungszutritt zum Abfallprodukt wegen der Dichtwirkung der Behälterwandung (mit den RSF-Parametern Standzeit und Ausfallrate),
- Begrenzung der Radionuklidausbreitung wegen Löslichkeitsgrenzen (mit dem RSF-Parameter Löslichkeitsgrenze),
- Verzögerte Radionuklidausbreitung durch Sorption (mit dem RSF-Parameter Sorption).

Die Beurteilung der RSF-Parameter beschränkt sich auf die Abfallbehälter bzw. auf deren unmittelbare Umgebung. Dabei wird jede der drei Sicherheitsfunktionen mit ihren RSF-Parametern in vier **Bewertungsfelder** beurteilt:

- Die Charakterisierung des Ist-Zustandes der RSF-Parameter,
- Das Vertrauen in die Prognostizierbarkeit der RSF-Parameter,
- Die Bewertung der Auswirkungen interner Systementwicklungen auf die RSF-Parameter,
- Das Vertrauen in die Erfüllung sicherheitskonzeptioneller Auslegungsanforderungen durch die RSF-Parameter.

Abschließend werden die Einzelergebnisse verbalargumentativ aggregiert, so dass sich für jede der drei radionuklidrückhaltenden Sicherheitsfunktionen eine Aussage über ihre Robustheit ergibt. Soweit möglich und sinnvoll, werden die Robustheitsaussagen zeitlich differenziert für drei **Wirkzeiträume** ($t < 1.000$ Jahre, für $t = 1.000$ Jahre bis 10.000 Jahre und $t > 10.000$ Jahre bis 1 Mio.

Jahre) abgeleitet. Dabei ist zu beachten, dass die sicherheitsmäßige Bedeutung der Abfallbehälter, die sich aus dem Sicherheitskonzept ergibt, nur auf die ersten wenigen tausend Jahre beschränkt.

Details zur benutzten Methodik können dem Bericht (v.a. Kap. 5 u. 6) entnommen werden. Gleiches gilt für benutzte Abkürzungen und Begriffe (s. Kap. 9 u. 10 im Bericht).

Tiefenlagerkomponente (TE u. TM)	Rückhaltende Sicherheitsfunktion (RSF)	RSF-Parameter für Lagerung in Salz und Tonstein
Abfallbehälter	Begrenzung/Verzögerung d. Lösungszutritts zum Abfallprodukt u. Verzögerung der RN-Ausbreitung	Standzeit des Behälters und seine Ausfallrate
	Verzögerung d. RN-Ausbreitung durch Sorption am Behältermaterial	Sorption (Kd-Wert)
	Begrenzung/Verzögerung der RN-Ausbreitung d. Löslichkeitsgrenzen	Löslichkeitsgrenzen

Tab.: A-1: Rückhaltende Sicherheitsfunktionen und die zugehörigen charakteristischen Parametern für die Komponente Abfallbehälter

A.2 Charakterisierung des Ist-Zustandes der RSF-Parameter der Komponente Behälter

Es geht hierbei um die Überprüfung, wie verlässlich die **Charakterisierung der RSF-Parameter im Ist-Zustand** durch Untersuchungsmethoden gewährleistet werden kann. Eine hohe Aussagekraft der Untersuchungen ist notwendig, um sie auf konkrete Standortverhältnisse übertragen zu können und um die Einhaltung von Auslegungsanforderungen garantieren zu können.

A.2.1 Charakterisierung des Ist-Zustandes bei Lagerung in Steinsalz

(a) Ist Zustand: Standzeit des Behälters (Salz)

Die Behälterstandzeit wird als die Zeitspanne definiert, während der der Behälter intakt ist und eine Freisetzung von Radionukliden nicht stattfindet. Neben der Einwirkung des Gebirgsdrucks sind auch thermisch induzierte Spannungen aus dem Gebirge auf den Tiefenlagerbehälter zu beachten. Es wird heute davon ausgegangen, dass bei der Streckenlagerung von Pollux-Behältern aufgrund ihrer Abmessungen und ihrer Wandstärke isotrope und anisotrope Spannungen eine untergeordnete Rolle beim Nachweis der Integrität der Behälter spielen.

Bei den POLLUX-Behältern dient die Schweißnahtverbindung zwischen Behälterkörper und Deckel als dichte und dauerhafte Barriere. Sie ist damit bestimmend für die Ermittlung der Behälterstandzeit unter Tiefenlagerungsbedingungen im Wirtsgestein Steinsalz. Nach GRS (2010-1) ist mit experimentell ermittelten Korrosionsraten eine Abschätzung der Standzeit der Behälter möglich, die neben der Zeitspanne bis zum Versagen von Behälterkörper und Deckel auch die Schweiß-

nahtverbindung zwischen Behälterkörper und Deckel berücksichtigt. Beim Nachweis der Integrität der Behälter unter Tiefenlagerungsbedingungen werden die abdeckenden Lastfälle der außerplanmäßigen Einwirkungen ermittelt (z.B. Absturz des Behälters, Brand, Korrosion) und bei der mechanischen und thermischen Auslegung berücksichtigt.

Methoden zur auslegungsgerechten Fertigung der Behälter stehen zur Verfügung, und die Fertigung gemäß Anforderungen ist als gut einzustufen. Das Qualitätsmaß für die Behälter im Hinblick auf die Standzeit wird derzeit als hoch eingeschätzt, so dass der Integritätsnachweis für eine Standzeit von ca. 1.000 Jahren geführt werden kann.

Ergebnis: Das Vertrauen in die Charakterisierbarkeit der Standzeit des Behälters bei Lagerung in Salz ist als hoch anzusehen (Bewertungsstufe 4).

(b) Ist-Zustand: Ausfallrate des Behälters (Salz)

Beim Ausfall eines Behälters kommt es zu einer Freisetzung von gasförmigen Radionukliden, deren radiologischen Konsequenzen durch I-129 dominiert werden. Ein solcher Behälterausfall kann trotz qualifizierter Fertigungsmethoden und qualitätssichernde Maßnahmen bei der Herstellung von tausenden Behältern und ihrer Handhabung nicht vollständig verhindert werden. Der Anteil von Behältern, die nach Einlagerung initial undicht werden, wird mit 0,1% abgeschätzt (GRS, o.D. Behälter). Der Anteil undichter Behälter kann wegen der Fertigungstechniken und Qualitätsmaßnahmen gut eingeschätzt werden.

Ergebnis: Die Einstufung der Charakterisierbarkeit der Ausfallrate ist als gut zu bezeichnen (Bewertungsstufe 4).

(c) Ist-Zustand: Sorption am Behälter (Salz)

Die Sorption von Radionukliden an Korrosionsprodukten des Behälters bzw. auch in seiner unmittelbaren Umgebung ist zwar als Prozess bekannt, aber derzeit noch wenig untersucht und deshalb nicht ausreichend quantifizierbar. Muss Behälterversagen unterstellt werden, so wird davon ausgegangen, dass dies durch die Bildung kleiner Risse oder Löcher erfolgt. Hieraus wiederum ergibt sich ein kleiner Lösungszutritt zum Abfallprodukt. Es ist schwierig, die Lösungsmittelmenge oder -rate zu bestimmen, da sie durch eine Reihe von Phänomenen beeinflusst wird wie etwa die Anzahl der Penetrationen, den Druckaufbau im Innern oder durch Gasbildung als Folge der Korrosion.

Bei Zutritt von Lösung wird die Freisetzung/Rückhaltung von Radionukliden durch eine Reihe von chemischen Prozessen beeinflusst, wie etwa die Rückhaltung der Radionuklide in den Korrosionsprodukten des Brennstoffes, die Sorption durch Korrosionsprodukte der Stahlbehälter oder den Chemismus der zutretenden Lösung.

Obwohl sich diese Sorptionsprozesse unter Laborbedingungen gut nachweisen lassen, sind diese Prozesse In situ nur schwer zu quantifizieren. Im Hinblick auf die Ermittlung von Mindestgrößen für die Sorption an Behältermaterialien ist eine Einstufung der Charakterisierbarkeit nur bedingt möglich.

Ergebnis: Die Einstufung der Charakterisierbarkeit der Sorption am Behältermaterial ist als mäßig zu bezeichnen (Bewertungsstufe 3).

(d) Ist-Zustand: Einstufung der Charakterisierbarkeit der Löslichkeitsgrenzen im Bereich des Behälters (Salz)

Zur Bestimmung von Löslichkeitsgrenzen stehen für Normaltemperaturen fundierte Laborverfahren und analytische Methoden zur Verfügung. Voraussetzung dafür ist die Bestimmung des geochemischen Milieus. Für das zu erwartende hohe Temperaturniveau in der Umgebung des Tiefenlagerbehälters bei gleichzeitigem Vorkommen von Salzlösungen liegen nur wenig fundierte Kenntnisse zur Löslichkeit vor (GRS 2010-1). Die die Löslichkeitsgrenzen steuernden Prozesse und Parameter sind in dem betrachteten Bereich und unter den dort herrschenden Bedingungen in ihrem komplexen Zusammenspiel nicht ausreichend gut bekannt und wenig belastbar quantifizierbar.

Nach GRS (2010-1) liegen die Unsicherheiten vor allem in den thermodynamischen Daten sowie in den Extraktionsmethoden. Durch sinnvolle Kombination der einzelnen Extraktionsmethoden kann das Vertrauen in die gewonnenen Daten jedoch gesteigert werden. Wenn auch die Charakterisierbarkeit im Hinblick auf die „wahre“ Höhe der Löslichkeitsgrenzen für Radionuklide als eher weniger gut einzustufen ist, erlauben die Versuche jedoch mit einiger Sicherheit Aussagen hinsichtlich der maximalen Löslichkeit der Radionuklide.

Ergebnis: Die Einstufung der Charakterisierbarkeit der Löslichkeitsgrenzen in der unmittelbaren Umgebung des Behälters ist als mäßig zu bezeichnen (Bewertungsstufe 3).

A.2.2 Charakterisierung des Ist-Zustandes bei Lagerung in Tonstein

(a) Ist Zustand: Standzeit der Behälter (Tonstein)

Nach GRS (2010-1) ist die Materialforschung in der Lage, Stähle zu entwickeln, die eine ausreichend geringe Korrosionsrate gegen Porenwässer des Tonsteins aufweisen, so dass die Dichtheit in dem vorgegebenen Zeitraum von mindestens tausend Jahren durch Korrosion nicht gefährdet ist. Zudem verfügt die Industrie über hochentwickelte Fertigungstechniken, solche Behälter herzustellen. Insbesondere gilt es, die Auslegung unter den berg- und tiefenlagerspezifischen Bedingungen vorzunehmen. Besondere Herausforderungen stellen dabei die Gewährleistung der Integrität im Bereich der Schweißnähte dar. Sowohl in Deutschland für den Pollux als auch im europäischen Ausland (Schweden, Frankreich, Schweiz) für zum Pollux vergleichbare Behälter liegen umfangreiche Erfahrungen mit der Entwicklung, Auslegung und Fertigung von Tiefenlagerbehältern mit den geforderten Anforderungen vor. Die Auslegung erfolgt insbesondere gegen gebirgsmechanische Lasten, gegen Temperatureinflüsse, gegen strahlungsinduzierte Einflüsse und gegen Korrosion. Im Hinblick auf die rein mechanische Stabilität sollen die Behälter eine Standzeit von bis zu 10.000 a aufweisen.

Die Fertigung gemäß Anforderungen ist als gut einzustufen und das Qualitätsmaß für die Behälter im Hinblick auf die Standzeit wird als hoch eingeschätzt. Der Integritätsnachweis für eine Standzeit von mindestens 1000 a kann geführt werden.

Ergebnis: Das Vertrauen in die Charakterisierbarkeit der Standzeit des Behälters bei Lagerung in Tonstein ist als hoch anzusehen (Bewertungsstufe 4).

(b) Ist-Zustand: Ausfallrate des Behälters (Tonstein)

Fällt ein Behälter aus, führt dies zu einer instantanen Freisetzung gasförmiger Radionuklide in den umgebenden Versatz (v.a. I-129). Erst bei einem Lösungszutritt in den Behälter kann die Auflösung der Abfallmatrix und damit die Freisetzung nicht gasförmiger Radionuklide stattfinden.

Ein solcher Behälterausfall kann trotz qualifizierter Fertigungsmethoden und qualitätssichernde Maßnahmen bei der Herstellung von tausenden Behältern und ihrer Handhabung nicht vollständig verhindert werden. Der Anteil von Behältern, die nach Einlagerung initial undicht werden, wird mit 0,1% abgeschätzt (GRS 2010-1). Der Anteil undichter Behälter kann wegen der Fertigungstechniken und Qualitätsmaßnahmen gut eingeschätzt werden.

Ergebnis: Die Einstufung der Charakterisierbarkeit der Ausfallrate ist als gut zu bezeichnen (Bewertungsstufe 4).

(c) Ist-Zustand: Sorption am Behälter (Tonstein)

Die Sorption von Radionukliden an Korrosionsprodukten des Behälters bzw. auch in seiner unmittelbaren Umgebung ist zwar als Prozess bekannt, aber derzeit noch wenig untersucht und deshalb nicht ausreichend quantifizierbar. Muss Behälterversagen unterstellt werden, so wird davon ausgegangen, dass dies durch die Bildung kleiner Risse oder Löcher erfolgt. Hieraus wiederum ergibt sich ein kleiner Lösungszutritt zum Abfallprodukt. Es ist schwierig, die Lösungsmittelmenge oder -rate zu bestimmen, da sie durch eine Reihe von Phänomenen beeinflusst wird wie etwa die Anzahl der Penetrationen, den Druckaufbau im Innern oder durch Gasbildung als Folge der Korrosion.

Bei Zutritt von Lösung wird die Freisetzung/Rückhaltung von Radionukliden durch eine Reihe von chemischen Prozessen beeinflusst, wie etwa die Rückhaltung der Radionuklide in den Korrosionsprodukten des Brennstoffes, die Sorption durch Korrosionsprodukte der Stahlbehälter oder den Chemismus der zutretenden Lösung.

Obwohl sich diese Sorptionsprozesse unter Laborbedingungen gut nachweisen lassen, sind diese Prozesse in situ nur schwer zu quantifizieren. Im Hinblick auf eine Mindestgröße für die Sorption an Behältermaterialien ist eine Einstufung der Charakterisierbarkeit als mäßig möglich.

Ergebnis: Die Einstufung der Charakterisierbarkeit der Sorption am Behältermaterial ist als mäßig zu bezeichnen (Bewertungsstufe 3).

(d) Ist-Zustand: Einstufung der Charakterisierbarkeit der Löslichkeitsgrenzen im Bereich des Behälters (Tonstein)

Die Bestimmung von Löslichkeitsgrenzen im Bereich der Behälter unterliegt vielfältigen Einflussgrößen. So sind die Löslichkeitsgrenzen einerseits von der Konzentration der entsprechenden Substanz sowie von der Chemie des Lösungsmittels (Eh, pH) abhängig. So zeigen vierwertige Actiniden eine niedrigere Löslichkeitsgrenze im neutralen bis alkalischen als im sauren pH-Bereich. Verändert sich die Speziation von Actiniden durch Redoxprozesse, verändert sich auch seine Löslichkeitsgrenze. So nimmt die Löslichkeitsgrenze von Uran durch die Reduktion von U(VI) zu U(IV) ab. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass sich im Tiefenlager unterschiedliche hydrochemische Milieus ausbilden. In Abfallnähe wird das geochemische Milieu durch Redoxreaktionen von Fe⁰/Fe₃O₄, Fe²⁺/Fe₃O₄, Fe²⁺/Grüner Rost und H₂/H₂O bestimmt. Da sowohl die Behälterkorrosion

als auch die Prozesse an der Versatzmaterial-/Tonsteingrenze saure bis neutrale pH-Bedingungen schaffen, ist hier die Löslichkeitsgrenze der einzelnen Actiniden hoch.

Nach GRS (2010-1) liegen die Unsicherheiten vor allem in den thermodynamischen Daten sowie in den Extraktionsmethoden. Durch sinnvolle Kombination der einzelnen Extraktionsmethoden kann das Vertrauen in die gewonnenen Daten jedoch gesteigert werden. Wenn auch die Charakterisierbarkeit im Hinblick auf die „wahre“ Höhe der Löslichkeitsgrenzen für Radionuklide als eher weniger gut einzustufen ist, erlauben die Versuche jedoch mit einiger Sicherheit Aussagen hinsichtlich der maximalen Löslichkeit der Radionuklide.

Ergebnis: Die Einstufung der Charakterisierbarkeit der Löslichkeitsgrenzen in der unmittelbaren Umgebung des Behälters ist als mäßig zu bezeichnen (Bewertungsstufe 3).

A.2.3 Zusammenfassende Bewertung der Charakterisierbarkeit der RSF-Parameter des Abfallbehälters im Ist-Zustand

Für beide Wirtsgesteine ist die Charakterisierbarkeit der RSF-Kriterien „Standzeit“ und „Ausfallrate“ als hoch (Bewertungsstufe 4) zu bewerten. Die RSF-Kriterien „Sorption an Behältermaterial“ und „Löslichkeitsgrenzen“ erhalten für das Wirtsgestein Salz eine mäßige Bewertung hinsichtlich ihrer Charakterisierung (Bewertungsstufe 3). Beim Wirtsgestein Tonstein werden für Sorption und Löslichkeitsgrenzen hinsichtlich ihrer Charakterisierbarkeit ebenfalls mäßige Bewertungen ermittelt (jeweils Bewertungsstufe 3). Die Ergebnisse können Tab. A-2 entnommen werden.

Komponente Abfallbehälter	Einstufung Salz (steil u. flach)	Einstufung Tonstein	Anmerkungen
RSF-Parameter	TE + TM	TE + TM	
Standzeit Behälter	4	4	Keine Differenzierung zwischen Salz (flach u. steil) möglich;
Ausfallrate Behälter	4	4	
Sorption	3	3	Keine Differenzierung zwischen TE und TM möglich Keine Differenzierung nach Wirkzeiträumen möglich
Löslichkeitsgrenzen	3	3	

Tab. A-2: Zusammenfassung der Ergebnisse der Charakterisierung der RSF-Parameter im Ist-Zustand für den Abfallbehälter bei Endlager (TE) bzw. Tiefenlager mit Rückholbarkeit (TM). (Skala: 5 sehr gute Charakterisierbarkeit bis 1 sehr geringe / vernachlässigbare Charakterisierbarkeit, n.b. = nicht bewertet).

A.3 Vertrauen in die Prognostizierbarkeit der RSF-Parameter der Abfallbehälter für verschiedene Wirkzeiträume

Hierbei geht es um die Ermittlung des Vertrauens in die Prognostizierbarkeit der RSF-Parameter, die den drei radionuklidrückhaltenden Sicherheitsfunktionen der Komponente Abfallbehälter zugrunde liegen (s. Kap. A.1). Dabei ist auch der Grad des Prozessverständnisses bedeutsam, ohne das die Prognostizierbarkeit hinfällig ist.

Die Auswirkungen möglicher zukünftiger Veränderungen der RSF-Parameter der Komponente Abfallbehälter sind dabei qualitativ zu berücksichtigen. Eindeutige Veränderungen eines RSF-Parameters hin zu der „sicheren Seite“ der Komponente, d.h. positiver Einfluss auf die Radionuklid-Ausbreitung bzw. die Isolationswirkung, sind positiv zu bewerten. Sie sind ein Hinweis auf eine hohe Robustheit. Bei nur geringen Veränderungen der Parameter bleibt die ursprüngliche Bewertung der RSF-Parameter bestehen.

Die Prognose der möglichen Veränderungen von Parameterwerten in der Zukunft hängt auch von der standortspezifischen Entwicklung des End- bzw. Tiefenlagersystems ab. Diese ist aber nicht sicher bekannt. Hinzu kommt, dass auf der Ebene der Entria-Referenzmodelle standortspezifische Daten nicht vorliegen. Selbst wenn sie bekannt wären, bestünden noch Unsicherheiten, wie sich ein Parameterwert bei bekannten Änderungen äußerer Randbedingungen langfristig ändert. Es kann sogar unklar sein, ob sich ein Parameterwert innerhalb der betrachteten Komponente in positiver oder negativer Richtung ändert. Hieraus ergeben sich naturgemäß Ungewissheiten hinsichtlich der Bewertung der Änderung des Parameterwertes.

In GRS (2010) wird versucht, die skizzierte Problematik durch die Verknüpfung der Unsicherheiten bei der Vorhersage der Entwicklung der End- bzw. Tiefenlagersysteme (Prognoseunsicherheit) mit der Unsicherheit bei der Prognostizierbarkeit bzw. dem Prozessverständnis zu begegnen. Diese Lösung ist bei der Anwendung der Methodik auf die generischen Entria-Referenzmodelle wegen naturgemäß fehlendem Detaillierungsgrad der Referenzmodelle und fehlendem Standortbezug nur sehr begrenzt umsetzbar.

Deshalb wird nach der Bewertung der Prognostizierbarkeit - vor allem auch des Prozessverständnisses - der RSF-Parameter (Kap. A.3.1 u. Kap. A.3.2) im darauf folgenden Kap. A.4 mit den inneren Systemeinflüssen Gas- und Wärmeentwicklung zwei ausgewählte und zwangsläufig auftretende Aspekte der Systemrobustheit beispielhaft behandelt. Die externen Systemeinflüsse (z.B. Eisüberfahung) werden in Anhang E in Zusammenhang mit dem ewG behandelt.

Die hier skizzierte Problematik der Bewertung der Prognostizierbarkeit und ihr Lösungsansatz gelten für alle anderen vier Systemkomponenten in gleicher Weise. Dabei muss zur Vermeidung eventuell verdeckter Mehrfachbewertungen bei der späteren Aggregation von Einzelergebnissen sorgfältig vorgegangen werden.

A.3.1 Vertrauen in die Prognostizierbarkeit der RSF-Parameter bei der Tiefenlagerung der Abfallbehälter im Salz

(a) Prognostizierbarkeit der Behälterstandzeit bei Lagerung in Steinsalz

Die Pollux-Behälter bestehen aus dickwandigem Stahl und sind auf den Gebirgsdruck ausgelegt. Korrosion spielt nach Angaben diverser Quellen in GRS (2008) erst dann eine Rolle, wenn Laugen oder Lösungsmittel hinzutreten. Korrosionsraten sind in Laborversuchen und in-situ Versuchen für

NaCl- und MgCl₂-Lösung ermittelt worden. Sie nehmen mit steigender Temperatur stark zu (bis zu 224 µm/a bei 170 Grad C), zeigen aber keine Abhängigkeit vom pH-Wert. Bei Anwesenheit bestimmter Spezies können sie sich erhöhen. Ohne Lösungszutritt, d.h. nur mit der natürlichen Feuchte des Salzgrusversatzes, sind die Korrosionsraten nur sehr gering. In-situ Versuche in der Asse ergaben bei Temperaturen bis zu 170 Grad Celsius Raten von < 0,1 µm/a.

Allerdings sind nach GRS (2013a) mit der Korrosion noch gewisse Ungewissheiten verbunden. So etwa Korrosionseffekte bei geringen Lösungsmengen oder bei hohen Temperaturen oder unter Anwesenheit von Wasserdampf. Lochkorrosion kann durch Restwassergehalte im Polluxbehälter hervorgerufen werden. Die mit den genannten Aspekten verbundenen Ungewissheiten können mit konservativen Annahmen abgedeckt werden.

Insgesamt wird das Prozessverständnis trotz einzelner Ungewissheiten als hoch angesehen. Dies gilt für den Zeitraum < 1.000 a. Für Zeiträume darüber hinaus wird den Behältern in Steinsalz sicherheitskonzeptionell keine Bedeutung mehr zugesprochen.

Ergebnis: Das Vertrauen in die Prognostizierbarkeit der Behälterstandzeit im Salz ist für Zeiträume < 1.000 a hoch (Bewertungsstufe 4) zu bewerten. Für Zeiträume jenseits 1.000 a erübrigt sich eine Bewertung, da dem Behälter in einem End- oder Tiefenlager in Salz dann keine funktionale Sicherheitsrelevanz mehr zukommt.

(b) Prognostizierbarkeit der Ausfallrate bei Lagerung in Steinsalz

Die Ausfallrate wird hauptsächlich bestimmt durch den Behälterausfall, die Korrosionsrate und die mechanische Belastung. Der Ausfall wird durch die Ausfallrate von 0,1 % vorgegeben (GRS 2010-1), und gegen die möglichen Belastungen ist der Behälter ausgelegt. Die Größenordnung der Ausfallrate entspricht derjenigen des schwedischen Kristallinprojektes KBS bei Berücksichtigung der unterschiedlich langen Behälterstandzeiten in Salz und Kristallin. Die langfristigen Korrosionsraten sind von verschiedenen Faktoren abhängig und werden unter (a) behandelt und bewertet. Das Prozessverständnis für die langfristige Ausfallrate wird als hoch angesehen.

Ergebnis: Das Vertrauen in die Prognostizierbarkeit der Ausfallraten im Salz ist für den gesamten Zeitraum als hoch (Bewertungsstufe 4) zu bewerten.

(c) Prognostizierbarkeit der Sorption bei Lagerung in Steinsalz

Die Rückhaltung der Radionuklide durch Sorption an Korrosionsprodukten der Abfallgebinde ist als Prozess bekannt, aber noch nicht ausreichend untersucht und deshalb für den Nachweiszeitraum nicht ausreichend belastbar quantifizierbar. Aussagen zur Sorption sind deshalb mit hohen Unsicherheiten verbunden.

Ergebnis: Das Vertrauen in die Prognostizierbarkeit der Sorption am Behältermaterial im Salz ist als gering zu bewerten (Bewertungsstufe 2).

(d) Prognostizierbarkeit der Löslichkeitsgrenzen im Bereich des Behälters in Steinsalz

Bei Erreichen von Löslichkeitsgrenzen werden aus dem Behälter austretende Radionuklide in Festphasen an Behältermaterial ausgefällt. Das Ausmaß dieser Prozesse hängt vom geochemischen Milieu der anstehenden Lösung und weiteren Einflussgrößen (Temperatur, pH-Wert usw.) ab. In früheren Studien sind Löslichkeitsgrenzen von Radionukliden für unterschiedliche geoche-

mische Milieus in einem Tiefenlager im Salz angegeben worden. Diese Löslichkeitsgrenzen müssen aber wegen großer Ungewissheiten im Sinne von konservativen Radionuklidkonzentrationen in der Lösung kritisch gesehen werden. Nach GRS (2013b) besteht insbesondere F&E-Bedarf hinsichtlich der Korrosion von Strukturteilen und der temperaturabhängigen Freisetzung von Radionukliden (Bestimmung von Löslichkeitsgrenzen in der Gas- und Lösungsphase) aus Abfallbehältern bzw. der Wechselwirkungen mit Nebenbestandteilen.

Die Prognostizierbarkeit der die Löslichkeitsgrenzen steuernden komplexen Prozesse und Parameter sind in dem betrachteten Bereich der Behälter und ihrer direkten Umgebung nicht ausreichend gut bekannt und deshalb wenig belastbar quantifizierbar.

Ergebnis: Das Vertrauen in die Einstufung der Prognostizierbarkeit der Löslichkeitsgrenzen in der unmittelbaren Umgebung des Behälters ist als gering zu bewerten (Bewertungsstufe 2).

A.3.2 Vertrauen in die Prognostizierbarkeit der RSF-Parameter bei der Tiefenlagerung der Abfallbehälter in Tonstein

(a) Prognostizierbarkeit der Behälterstandzeit für Lagerung im Tonstein

Für das Tonsteinkonzept werden die Integrität (Dichtheit) der Abfallbehälter und damit die Verhinderung einer Radionuklidfreisetzung über einen Zeitraum von mehr als 1.000 Jahren gefordert. In der Schweiz geht man davon aus, dass der Behälter eine Standzeit mit vollständigen Einschluss der Radionuklide für 10.000 a gewährleistet (Nagra 2008). In Deutschland geht man von einigen tausend Jahren aus (ESK 2016).

Bestimmend für die Auslegung des Behälters sind die Korrosionsraten unter Berücksichtigung des chemischen Milieus sowie der geomechanischen Belastung. Besondere Gefährdungen gehen von der Korrosion (z.B. Spannungsrisskorrosion, Kontaktkorrosion, insbesondere Lochfraß,) sowie von dem Zusammenwirken von chemischem Milieu und mechanischer Belastung (Gebirgsdruck) aus.

Die Industrie ist in der Lage, Stähle herzustellen, die eine ausreichend geringe Korrosionsrate gegen Porenwässer des Tonsteins aufweisen, so dass die Dichtheit in dem vorgegebenen Zeitraum durch Korrosion der Behälterwände und -deckel nicht gefährdet ist. Zudem kann die Bergbarkeit der Behälter für einige hundert Jahre gezeigt werden (Schneider-Eickhoff, R. 2016).

Die Kenntnisse über die Angriffe auf die Integrität der Behälter sind nach GRS (2010-1) hoch und die Auslegung mit Sicherheitszuschlägen möglich und die Auswirkungen der Systementwicklungen folglich als sehr gering eingestuft. Das für diese Aussage erforderliche Prozessverständnis wird für den Zeitraum < 1.000 a als gut und für Zeiträume 1.000 a bis 10.000 a als mäßig angesehen.

Ergebnis: Das Vertrauen in die Prognostizierbarkeit der Behälterstandzeit im Tonstein ist für Zeiträume < 1.000 a gut (Bewertungsstufe 4), für darüber hinaus gehende Zeiträume bis 10.000 a als mäßig (Bewertungsstufe 3) zu bewerten. Für Zeiträume jenseits 10.000 a erübrigt sich eine Bewertung, da dem Behälter in einem Endlager (TE) oder Tiefenlager mit Möglichkeit der Rückholbarkeit (TM) in Tonstein keine oder nur noch äußerst geringe Relevanz mehr zugewiesen wird.

(b) Prognostizierbarkeit der Ausfallrate des Behälters in Tonstein

Die Ausfallrate wird hauptsächlich bestimmt durch den initialen Ausfall, die Korrosionsrate und die mechanische Belastung. Der initiale Ausfall ist durch die Ausfallrate von 0,1 % vorgegeben, und gegen die mechanischen Belastungen (Gebirgsdruck) ist der Behälter ausgelegt. Die langfristigen Korrosionsraten sind von verschiedenen Faktoren abhängig und werden unter (a) behandelt und bewertet. Das Prozessverständnis für die langfristige Ausfallrate wird als hoch angesehen.

Ergebnis: Das Vertrauen in die Prognostizierbarkeit der Ausfallraten im Tonstein ist für den gesamten Zeitraum bis 10.000 a als gut (Bewertungsstufe 4) zu bewerten. Die Ausfallrate für $t > 10.000$ a ist aus sicherheitskonzeptioneller Sicht nicht mehr nicht bedeutungssam.

(c) Prognostizierbarkeit der Sorption in Tonstein

Die Rückhaltung der Radionuklide durch Sorption an Korrosionsprodukten der Abfallgebinde und in unmittelbarer Umgebung der Behälter ist als Prozess bekannt, aber noch nicht ausreichend untersucht und deshalb für den Nachweiszeitraum nicht ausreichend belastbar quantifizierbar. Aussagen zur Sorption sind deshalb nur mit hohen Unsicherheiten verbunden.

Ergebnis: Das Vertrauen in die Prognostizierbarkeit der Sorption am Behältermaterial im Tonstein ist für alle Zeiträume als gering zu bewerten (Bewertungsstufe 2).

(d) Prognostizierbarkeit der Löslichkeitsgrenzen im Bereich des Behälters in Tonstein

Hier gelten die unter Kapitel A.2.2 dargestellten Zusammenhänge, d.h. die Prognostizierbarkeit der die Löslichkeitsgrenzen steuernden komplexen Prozesse und Parameter sind in dem betrachteten Bereich der Behälter und ihrer direkten Umgebung nicht ausreichend gut bekannt und deshalb für alle Wirkzeiträume wenig belastbar quantifizierbar.

Ergebnis: Das Vertrauen in die Prognostizierbarkeit der Löslichkeitsgrenzen in der unmittelbaren Umgebung des Behälters ist im Tonstein als gering zu bewerten (Bewertungsstufe 2).

A.3.3 Zusammenfassende Bewertung des Vertrauens in die Prognostizierbarkeit der RSF-Parameter des Behälters

Insgesamt zeigt sich für die RSF-Parameter Behälterstandzeit und Ausfallrate der Abfallbehälter ein hohes Vertrauen in die Prognostizierbarkeit für Wirkzeiträume bis ca. 1.000 Jahre sowohl für Lagerung in Steinsalz als auch in Tonstein. Bei Lagerung in Tonstein ist darüber hinaus bis zu einem Wirkzeitraum von 10.000 Jahren ein mäßig hohes Vertrauen in die Behälterstandzeit gegeben und ein hohes Vertrauen in Bestimmung der Ausfallrate. Da bei der Aggregation die schwächere Bewertung dominiert, wird die Bewertung des mäßig hohen Vertrauens der Behälterstandzeit bei Tonstein dem hohen Vertrauen der Ausfallrate vorgezogen.

Für die RSF-Parameter Sorption und Löslichkeitsgrenzen ist das Vertrauen in die Prognostizierbarkeit der Behälter in beiden Gesteinsarten als gering zu bewerten.

In Tab. A-3 werden die Bewertungsergebnisse der RSF-Parameter für die betrachteten Wirkzeiträume zusammenfassend dargestellt. Tab. A-4 zeigt die aggregierten Ergebnisse für die Sicherheitsfunktionen der Behälter an.

KOMPONENTE ABFALLBEHÄLTER	Einstufung Salz (steil- u. flachlagernd)			Einstufung Tonstein		
RSF-Parameter	TE + TM			TE + TM		
<i>Wirkzeiträume</i>	<i>t < 1.000a</i>	<i>1.000 bis 10⁴ a</i>	<i>T > 10⁴ a</i>	<i>t < 1.000a</i>	<i>1.000 bis 10⁴ a</i>	<i>T > 10⁴ a</i>
Behälterstandzeit	4	n.b.	n.b.	4	3	n.b.
Ausfallrate Behälter	4	n.b.	n.b.	4	4	n.b.
Sorption	2	2	2	2	2	2
Löslichkeitsgrenzen	2	2	2	2	2	2

Tab. A-3: Zusammenfassung der zeitabhängigen Ergebnisse für das Vertrauen in die Prognostizierbarkeit der RSF-Parameter für den Behälter (TE: Endlager, TM: Tiefenlager mit Möglichkeit der Rückholbarkeit, n.b.: nicht bewertet)

KOMPONENTE ABFALL-BEHÄLTER:	zugehörige RSF-Parameter	Salz (steil- u. flachlagernd)	Tonstein
Rückhaltende Sicherheitsfunktionen		TE + TM	TE + TM
Begrenzung/Verhinderung Lösungszutritt zum Abfallprodukt wg. Dichtwirkung Behälterwandung	Behälterstandzeit	4 (für t < 1.000 a.)	4 für t < 1.000 a)
	Ausfallrate Behälter		3 für t > 1.000 a bis 10.000 a
Begrenzung RN-Ausbreitung wg. Löslichkeitsgrenzen	Löslichkeitsgrenzen	2	2
Verzögerung der RN-Ausbreitung d. Sorption an Behältermaterial	Sorption	2	2

Tab. A-4: Aggregierte Ergebnisse für die Bewertung des Vertrauens in die Prognostizierbarkeit der RSF-Parameter der Sicherheitsfunktionen des Behälters (TL: Endlager, TM: Tiefenlager mit Rückholbarkeit, n.b.: nicht bewertet)

A.4 Bewertung der Auswirkungen interner Systementwicklungen auf die RSF-Parameter der Komponente Abfallbehälter (Systemrobustheit)

In den folgenden Unterkapiteln werden mögliche Auswirkungen interner Einflüsse des End- bzw. Tiefenlagersystems auf die RSF-Parameter der radionuklidrückhaltenden Sicherheitsfunktionen der Komponente Abfallbehälter ermittelt. Diese Auswirkungen hängen stark von standort- und konzeptspezifischen Bedingungen ab. Da beim generischen Ansatz von Entria solche spezifischen Bedingungen nicht vorliegen oder aber hilfsweise angenommen werden müssen, gelten die resultierenden qualitativen Aussagen zwangsläufig nur beispielhaft.

Zu diesen internen Einflüssen zählen vor allem die Gas- und Wärmeentwicklung bei End- bzw. Tiefenlagerung, die Veränderungen der RSF-Parameter der Sicherheitsfunktionen der Systemkomponente Behälter mit sich bringen können. Das Ausmaß dieser Veränderungen ist ein Indikator für die jeweilige Systemrobustheit. **Systemrobustheit bedeutet somit die Unempfindlichkeit des Tiefenlagersystems gegenüber veränderten Randbedingungen, die sich aus der inneren und äußeren Standortentwicklung ergeben können.**

Dabei wird die Systemrobustheit reziprok, d.h. als Ausmaß der einwirkungsbedingten Veränderung des Parameterwertes, bewertet. Eine hohe Systemrobustheit ist dann gegeben, wenn die Änderung des Parameterwertes gering ist oder zur „sicheren Seite“ hin erfolgt, d.h. die Änderung des Parameterwertes sich auf die Radionuklidrückhaltung innerhalb der betrachteten Tiefenlagerkomponente „Versatz“ positiv auswirkt. Entsprechend zeigen beispielsweise die Bewertungsstufen 4 bzw. 5 eine hohe bzw. sehr hohe Robustheit auf, die Bewertungsstufen 1 bzw. 2 eine sehr geringe bzw. geringe Robustheit auf.

Zudem beziehen sich die Aussagen für die Gasentwicklung auf den Zeitraum von 10^5 Jahren, für die Wärmeentwicklung nur auf den Zeitraum von 10^4 Jahren, weil nach einigen tausend Jahren das ursprüngliche Temperaturniveau im End- bzw. Tiefenlagerbereich wieder erreicht wird und die wesentliche Gasentwicklung und -ausbreitung im Verlaufe von 10^5 Jahren erlischt. LUX et al. (2017) zeigen an beispielhaften Simulationen der Wärmeausbreitung und der Gasentstehung sowie der Gasausbreitung für Entria-Referenzmodelle, dass Wärmeentstehung durch wärmeentwickelnde Abfälle nach 10^4 Jahre wieder abgeklungen ist und Gasentstehung durch Korrosion von Metallen und Gasausbreitung im Verlauf einiger 10^5 Jahre ablaufen kann.

Die obigen Aussagen zur Systemrobustheit und der mit Wärme und Gasbildung verbundenen Zeiträume gelten in gleicher Weise auch für die anderen Komponenten des Endlagers (TE) oder des Tiefenlagers mit Rückholbarkeit (TM) In den Anhänge B bis E wird jeweils auf Kap. A.4 verwiesen.

A.4.1 Auswirkungen von Gas und Wärme auf die Komponente Behälter bei Lagerung in Salz

In diesem und dem folgenden Kapitel A.4.2 werden innere – im End- bzw. Tiefenlagersystem hervorgerufene – Ein- bzw. Auswirkungen von Gas und Wärme auf den Abfallbehälter bzw. seine RFS-Parameter beschrieben und bewertet. Dies kann im Rahmen der generischen Datenlage nur allgemein geschehen und sich nur auf mögliche Auswirkungen auf die RSF-Parameter und die damit zusammenhängenden Sicherheitsfunktionen beschränken.

(a) Auswirkungen von Gas und Wärme auf den RSF-Parameter Behälterstandzeit bei Lagerung im Steinsalz

Der Pollux-Behälter soll eine Standzeit von ca. 1.000 a im Salz aufweisen und er ist gegen die denkbaren Belastungen (v.a. Gebirgsdruck) ausgelegt. Die Einwirkung der **Gasdruckentwicklung** hat auf die geforderte Standzeit des Behälters keinen wesentlichen Einfluss. Dabei ist zu bedenken, dass die Gasentwicklung innerhalb der ersten tausend Jahre gering sein wird. Erst zu späteren Zeiten wird die Gasentwicklung zunehmen, dann hat der Behälter aber gemäß Sicherheitskonzept keine sicherheitliche Bedeutung mehr (s. Kap. 3.1. Bericht). Die Auswirkungen der Gasbildung auf die Standzeit sind deshalb als **sehr gering bis vernachlässigbar** zu bewerten. Das für diese Aussage erforderliche Prozessverständnis wird als ausreichend hoch angesehen.

Durch die **Wärmeentwicklung** der radioaktiven Abfälle im Behälter sind keine direkten oder indirekten Auswirkungen auf die Behälterstandzeit zu erwarten. Er ist darauf ausgelegt.

Ergebnis: Die Auswirkungen von Gas und Wärme auf die Behälterstandzeit im Salz ist für Zeiträume < 1.000 a sehr gering bis vernachlässigbar (Bewertungsstufe 5). Für die darüber hinaus gehenden Wirkzeiträume sind die Auswirkungen von keiner sicherheitskonzeptionellen Bedeutung mehr. Für diese Zeiträume erübrigt sich deshalb eine Bewertung.

(b) Auswirkungen von Gas und Wärme auf die Ausfallrate des Behälters bei Lagerung im Salz

Nach GRS (2010-1) wird die Ausfallrate hauptsächlich durch den initialen Ausfall, die Korrosionsrate und die mechanische Belastung bestimmt. Gegen diese Belastungen ist der Behälter ausgelegt. Sowohl die Gasdruckentwicklung als auch die Wärmeentwicklung beeinflussen die Ausfallrate nicht. Deshalb werden die Auswirkungen der Gasbildung und Wärmeentwicklung auf die Ausfallrate für den maßgeblichen Zeitraum von 1.000 a als **sehr gering bis vernachlässigbar angesehen**. Das für diese Aussage erforderliche Prozessverständnis wird als ausreichend hoch angesehen. Darüber hinausgehende Zeiträume sind für Behälter bei Tiefenlagerung im Salz sicherheitskonzeptionell ohne Bedeutung.

Ergebnis: Die Auswirkungen von Gas und Wärme auf die Ausfallrate des Behälters im Salz ist für Zeiträume < 1.000 a sehr gering bis vernachlässigbar (Bewertungsstufe 5). Für die darüber hinausgehenden Wirkzeiträume sind die Auswirkungen von keiner sicherheitskonzeptionellen Bedeutung mehr. Für diese Zeiträume erübrigt sich deshalb eine Bewertung.

(c) Auswirkungen von Gas und Wärme auf die Sorption am Behälter in Salz

Die Rückhaltung der Radionuklide durch Sorption an Korrosionsprodukten der Behälter ist als Prozess bekannt, zurzeit aber noch wenig untersucht und nicht ausreichend quantifizierbar. Dies gilt insbesondere unter Einfluss von Gasbildung bzw. Gasvorkommen und Wärme. Dieser Aspekt wird deshalb nicht bewertet.

Ergebnis: Keine Bewertung des Sachverhaltes.

(d) Auswirkungen von Gas und Wärme auf die Löslichkeitsgrenzen im Bereich des Behälters bei Einlagerung in Salz a)

Bei Erreichen von Löslichkeitsgrenzen werden aus dem Behälter austretende Radionuklide in Festphasen an Behältermaterial ausgefällt. Das Ausmaß dieser Prozesse hängt vom geochemischen Milieu der anstehenden Lösung und weiteren Einflussgrößen (Temperatur, pH-Wert usw.) ab.

Bei der Gasbildung infolge Metallkorrosion unter reduzierenden Bedingungen wird Wasserstoff freigesetzt. Dieser Wasserstoff bleibt zunächst in Lösung. Er wird aber nach Überschreiten der Sättigungsgrenze als Gasphase vorliegen. Das Redoxpaar H_2/H_2O ist allerdings nicht sehr reaktiv, was darauf hindeutet, dass der Wasserstoff sich nicht an den chemischen Reaktionen, die die Löslichkeitsgrenzen der Radionuklide bestimmen, beteiligt und eher als inert anzusehen ist (GRS 2010-1).

Ergebnis: Insgesamt werden die Auswirkungen von Gas und Wärme auf die Löslichkeitsgrenzen im Bereich des Behälters als gering angesehen (Bewertungsstufe 4). Diese Bewertung gilt für den gesamten Wirkzeitraum.

A.4.2 Auswirkungen von Gas und Wärme auf die Komponente Behälter bei Lagerung in Tonstein

(a) Auswirkungen von Gas und Wärme auf die Behälterstandzeit bei Lagerung im Tonstein

Für die End- bzw. Tiefenlagerung in Tonsteinkonzept wird eine Behälterstandzeit von bis zu 10.000 Jahren gefordert (Nagra 2008, 2002). Die Verhinderung einer Radionuklidfreisetzung aus dem Behälter über diesen Zeitraum wird angestrebt.

Nach GRS (2010-1) ist die Industrie in der Lage, Stähle herzustellen, die gegen korrosive Angriffe durch Porenwässer des Tonsteins die Dichtheit in dem vorgegebenen Zeitraum gewährleisten sollen. Bestimmend für die Auslegung des Behälters sind die Korrosionsraten unter Berücksichtigung des chemischen Milieus sowie der geomechanischen Belastung. Besondere Gefährdungen gehen von der partiellen Korrosion (Lochfraß) sowie von dem Zusammenwirken von chemischem Milieu und mechanischer Belastung aus. Im letzteren Fall sind insbesondere die Schweißnahtregionen betroffen. Man muss dabei jedoch beachten, dass über einen langen Zeitverlauf entsprechende Angriffe erhöhte Wirksamkeiten zeigen können.

Die Einwirkungen von Gasentwicklung und Wärme auf den Behälter werden als gut beherrschbar angesehen, da die Kenntnisse über entsprechende Angriffe hoch sind und die Behälter mit Sicherheitszuschlägen ausgelegt werden. Zudem ist das entsprechende erforderliche Prozessverständnis als ausreichend hoch anzusehen. Deshalb sind die Einwirkungen von Gas- und Wärmeentwicklung auf die Behälter als gering eingestuft.

Ergebnis: Die Auswirkungen von Gas- und Wärmeentwicklung auf die Behälterstandzeit im Tonstein ist für Zeiträume < 1.000 a sehr gering bis vernachlässigbar anzusehen (Bewertungsstufe 5). Für den Wirkzeitraum von 1.000 bis 10.000 Jahren sind die Auswirkungen gering anzusehen (Bewertungsstufe 4). Für darüber hinaus reichende Zeiträume sind die Auswirkungen von keiner sicherheitskonzeptionellen Bedeutung mehr. Für sie erübrigt sich deshalb eine Bewertung.

(b) Auswirkungen von Gas und Wärme auf die Ausfallrate des Behälters bei Lagerung im Tonstein

Der Einfluss der hier betrachteten Einwirkung Gasbildung auf die Ausfallrate wird als vernachlässigbar eingestuft (GRS 2010-1). Das gilt auch für die Auswirkungen der Wärmeentwicklung. Das für diese Aussage erforderliche Prozessverständnis wird als ausreichend hoch angesehen. Die Auswirkungen auf die Behälter und die Systementwicklungen werden als sehr gering eingestuft.

Ergebnis: Die Auswirkungen von Gas und Wärme auf die Ausfallrate des Behälters im Tonstein wird für Wirkzeiträume bis 10.000 a sehr gering bewertet (Bewertungsstufe 5). Für die darüber hinaus gehenden Zeiträume sind die Auswirkungen von keiner sicherheitskonzeptionellen Bedeutung mehr. Für diese Zeiträume erübrigt sich deshalb eine Bewertung.

(c) Auswirkungen von Gas und Wärme auf die Sorption am Behälter bei Einlagerung in Tonstein

Die Gas- und Wärmeentwicklung hat nur einen geringen Einfluss auf die Lösungsporosität, weshalb ein Einfluss auf die Größe der reaktiven Mineraloberflächen ausgeschlossen werden kann. Von einem geringen Einfluss auf die weiteren Sorptionsparameter kann ebenfalls ausgegangen werden. Die Gas- und Wärmeentwicklung hat folglich keinen erkennbaren Einfluss auf die Sorptionseigenschaften des Behälters und seiner Korrosionsprodukte. Das für diese Aussage erforderliche Prozessverständnis wird als ausreichend hoch angesehen. Die Auswirkungen von Gas- und Wärmeentwicklung werden für den Zeitraum bis 10.000 Jahre als sehr gering angesehen. Für den darüber hinaus gehenden Zeitraum sind sie ohne sicherheitskonzeptionelle Bedeutung.

Ergebnis: Insgesamt werden die Auswirkungen von Gas und Wärme auf die Sorption im Bereich des Behälters und damit auf die Systementwicklung bei Einlagerung in Tonstein für den Wirkzeitraum bis 10.000 Jahre als sehr gering angesehen (Bewertungsstufe 5).

(d) Auswirkungen von Gas und Wärme auf die der Löslichkeitsgrenzen im Bereich des Behälters bei Einlagerung in Tonstein.

Durch die Behälterkorrosion wird der ins End- bzw. Tiefenlager eingebrachte Sauerstoff relativ schnell aufgebraucht und es stellen sich reduzierende Bedingungen ein. Bei der Korrosion von Eisen/Stahl unter reduzierenden Bedingungen wird Wasserstoff freigesetzt. Der Wasserstoff bleibt zunächst in Lösung wird aber, nachdem die Sättigungsgrenze überschritten wurde, als Gasphase vorliegen. Das Redoxpaar H_2/H_2O ist allerdings nicht sehr reaktiv, was darauf hindeutet, dass der Wasserstoff sich nicht an den chemischen Reaktionen beteiligt und eher als inert anzusehen ist (GRS 2010-1). Die Auswirkungen der Gasbildung mit Druckerhöhung im Porenraum auf die Löslichkeitsgrenzen beim Behälter werden daher als gering eingestuft. Gleiches kann für den Einfluss der Temperaturentwicklung auf den Behälter angenommen werden.

Ergebnis: Insgesamt werden die Auswirkungen von Gas und Wärme auf die Löslichkeitsgrenzen im Bereich des Behälters und damit auf die Systementwicklung bei Einlagerung im Tonstein für den Wirkzeitraum bis 10.000 Jahre als gering angesehen (Bewertungsstufe 4). Dies gilt für den Zeitraum $t > 10.000$ Jahre auch für Gas.

A.4.3 Zusammenfassende Bewertung der Auswirkungen von Gas- und Wärmeentwicklung auf die Behälter

In Tab. A-5 sind die Auswirkungen der ausgewählten internen Systementwicklungen Gas und Wärme auf die RSF-Parameter des Abfallbehälters zusammenfassend dargestellt. Es ist erkennbar, dass Auswirkungen von Gasentwicklung und Wärme auf die Behälterstandzeit und die Ausfallrate nur einen sehr kleinen Einfluss für den Wirkzeitraum bis 1.000 Jahre hat. Für den Zeitraum bis 10.000 Jahre ist der Einfluss beider internen Systementwicklungen für Steinsalz mäßig (Bewertungsstufe 3) und für Tonstein gering (Bewertungsstufe 4). Für Zeiträume > 10.000 Jahre wird ein mäßiger Einfluss von Gas angenommen. Der Einfluss der Wärme wird nicht mehr bewertet, weil die Gebirgstemperatur zu dem Zeitraum bereits wieder ihren ursprünglichen Wert angenommen hat.

Der Einfluss von Gas und Wärme auf die Löslichkeitsgrenzen ist für $t > 10.000$ Jahre gering, wobei zu beachten ist, dass aus oben genanntem Grunde die Auswirkung der Wärme nicht mehr bewertet werden muss.

KOMPONENTE BEHÄLTER: Auswirkung der innerer System- entwicklungen „Gas“ und „Wär- me“ auf die RSF- Parameter	Einstufung Steinsalz (steil- und flachlagernd)						Einstufung Tonstein					
	TE + TM						TE + TM					
	$t < 1.000a$		1.000 bis $10^4 a$		$T > 10^4 a$		$t < 1.000a$		1.000 bis $10^4 a$		$T > 10^4 a$	
	G	W	G	W	G	W	G	W	G	W	G	W
Behälterstandzeit	5	5	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	5	5	4	4	n.b.	n.b.
Ausfallrate	5	5	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	5	5	4	4	n.b.	n.b.
Löslichkeitsgrenzen	4	4	4	4	4	n.b.	4	4	4	4	4	n.b.
Sorption	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	5	5	5	5	5	n.b.

Tab. A-5: Bewertung der ausgewählten zeitabhängigen Systementwicklungen Gas (G) und Wärme (W) auf die RSF-Parameter der Komponente Abfallbehälter (TE = Endlager, TM Tiefenlager mit Rückholbarkeit; 5 sehr geringe Auswirkungen bis 1 sehr starke Auswirkungen; n.b. = nicht bewertet)

Der Einfluss von Gas und Wärme auf die Sorption wird bei Steinsalz nicht bewertet, und bei Tonstein ist der Einfluss über den gesamten Wirkzeitraum sehr gering. Hierbei gilt das oben zur Wärme Gesagte.

Tab. A-6 zeigt eine aggregierte Zusammenfassung hinsichtlich der drei radionuklidrückhaltenden Sicherheitsfunktionen des Behälters. Die Bewertungen von Standzeit und Ausfallraten sind jeweils identisch für die einzelnen Wirkzeiträume. Entscheidend ist, dass der Einfluss von Gas und Wärme auf die Standzeiten und Ausfallraten der Behälter für den Zeitraum bis 1.000 Jahre sowohl für Einlagerung in Steinsalz als auch in Tonstein sehr gering ist. Für den Wirkzeitraum 1.000 bis 10.000 Jahre ist der Einfluss mäßig bei Lagerung in Steinsalz und gering bei Lagerung in Tonstein. Damit werden die Anforderungen aus dem Sicherheitskonzept weitgehend erfüllt.

Die Begrenzung bzw. Verzögerung der Nuklid Ausbreitung durch Löslichkeitsgrenzen und Sorption bilden wegen des geringen Einflusses von Gas und Wärme auf die entsprechenden RSF-Parameter zusätzliche Sicherheit. Die Sorption spielt bei Lagerung in Steinsalz keine Rolle.

Radionuklidrückhaltende Sicherheitsfunktionen des Behälters	RSF- Parameter	Salz-steil- u. flachlagernd		Tonstein	
		TE + TM		TE + TM	
		G	W	G	W
Begrenzung/Verhinderung v. Lösungsbewegung zum Abfallprodukt wg. Dicht- wirkung Behälterwandung	Standzeit Behälter	5 (für 1.000 a)	5 (für 1.000 a)	5 (für 1.000 a);	5 (für 1.000 a);
	Ausfallrate Behälter	3 (für 1.000 bis 10.000 a)	3 (für 1.000 bis 10.000 a)	4 für 1.000 bis 10.000 a	4 für 1.000 bis 10.000 a
Begrenzung RN- Ausbreitung wg. Löslich- keitsgrenzen	Löslichkeits- grenzen	4	4 (nur bis 10.000 a)	4	4 (nur bis 10.000 a)
Verzögerung der RN- Ausbreitung d. Sorption	Sorption	n.b.	n.b.	5	5 (nur bis 10.000 a)

Tab. A-6: Aggregierte Ergebnisse für die ausgewählten Systementwicklungen Gas (G) und Wärme (W) auf die RSF-Parameter und die zugehörigen Sicherheitsfunktionen der Komponente Abfallbehälter (TE = Endlagerung, TM = Tiefenlagerung mit Rückholbarkeit; 5 sehr geringe Auswirkungen bis 1 sehr starke Auswirkungen; n.b. = nicht bewertet)

A.5 Vertrauen in die Erfüllung sicherheitskonzeptioneller Auslegungsanforderungen an den Abfallbehälter

In diesem Kapitel wird – soweit möglich und sinnvoll – das Verhältnis der RSF-Parameter für die Behälter ins Verhältnis gesetzt zu den heutigen sicherheitskonzeptionellen Auslegungsanforderungen. Nach ESK (2016) sind folgende generelle Anforderungen an die Abfallgebinde bzw. Behälter für die Nachbetriebsphase zu erfüllen; sie gelten für Salz, Tonstein und Kristallin:

- 1) Die Tiefenlagergebinde müssen die im Sicherheitskonzept festgelegten Einschlusseigenschaften für ihre jeweilige Wirkungsdauer aufweisen;
- 2) Die Tiefenlagergebinde müssen für den Zeitraum, in dem die geforderten Einschlusseigenschaften vorliegen müssen, gegen innere und äußere Einwirkungen so ausgelegt werden, dass ihre Integrität gegeben ist;

- 3) Die Auslegung der Tiefenlagergebinde und ihrer Teilsysteme (z. B. Abfallgebinde, Schweißnähte, Dichtsysteme, Residualspannungen) muss nach anerkannten Standards erfolgen, so dass die Integrität über den geforderten Zeitraum belastbar begründet werden kann;
- 4) Das Tiefenlagergebinde muss aus Materialien gefertigt werden, welche den Einschluss und die Integrität unter den internen und externen Belastungen des Tiefenlagers gewährleisten können (z. B. Korrosion, thermische, hydraulische, mechanische und chemische Belastungen);
- 5) Es sollen Materialien zum Einsatz kommen, die im Hinblick auf eine mögliche Gasbildung keine Integritätsgefährdung der Barrieren erwarten lassen;
- 6) Bergbarkeit der Behälter für einen Zeitraum von 500 Jahren nach Verschluss;
- 7) Darüber hinaus werden noch Anforderungen an die Temperaturbegrenzung, hinsichtlich physikochemischer Einflüsse, Ausschluss der Kritikalität sowie die Kennzeichnung der Tiefenlagergebinde gestellt. Darauf wird im Folgenden nicht näher eingegangen.

Diese Anforderungen beziehen sich in einem weiteren Sinne auf die Einschlusseigenschaften der Behälter. Diese wiederum wird speziell durch Standzeit des Behälters bestimmt. Deshalb wird alleine die Standzeit an den zutreffenden Anforderungen gemessen.

A.5.1 Vertrauen in die Erfüllung der Auslegungsanforderung Behälterstandzeit bei Lagerung im Steinsalz

Die in Kap. A.5 beschriebenen Anforderungen unter 1) beziehen sich auf die im Sicherheitskonzept festgelegten Einschlusseigenschaften und ihre jeweilige Wirkungsdauer.

Die Anforderungen 2) bis 4) und 6) bedingen, dass die Standzeit der Behälter und ihre Integrität über geforderte Zeiträume gewahrt bleiben. Es wird deshalb hier nur der RSF-Parameter Standzeit Behälter unter Berücksichtigung der Behälterkorrosion betrachtet. Die RSF-Parameter Sorption und Löslichkeitsgrenzen werden als physikochemische Einflüsse ebenso nicht betrachtet wie weitere Anforderungen unter 7). Anforderung 1), 3) und 5) sind selbsterklärend.

Die zentralen Anforderungen nach sicherem Einschluss des radioaktiven Inventars und der Gewährleistung der Integrität des Behälters für einen vorgegebenen Zeitraum von mindestens 500 a unter Vermeidung von Aerosolfreisetzung (Bergbarkeit, BMU 2010) bis zu ca. 1.000 Jahre (sicherheitskonzeptuelle Anforderung) dürften für Behälter des Typ Pollux erfüllbar sein. So veranschlagen Müller & Ewig (2008) für Pollux-Behälter wegen ihrer Wandstärke von ca. 50 cm eine prinzipielle Handhabbarkeit von 500 Jahren und mechanische Stabilität für den gleichen Zeitraum.

Labor- und in-situ Korrosionsversuche in Salz ergaben nach Angaben von GRS (2008) Behälterstandzeiten, die für Pollux-Behälter von minimal 220 Jahren bis maximal über 10.000 Jahre betragen. Die mittlere Behälterstandzeit wurde mit 1.000 a berechnet. In ESK (2016) wird angemerkt, dass die Wirkungsdauer der Barriere Abfallbehälter einige hundert bis tausend Jahre lang sein muss, in Abhängigkeit davon, ab wann der Behälter dicht vom Salz umschlossen wird.

Auch wenn diese Zahlen sich – je nach Versuchsanordnung – teilweise um Größenordnungen unterscheiden, so sind die wesentlichen Einflussgrößen auf die Standzeiten, Korrosionsraten und Korrosionsarten inzwischen so gut bekannt, dass beim Herstellungsprozess der Behälter darauf Rücksicht genommen werden kann und eine standort- und nachweisspezifische Herstellung möglich ist. Die Auslegung der Behälter und ihrer Teilsysteme (z.B. Abfallgebinde, Schweißnähte, Dichtsysteme, Residualspannungen) müssen nach ESK (2016) dabei nach anerkannten Standards erfolgen, so dass ihre Integrität gegenüber den internen und externen Belastungen des Tiefenlagers (z. B. Korrosion, thermische, hydraulische, mechanische und chemische Belastungen) über

den geforderten Zeitraum gewährleistet werden. So ist die weitgehende Beherrschung von Korrosionsschäden durch Werkstoffauswahl und konstruktive Maßnahmen möglich (Schneider-Eickhoff 2016).

Daraus folgt ein hohes Vertrauen in die Erfüllung der Anforderung an die Erfüllung der Behälterstandzeit für den Wirkzeitraum von 1.000 Jahren (Bewertungsstufe 4).

Ergebnis: Das Vertrauen, dass die Auslegungsanforderungen hinsichtlich der Standzeit des Behälters für den Zeitraum bis 1.000 Jahre in Salz erfüllt werden können, ist hoch (Bewertung 4). Für darüber hinaus gehende Zeiträume ist die Erfüllung der Auslegungsanforderung sicherheitskonzeptionell ohne Bedeutung.

A.5.2 Vertrauen in die Erfüllung der Auslegungsanforderung Behälterstandzeit bei Lagerung im Tonstein

Bei der End- bzw. Tiefenlagerung in Tonstein wird der Bentonitversatz nicht so schnell wirksam wie bei Lagerung im Steinsalz. Deshalb muss der Behälter bei Lagerung in Tonstein eine längere Standzeit aufweisen als bei Lagerung in Salz. Hinzu kommt die geo- und hydrochemisch komplexe Umwelt des Behälters in Tonstein.

Die unter Kap. A.5 beschriebenen Anforderungen gelten auch für Tonstein. Da in Deutschland derzeit erst an der Konzeptentwicklung eines End- bzw. Tiefenlagers gearbeitet wird (ANSICHT 2017), wird bei Entria unter anderem die Annahme getroffen, die Einlagerung der Abfälle in Polylux-Behältern vorzunehmen. Auch hier wird – wie bereits in Kap. A.5.1 dargelegt – nur die Erfüllung der zentralen Auslegungsanforderung für den RSF-Parameter Standzeit des Behälters behandelt.

In ESK (2016) wird die Anforderung an die Standzeit des Behälters mit einigen 1.000 Jahren angegeben, zumindest aber solange, bis die Abfallbehälter vom Versatzmaterial Bentonit vollständig eingeschlossen sind. Nach Ansicht von Nagra (2002) sollen die Stahlbehälter einen vollständigen Einschluss der Radionuklide für mindestens 10.000 Jahre gewährleisten. Die geochemischen Bedingungen im Umfeld des Behälters (Bentonit, Bentonitgranulat) sollen reduzierend, leicht alkalisch und mäßig salin sein. Dadurch wird die langfristige Wirksamkeit der Barriere Behälter begünstigt (Nagra 2002). Eine signifikante Korrosion von einigen 10 µm/a wird nur für die anfängliche aerobe Phase angenommen. In der anschließenden anaeroben Phase wird mit Korrosionsraten von ca. 1 µm/a gerechnet. Im Hinblick auf eine Optimierung der Lebenszeit der Behälter wird in der Schweiz optional eine Kupferbeschichtung der Behälter berücksichtigt.

Es gilt aber auch für Behälter in Tonstein die für Salz schon getroffene Aussage, dass bei Berücksichtigung der standortspezifischen Verhältnisse eine Anpassung vorhandener Behälterkonzepte möglich ist, so dass die gegebenen Anforderungen erfüllt werden können. Daraus folgt ein hohes Vertrauen in die Erfüllung der Anforderung an die Erfüllung der Behälterstandzeit für den Wirkzeitraum von 1.000 Jahren (Bewertungsstufe 4). Für den Wirkzeitraum > 1.000 bis 10.000 Jahre ist das Vertrauen in die Erfüllung der Anforderung an die Behälterstandzeit mäßig (Bewertungsstufe 3).

A.5.3 Zusammenfassende Bewertung des Vertrauens in die Erfüllung sicherheitskonzeptioneller Anforderung an den Abfallbehälter

Die Tab. A-7 zeigt die Ergebnisse der Kapitel A.5.1 und A.5.2 zusammengefasst.

KOMPONENTE BEHÄLTER	Einstufung Salz (steil u. flach)	Einstufung Ton- stein
Vertrauen in die Erfüllung der Auslegungsanfor- derung	TE + TM	TE + TM
Anforderung: Standzeit des Behälters	4 für $t < 1.000$ a Für $t \geq 1.000$ a nicht relevant	4 für $t \leq 1.000$ 3 für 1.000 a bis 10.000 a Für $t \geq 10.000$ a nicht relevant

Tab A-7: Vertrauen in die Erfüllung der Auslegungsanforderung Standzeit des Behälters

Ergebnis: Das Vertrauen, dass die Auslegungsanforderungen hinsichtlich der Standzeit des Behälters für den Zeitraum bis 1.000 Jahre in Salz und Tonstein erfüllt werden können, ist hoch (Bewertungsstufe 4). Für darüber den hinaus gehenden Zeitraum bis 10.000 Jahre ist das Vertrauen in die Standzeit bei Lagerung in Tonstein mäßig hoch (Bewertungsstufe 3), bei Lagerung in Salz für Zeiträume ≥ 1.000 Jahre nicht relevant. Für darüber hinausgehende Zeiträume ist die Erfüllung der Auslegungsanforderung für beide Wirtsgesteine sicherheitskonzeptionell ohne Bedeutung.

A.6 Aggregation der Einzelbewertungen zur Robustheit der Komponente Abfallbehälter für Lagerung in Salz und Tonstein

In diesem letzten Arbeitsschritt werden die **Robustheiten der radionuklidrückhaltenden Sicherheitsfunktionen der Systemkomponente Abfallbehälter** über die verschiedenen Wirkzeiträume durch Aggregation der RSF-Parameter ermittelt. **Diese Robustheit lässt sich ausdrücken als Vertrauen in die Wirksamkeit der rückhaltenden Sicherheitsfunktionen der Komponente Behälter** für End- bzw. Tiefenlager in Salz und Tonstein über die zu betrachtenden Wirkzeiträume ($t < 1.000$ a, $t = 1.000$ bis 10.000 Jahre und $t > 10.000$ Jahre). Dabei ist zu beachten, dass für Behälter in Steinsalz sicherheitskonzeptionell nur eine Funktionsfähigkeit des Behälters für 1.000 Jahre erforderlich ist, und für Tonstein eine von 10.000 Jahren. Der Zeitraum $t > 10^4$ Jahre wird deshalb nicht mehr für alle RSF-Parameter bewertet, obwohl angenommen werden kann, dass der Behälter auch dann noch - zumindest bei Lagerung im Tonstein – wahrscheinlich eine Rückhalteleistung aufweisen.

Aufgrund der engen Verflechtung von Abhängigkeiten ist eine **Kompensation** besserer oder schlechterer Bewertungen von Parametern nicht möglich, entscheidend für die Gesamtbewertung ist der Parameter, zu dem das **geringste Vertrauen** in die Erfüllung der Auslegungsanforderungen

besteht. Die Ermittlung der Robustheit geschieht durch Aggregation der RSF-Parameter der einzelnen Sicherheitsfunktionen (s. Tab. A-8) über die vier Bewertungsfelder (s. Kap. A.2 bis A.5) hin zu den drei Sicherheitsfunktionen des Behälters (s. Tab. A-1).

Das Ergebnis besteht in der Robustheit der den Behältern zugeordneten Sicherheitsfunktionen für die Behälterlagerung in Salz- und Tonstein für die unterschiedlichen Wirkzeiträume (s. Tab. A-8). Eine weitere Aggregation über die Ebene der Sicherheitsfunktionen hinaus ist nicht sinnvoll, weil dadurch keine weiteren Informationen gewonnen werden, vielmehr der Detailblick auf die Sicherheitsfunktionen verloren geht.

Robustheit der Systemkomponente Abfallbehälter						
Radionuklidrückhaltende Sicherheitsfunktionen	Salz (steile u. flache Lagerung) Versatz Salzgrus TE + TM			Tonstein Versatz Bentonit TE + TM		
	$t < 1.000 \text{ a}$	1.000 bis 10^4 a	$t > 10^4 \text{ a}$	$t < 1.000 \text{ a}$	1.000 bis 10^4 a	$t > 10^4 \text{ a}$
Wirkzeiträume						
Begrenzung/Verhinderung Lösungsbewegung bzw. Lösungszutritt zum Abfallprodukt wegen Dichtwirkung der Behälterwandung	Ro4	n.b.	n.b.	Ro4	Ro3	n.b.
Begrenzung RN-Ausbreitung wegen Löslichkeitsgrenzen	Ro2	Ro2	Ro2	Ro2	Ro2	Ro2
Verzögerte RN-Ausbreitung durch Sorption am Behältermaterial	Ro2	Ro2	Ro2	Ro2	Ro2	Ro2

Tab A-8: Zusammenfassende Bewertung der Robustheit (Ro) der rückhaltenden Sicherheitsfunktionen für die Komponente Behälter über alle radionuklidrückhaltenden Sicherheitsfunktionen und für unterschiedliche Wirkzeiträume (TE = Endlager, TM = Tiefenlager mit Rückholbarkeit). Bewertung: 1 = vernachlässigbare/sehr geringe Robustheit bis 5 sehr hohe Robustheit, n.b.: nicht bewertet).

Hinweise zur Ermittlung der Robustheit der drei radionuklidrückhaltenden Sicherheitsfunktionen:

- Ermittlung der Robustheit der rückhaltenden Sicherheitsfunktion „*Begrenzung/Verhinderung des Lösungszutritts zum Abfallprodukt und Radionuklidausbreitung wegen der Dichtwirkung der Behälterwand*“.

Lagerung des Behälters in Steinsalz

Die zugehörigen RSF-Parameter sind die Behälterstandzeit und die Ausfallrate des Behälters. Für den Behälter in Steinsalz zeigen die Ergebnisse über alle vier Bewertungsfelder eine sehr gute Bewertung und drei gute Bewertungen für die zugehörigen RSF-Parameter Standzeit und Ausfallrate des Behälters im Wirkzeitraum $t < 1.000$ a. Von besonderer Bedeutung dabei sind die gute Bewertung hinsichtlich der Prognostizierbarkeit und des Prozessverständnisses sowie das hohe Vertrauen in die Auslegungsanforderungen der Behälterstandzeit.

Erfüllung der Auslegungsanforderungen an die Standzeit des Behälters. Daraus folgt eindeutig ein insgesamt hohes Vertrauen in die rückhaltende Sicherheitsfunktion (aggregierte Bewertungsstufe 4).

Für den Wirkzeitraum von 1.000 bis 10.000 a sind die RSF-Parameter Standzeit und Ausfallrate sicherheitskonzeptionell nicht mehr von Bedeutung und werden deshalb für das Gesamtergebnis nicht mehr bewertet, obwohl sie bei den Auswirkungen von Gas und Wärme auf die RSF-Parameter noch mitbewertet werden.

Insgesamt ist festzuhalten, dass das Vertrauen in die rückhaltende Sicherheitsfunktion für $t < 1.000$ a insgesamt hoch ist. Die Robustheit der Sicherheitsfunktion wird deshalb für den Zeitraum $t < 1.000$ a als hoch bewertet (Bewertungsstufe 4). Für darüber hinausgehende Wirkzeiträume sind die betrachteten Aspekte sicherheitskonzeptionell nicht mehr von Bedeutung und werden nicht bewertet.

Lagerung des Behälters in Tonstein

Die zugehörigen RSF-Parameter sind die Behälterstandzeit und die Ausfallrate des Behälters. Für den Behälter in Tonstein zeigen die Ergebnisse über alle vier Bewertungsfelder eine sehr gute Bewertung und drei gute Bewertungen für die zugehörigen RSF-Parameter „Standzeit“ und „Ausfallrate“ des Behälters im Wirkzeitraum $t < 1.000$ a. Von besonderer Bedeutung dabei sind die gute Bewertung hinsichtlich der Prognostizierbarkeit und des Prozessverständnisses sowie das hohe Vertrauen in die Erfüllung der Auslegungsanforderungen an die Standzeit des Behälters. Daraus folgt eindeutig ein insgesamt hohes Vertrauen in die rückhaltende Sicherheitsfunktion (aggregierte Bewertungsstufe 4).

Für den Wirkzeitraum 1.000 bis 10.000 a, der für die Lagerung des Behälters in Tonstein sicherheitskonzeptionell bedeutsam ist, ergeben sich für drei Bewertungsfelder (Charakterisierung Ist-Zustand entfällt) zwei mäßige und eine gute Bewertung. Daraus ist insgesamt ein mäßiges Vertrauen in die rückhaltende Sicherheitsfunktion für den Wirkzeitraum abzuleiten.

Der Wirkzeitraum > 10.000 a hat keine sicherheitskonzeptionelle Bedeutung mehr bei Lagerung des Behälters in Tonstein.

Insgesamt ist festzuhalten, dass das Vertrauen in die rückhaltende Sicherheitsfunktion für $t < 1.000$ a insgesamt hoch ist. Die Robustheit der Sicherheitsfunktion wird deshalb für den Zeitraum $t < 1.000$ a als hoch bewertet (Bewertungsstufe 4). Für den Wirkzeitraum 1.000 bis 10.000 a ist das Vertrauen in die rückhaltende Sicherheitsfunktion insgesamt als mäßig zu bewerten. Die Robustheit der Sicherheitsfunktion wird deshalb für diesen Zeitraum als mäßig bewertet (Bewertungsstufe 3). Für darüber hinausgehende Wirkzeiträume sind die betrachteten Aspekte sicherheitskonzeptionell nicht mehr von Bedeutung und werden nicht bewertet.

- **Ermittlung der Robustheit der rückhaltenden Sicherheitsfunktion „Verzögerung der Radionuklidausbreitung durch Sorption am Behältermaterial“.**

Lagerung des Behälters in Steinsalz

Der zugehörige RSF-Parameter ist die Sorption. Für Behälter in Salz ist die Bewertung dieses Aspektes von geringer Bedeutung, weil der Prozess der Sorption an Korrosionsprodukten der Abfallgebinde und in unmittelbarer Umgebung des Behälters zwar bekannt ist, aber noch nicht ausreichend untersucht und deshalb für den Nachweiszeitraum nicht ausreichend belastbar quantifizierbar. Zwar ist die Charakterisierung der Sorption im Ist-Zustand als mäßig zuverlässig zu bewerten, doch die Prognostizierbarkeit und das Prozessverständnis über lange Zeiträume mit komplexen sich verändernden Randbedingungen kann bestenfalls mit gering bewertet werden. Insgesamt ist das Vertrauen in den RSF-Parameter Sorption gering.

Im Ergebnis führt dies zu einem geringen Vertrauen in die auf Sorption beruhende radionuklidrückhaltende Sicherheitsfunktion bei Behälterlagerung in Steinsalz. Sie besitzt nur eine geringe Robustheit (Bewertungsstufe 2).

Lagerung des Behälters in Tonstein

Der zugehörige RSF-Parameter ist die Sorption. Für Behälter in Tonstein ist die Bewertung dieses Aspektes von geringer Bedeutung, weil der Prozess der Sorption an Korrosionsprodukten des Abfallgebundes und in unmittelbarer Umgebung des Behälters zwar bekannt ist, aber noch nicht ausreichend untersucht und deshalb für den Nachweiszeitraum nicht ausreichend belastbar quantifizierbar. Zwar ist die Charakterisierung der Sorption im Ist-Zustand als mäßig zuverlässig zu bewerten, doch die Prognostizierbarkeit und das Prozessverständnis über lange Zeiträume mit komplexen sich verändernden Randbedingungen kann bestenfalls mit gering bewertet werden. Insgesamt ist das Vertrauen in den RSF-Parameter Sorption gering. An dieser Bewertung kann auch die sehr geringe Wirkung von Wärme und Gasentwicklung auf den RSF-Parameter nichts ändern. Bei der Bewertung des RSF-Parameters Sorption darf muss darauf geachtet werden, dass die Sorptionsfähigkeit von Ton/Bentonit nicht berücksichtigt werden darf, sondern nur die Sorption an Behälterbestandteilen bzw. -inhalten.

Im Ergebnis führt dies zu einem geringen Vertrauen in die auf Sorption beruhende radionuklidrückhaltende Sicherheitsfunktion bei Behälterlagerung in Tonstein. Sie besitzt nur eine geringe Robustheit (Bewertungsstufe 2).

- **Ermittlung der Robustheit der rückhaltenden Sicherheitsfunktion „Begrenzung der Radionuklidausbreitung durch Löslichkeitsgrenzen“.**

Lagerung des Behälters in Steinsalz

Der zugehörige RSF-Parameter ist die Löslichkeitsgrenze. Für Behälter in Steinsalz ist die Bewertung dieses Aspektes von geringer Bedeutung, weil die Wirksamkeit der Löslichkeitsgrenzen am Abfallbehälter und seiner unmittelbarer Umgebung zwar bekannt ist, aber noch nicht ausreichend untersucht und deshalb für den Nachweiszeitraum nicht ausreichend belastbar quantifizierbar ist. Zwar ist die Charakterisierung der Löslichkeitsgrenzen im Ist-Zustand als mäßig zuverlässig zu bewerten, doch ihre Prognostizierbarkeit und das Prozessverständnis über lange Zeiträume mit

komplexen sich verändernden Randbedingungen und Parametern kann bestenfalls mit gering bewertet werden. Insgesamt ist das Vertrauen in den RSF-Parameter Löslichkeitsgrenzen deshalb gering. An dieser Bewertung kann auch die nur geringe Auswirkung von Wärme und Gasentwicklung auf den Parameter nichts ändern.

Im Ergebnis führt dies zu einem geringen Vertrauen in die auf Löslichkeitsgrenzen beruhende radionuklidrückhaltende Sicherheitsfunktion bei Behälterlagerung in Steinsalz. Sie besitzt nur eine geringe Robustheit (Bewertungsstufe 2).

Lagerung des Behälters in Tonstein

Der zugehörige RSF-Parameter ist die Löslichkeitsgrenze. Für Behälter in Tonstein ist die Bewertung dieses Aspektes von geringer Bedeutung, weil der die Wirksamkeit der Löslichkeitsgrenzen am Abfallbehälter und seiner unmittelbarer Umgebung zwar bekannt ist, aber noch nicht ausreichend untersucht und deshalb für den Nachweiszeitraum nicht ausreichend belastbar quantifizierbar ist. Zwar ist die Charakterisierung der Löslichkeitsgrenzen im Ist-Zustand als mäßig zuverlässig zu bewerten, doch ihre Prognostizierbarkeit und das Prozessverständnis über lange Zeiträume mit komplexen sich verändernden Randbedingungen und Parametern kann bestenfalls mit gering bewertet werden. Insgesamt ist das Vertrauen in den RSF-Parameter Löslichkeitsgrenzen gering. An dieser Bewertung kann auch die nur geringe Auswirkung von Wärme und Gasentwicklung auf den Parameter nichts ändern.

Im Ergebnis führt dies zu einem geringen Vertrauen in die auf Löslichkeitsgrenzen beruhende radionuklidrückhaltende Sicherheitsfunktion bei Behälterlagerung in Tonstein. Sie besitzt nur eine geringe Robustheit (Bewertungsstufe 2).

A.7 Quellen zu Anhang A

ANSICHT (2017): Sicherheits und Nachweiskonzept für ein Endlager in Tongestein in Deutschland – Synthesebericht.- Koordinator: Jobmann, Michael, gemeinsame Bearbeitung durch GRS, BGR, DBEtec.- Auftraggeber: KIT (PTKA-WTE) FKZ: 02E11061A/B, Bericht TEC-19-2016-AB, Stand 30.03.2017.

ESK (2016): Empfehlung der Entsorgungskommission Anforderungen an Endlagergebinde zur Endlagerung Wärme entwickelnder radioaktiver Abfälle.- Entsorgungskommission, 17.03.2016.

GRS (2013a): Synthesebericht für die VSG. Bericht zum Arbeitspaket 13. Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben.- Autoren: Fischer-Appelt, K., Baltes, B., Buhmann, D., Larue, J., Mönig, J.,- Bericht GRS-290, März 2013.

GRS (2013b): Radiologische Konsequenzenanalyse. Bericht zum Arbeitspaket 10, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-289, Autoren: Larue, J., Baltes, B., Fischer, H., Frieling, G., Kock, I., Navarro, M., Seher, H.- Köln, 2013.

- GRS (2012): Endlagerauslegung und -Optimierung. Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. Bericht zum Arbeitspaket 6, GRS-281, Autoren: Bollingerfehr, W., Filbert, W., Dörr, S., Herold, P., Lerch, C., Burgwinkel, P., Charlier, F., Thomauske, B., Bracke, G., Kilger, R.,- Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, 285 S.: Köln, 2012.
- GRS (2011): Analyse betrieblicher Erfahrungen und ihrer Bedeutung für das Anlagenkonzept und den Betrieb eines Endlagers für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle. Bericht GRS –A-3613.- Autoren: F. Peiffer, T. Fass, S. Weber, Juli 2008.
- GRS (2008): Synoptischer Sachstandsbericht Endlagersysteme Tonstein/Steinsalz.- Zwischenbericht zum VerSi-Teilvorhaben „Evaluierung“ SR 2589. Autor: Fischer-Appelt, K., Köln, Dezember 2008.
- GRS (2010-1): Abwägungsmethodik für den Vergleich von Endlagersystemen in unterschiedlichen Wirtsgesteinsformationen - Bewertung der charakteristischen Parameter der rückhaltenden Sicherheitsfunktionen der Abfallbehälter, 51 S.- Begleitbericht zum Vorhaben 3607R02589 VerSi „Evaluierung der Vorgehensweise“, Bericht GRS A 3536, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln.
- Lux, KH., Wolters, R., Zhao, J, Rutenberg, M, Feierabend, J., Pan, T. (2017): TH2M-basierte multiphysikalische Modellierung und Simulation von Referenz-Endlagersystemen im Salinar- und Tonsteingebirge ohne bzw. mit Implementierung einer Möglichkeit für ein direktes Monitoring des längerfristigen Systemverhaltens auch noch nach Verschluss der Einlagerungssohle. - Ein Beitrag zur Verbesserung der Robustheit von Sicherheitsfunktionen mit sehr hoher Relevanz im Hinblick auf die Entwicklung von Bewertungsgrundlagen zum Vergleich von Entsorgungsoptionen.- Arbeitsbericht der ENTRIA-Teilprojekte VP 5.1 und VP 5.2 sowie VP 6.7mod – Februar 2017, Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik, TU Clausthal, Stand Februar 2017.
- Müller, B. & Ewig, F. (2008): Abschätzung der Standzeit von Endlagergebinden in einem zukünftigen HAW-Endlager im Salzgestein unter dem Einfluss der Korrosion. ISTec-A-1301, 44 Seiten; Köln, August 2008.
- Nagra (2008): Begründung der Abfallzuteilung, der Barrierensysteme und der Anforderungen an die Geologie. Bericht zur Sicherheit und Machbarkeit.- Technischer Bericht 08-05, Oktober 2008, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle,- Wettingen.
- Nagra (2002): Project Opalinuston Clay, Safety Report; Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste and long-lived intermediate level waste, (Entsorgungsnachweis), December 2002, Nationale Gesellschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle
- Schneider-Eickhoff, R. (2016): Rückholbarkeit/Bergbarkeit von Endlagerbehältern. Anforderungen an das Behälterdesign.- Folien des Vortrages auf dem 5. Essener Fachgespräch Endlagerbergbau, GNS, 25.02.2016, Essen.

Anhang B: Bestimmung der Robustheit der radionuklidrückhalten- den Sicherheitsfunktionen der Komponente Versatz

<u>Inhaltsverzeichnis:</u>	Seite
B.1 Einleitung	3
B.2 Charakterisierung des Ist-Zustandes der RSF-Parameter des Versatzes	3
B.2.1 Charakterisierung des Ist-Zustandes von Salzgrusversatz bei Lagerung in Steinsalz	4
B.2.2 Charakterisierung des Ist-Zustandes von Bentonitversatz bei Lagerung in Tonstein	6
B.2.3 Zusammenfassende Bewertung der Charakterisierbarkeit der RSF-Parameter des Versatzes im Ist-Zustand	8
B.3 Vertrauen in die Prognostizierbarkeit der RSF-Parameter des Versatzes	9
B.3.1 Vertrauen in die Prognostizierbarkeit von Salzgrusversatz bei Lagerung in Steinsalz	9
B.3.2 Vertrauen in die Prognostizierbarkeit von Bentonitversatz bei Lagerung in Tonstein	13
B.3.3 Zusammenfassende Bewertung des Vertrauens in die Prognostizierbarkeit der RSF-Parameter beim Versatz	15
B.4 Bewertung der Auswirkungen interner Systementwicklungen auf die RSF-Parameter des Versatzes (Systemrobustheit)	16
B.4.1 Auswirkungen von Gas und Wärme auf den Salzgrusversatz bei Lagerung in Steinsalz	17
B.4.2 Auswirkungen von Gas und Wärme auf den Bentonitversatz bei Lagerung in Tonstein	19
B.4.3 Zusammenfassende Bewertung der Auswirkungen von Gas und Wärme auf den Versatz	22
B.5 Vertrauen in die Erfüllung sicherheitskonzeptioneller Auslegungsanforderungen an den Versatz	23
B.5.1 Erfüllung der Auslegungsanforderungen an den Salzgrusversatz bei Lagerung in Steinsalz	23
B.5.2 Erfüllung der Auslegungsanforderungen an den Bentonitversatz bei Lagerung in Tonstein	24

	Seite
B.5.3 Zusammenfassende Bewertung des Vertrauens in die Erfüllung sicherheits- konzeptioneller Anforderungen an den Versatz	26
B.6 Aggregation der Einzelbewertungen zur Robustheit der radionuklidrückhaltenden Si- cherheitsfunktionen des Versatzes	28
B.7 Quellen zu Anhang B	31

Verzeichnis der Tabellen

Tab. B-1:	Rückhaltende Sicherheitsfunktionen und die zugehörigen charakteristischen Parametern für die Komponente Versatz	4
Tab. B-2:	Ermittlung des Vertrauens in die Charakterisierung des Ist-Zustandes der RSF-Parameter für den Versatz im ewG für End- bzw. Tiefenlager in Steinsalz bzw. Tonstein	8
Tab. B-3:	Aggregierte Ergebnisse für die Bewertung des Vertrauens in die Charakterisierbarkeit der RSF-Parameter der Sicherheitsfunktionen für den Ist-Zustand des Versatzes	9
Tab. B-4:	Zusammenfassung der zeitabhängigen Ergebnisse für das Vertrauen in die Prognostizierbarkeit der RSF-Parameter für den Versatz	15
Tab. B-5:	Aggregierte Ergebnisse für die Bewertung des Vertrauens in die Prognostizierbarkeit der RSF-Parameter der Sicherheitsfunktionen des Versatzes	16
Tab. B-6:	Bewertung der ausgewählten zeitabhängigen Systementwicklungen Gas (G) Und Wärme (W) auf die RSF-Parameter der Komponente Versatz	22
Tab. B-7:	Aggregierte Ergebnisse für die ausgewählten Systementwicklungen Gas (G) Und Wärme (W) auf die RSF-Parameter und die zugehörigen Sicherheitsfunktionen der Komponente Versatz	23
Tab. B-8:	Vertrauen in die wirkzeitabhängige Erfüllung der Auslegungsanforderungen der RSF-Parameter für den Versatz	27
Tab. B-9:	Aggregierte Ergebnisse der Erfüllung der Auslegungsanforderungen an den Versatz für die RSF-Parameter bzw. die zugehörigen Sicherheitsfunktionen	27
Tab. B-10:	Zusammenfassende Bewertung der Robustheit der rückhaltenden Sicherheitsfunktionen für die Systemkomponente Versatz für unterschiedliche Wirkzeiträume	28

B.1 Einleitung

In Anhang B wird die Robustheit der radionuklidrückhaltenden Sicherheitsfunktionen der Komponente „Versatz“ als qualitative Größe bestimmt (s. Bericht, Kap. 6.2.4). Die Robustheit dient im Zusammenspiel mit der Relevanz der entsprechenden Sicherheitsfunktionen der Identifizierung von Robustheitsdefiziten der Sicherheitsfunktionen (vgl. Bericht, Kap. 6.2.5).

Dem Versatz von End- bzw. Tiefenlagern kommt sowohl bei Einlagerung in Steinsalz als auch in Tonstein eine ganz entscheidende Bedeutung für die Gewährleistung der Langzeitsicherheit zu, da er den durch die im ewG aufgefahrenen Hohlräume hervorgerufenen Integritätsverluste langfristig kompensieren muss (s. Bericht, Kap. 3).

Die Bestimmung der Robustheit geschieht für die folgenden drei **radionuklidrückhaltende Sicherheitsfunktionen (RSF)** mit Hilfe der sie kennzeichnenden **RSF-Parameter** (s. Tab. B-1) und Tab. 1 in Bericht:

- Begrenzung/Verhinderung von Lösungsbewegung und Radionuklidtransport im Versatz (mit den RSF-Parametern Permeabilität, Porosität und Diffusivität),
- Begrenzung der RN-Ausbreitung wegen Löslichkeitsgrenzen (mit dem RSF-Parameter Löslichkeitsgrenze),
- verzögerte RN-Ausbreitung durch Sorption (mit dem RSF-Parameter Sorption).

Die Robustheitsbewertung der RSF-Parameter beschränkt sich auf die Strecken bzw. sonstige Hohlräume innerhalb des ewG, da diesem die primäre Isolationsleistung zugeschrieben wird (s. Bericht, Kap. 3).

Dabei wird jede der drei Sicherheitsfunktionen mit ihren RSF-Parametern in vier **Bewertungsfelder** beurteilt:

- Die Charakterisierung des Ist-Zustandes der RSF-Parameter,
- Das Vertrauen in die Prognostizierbarkeit der RSF-Parameter,
- Die Bewertung der Auswirkungen interner Systementwicklungen auf die RSF-Parameter,
- Das Vertrauen in die Erfüllung sicherheitskonzeptioneller Auslegungsanforderungen durch die RSF-Parameter.

Abschließend werden die Einzelergebnisse verbalargumentativ aggregiert, so dass sich für jede der drei radionuklidrückhaltenden Sicherheitsfunktionen eine Aussage über ihre Robustheit ergibt. Soweit möglich und sinnvoll, werden die Robustheitsaussagen zeitlich differenziert für drei Wirkzeiträume ($t < 1.000$ Jahre, für $t = 1.000$ a bis 10.000 Jahre und $t > 10.000$ Jahre) abgeleitet.

Die Bestimmung der Robustheit der Sicherheitsfunktionen wird jeweils für das Versatzmaterial Salzgrus (bei Lagerung in Steinsalz) und Bentonit (bei Lagerung in Tonstein) vorgenommen.

Details zur benutzten Methodik können dem Bericht (v.a. Kap. 5 u. 6) entnommen werden. Gleiches gilt für benutzte Abkürzungen und Begriffe (s. Kap. 9 u. 10 im Bericht).

B.2 Charakterisierung des Ist-Zustandes der RSF-Parameter des Versatzes

Es geht hierbei um die Überprüfung, wie verlässlich die **Charakterisierung der RSF-Parameter im Ist-Zustand** durch Untersuchungsmethoden gewährleistet werden kann. Eine hohe Aussagekraft der Untersuchungen ist notwendig, um die Einhaltung von Auslegungsanforderungen garantieren

zu können. Die Wirkzeiträume spielen hierbei keine Rolle. In Tab. B-1 sind die radionuklidrückhaltenden Sicherheitsfunktionen (RSF) sowie die ihnen zugeordneten RSF-Parameter dargestellt.

Tiefenlagerkomponente VERSATZ (TE u. TM)	Rückhaltende Sicherheitsfunktion (RSF)	RSF-Parameter für Lagerung in Salz und Tonstein
Versatz	Begrenzung/Verhinderung v. Lösungsbewegung u. Radionuklidtransport	Permeabilität Porosität Diffusivität
	Begrenzung/Verzögerung der RN-Ausbreitung wegen Löslichkeitsgrenzen	Löslichkeitsgrenzen
	Verzögerung d. RN- Ausbreitung durch Sorpti- on	Sorption (Kd-Wert)

Tab.: B-1: Rückhaltende Sicherheitsfunktionen und die zugehörigen charakteristischen Parametern für die Komponente Versatz (TE: Endlager, TM: Tiefenlager mit Monitoring u. Vorkehrungen zur Rückholbarkeit)

B.2.1 Charakterisierung des Ist-Zustandes von Salzgrusversatz bei Lagerung in Steinsalz

(a) Ist-Zustand: Charakterisierung der Permeabilität des Salzversatzes

Der in die Gruben Hohlräume eingebaute Salzgrusversatz weist anfänglich eine hohe Permeabilität auf. Seine Barrierenwirkung erreicht er im Laufe der Zeit durch seine gebirgsdruckbedingte Kompaktion. Dabei führt die wachsende Dichte des Versatzes zu einer stetigen Verlangsamung der Kompaktion. Das Endziel wird dann erreicht, wenn die Permeabilität des Versatzes der des gewachsenen Salzgebirges entspricht. Im Übrigen weist der Versatz mit 10^{-12} m^2 beim Einbau eine deutlich höhere Permeabilität auf als die Auflockerungszone in der dem Versatz angrenzenden Hohlraumkontur (GRS 2010-2a).

Es stehen mehrere Untersuchungsmethoden zur Verfügung, mit denen die Permeabilitätsentwicklung des Versatzes zuverlässig ermittelt werden kann. Dazu gehören auch wegeregelter Ödometerversuche in Analogie zu einer Kompaktion mit konstanter Hohlraumkonvergenz in situ. Diese relativ einfache Versuchsart eignet sich sehr gut zum Vergleich verschiedener Materialvarianten und Einflussgrößen. Hinzu treten triaxiale Kompaktionsversuche zur Bestimmung des Kompaktionsverhaltens unter definierten Spannungskomponenten als Grundlage für Stoffmodelle in numerischen Berechnungsverfahren sowie Permeabilitätsversuche im Einaxialpermeameter als Bindeglied zwischen der bereits erreichten Kompaktion und der noch vorhandenen Durchlässigkeit des Versatzmaterials gegen potentielle Radionuklidträger.

Mittels dieser Methoden kann die Entwicklung der Permeabilität im Labor bestimmt werden, und viele experimentelle Befunde haben zu guten Kenntnissen auch hinsichtlich der einbaubedingten Einflüsse (z.B. Feuchtegrad, Korngrößeneinfluss) geführt. Insgesamt ist festzustellen, dass die Ausagesicherheit hinsichtlich der Bestimmung Versatzpermeabilität hoch ist.

Ergebnis: Charakterisierbarkeit der Permeabilität von Salzversatz im Ist-Zustand ist hoch (Bewertungsstufe 4)

(b) Ist-Zustand: Charakterisierung der Porosität des Salzversatzes

Zur Bestimmung der Porosität des Salzversatzes stehen diverse anerkannte Untersuchungsmethoden zur Verfügung. Dazu gehören beispielsweise die Tränkungsverfahren, das pyknometrische Verfahren, Quecksilber-Porosimetrie und mikroskopische Methoden.

Die kompaktionsbedingte Entwicklung der Porosität lässt sich mit diesen Methoden im Labor gut ermitteln (GRS 2010-2a). Zur Anpassung der berechneten Druckverläufe an die Messkurven können sowohl die Permeabilität als auch Porosität so verändert werden, dass eine möglichst gute Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung erreicht wird. Analoges gilt auch für Messungen bei in situ Bedingungen unter Berücksichtigung von Einflüssen wie beispielsweise Einbringtechnik oder Feuchtegrad. Aufgrund vieler experimenteller Befunde ist die Kenntnis über die Porosität bei Einbau des Versatzes als gut zu bewerten. Dies gilt auch für die Auflockerungszone.

Insgesamt ist festzustellen, dass die Aussagesicherheit hinsichtlich der Bestimmung der Porosität des Versatzes sowie seine räumlichen Verteilung im Versatzhaufwerk sowie auch in der Auflockerungszone hoch ist.

Ergebnis: Charakterisierbarkeit der Porosität von Salzversatz im Ist-Zustand ist hoch (Bewertungsstufe 4)

(c) Ist-Zustand: Charakterisierung der Diffusivität des Salzversatzes

Die Diffusivität des Salzgrusversatzes kann in Diffusionszellen für die verschiedenen Versatzentwicklungszustände ermittelt werden. Entsprechende Ergebnisse von Experimenten mit kompaktiertem Salzgrus aus dem Salzstock Gorleben liegen vor. Mit dieser Messtechnik werden gute Ergebnisse erzielt. In Summe ist die Aussagesicherheit zur Diffusivität im Salzgrusversatz als gut zu bewerten (GRS 2010-2a).

Nimmt man die Ergebnisse der Diffusivität des kompaktierten Salzgruses aus Gorleben als tendenziell allgemeingültig für Salzgrus aus Älterem Steinsalz (NaCl) in Salzstöcken, so ist die Aussagesicherheit zur Diffusivität des Salzversatzes für den Istzustand als zuverlässig zu bewerten.

Ergebnis: Charakterisierbarkeit der Diffusivität von Salzversatz im Ist-Zustand ist hoch (Bewertungsstufe 4)

(d) Ist-Zustand: Charakterisierung der Löslichkeitsgrenzen im Salzversatzes

Soweit keine Lösungszutritte von außerhalb in den Salzversatz eindringen, steht nur das durch den Salzversatz und die Luft eingetragene Wasser zur Verfügung. Durch die Behälterkorrosion werden sowohl das durch den Versatz eingebrachte Wasser und die Luft verbraucht. In dem Falle ist eine weitere Betrachtung der Löslichkeitsgrenzen obsolet, da das Lösungsmittel durch die Korrosion verbraucht worden ist.

Falls Lösungsmittel von außen in den Versatz zutreten, hängt die Entwicklung der Löslichkeitsgrenzen vom Lösungsmittel (Eh, pH) und den entsprechenden Radionukliden ab. So kann sich die Speziation von Actiniden durch Redoxprozesse ändern, und damit auch ihre Löslichkeit. Ob und welches Lösungsmittel zutritt, ist ungewiss. Über geochemische Modellrechnungen können die thermodynamischen Löslichkeitsgrenzen berechnet werden. Allerdings ist die Qualität der thermodynamischen Daten verschieden. Darin liegt eine Unsicherheit in der Abschätzung zukünftiger

Löslichkeitsgrenzen. Nach Meinung der GRS (2010-2b) ist die Charakterisierung mit Blick auf die „wahre“ Höhe der Löslichkeitsgrenzen eher als mäßig einzustufen. GRS geht allerdings davon aus, dass durch Versuche Aussagen hinsichtlich maximaler Löslichkeiten von Radionukliden mit hoher Sicherheit möglich sind. Deshalb wird hier die Prognostizierbarkeit und die Charakterisierbarkeit der Löslichkeitsgrenzen als hoch eingestuft (4).

Ergebnis: Prognostizierbarkeit der maximalen Löslichkeitsgrenzen in Salzversatz für den Ist-Zustand ist hoch (jeweils Bewertungsstufe 4)

(e) Ist-Zustand: Charakterisierung der Sorption des Salzversatzes

Entfällt; ohne Bedeutung bei Salzgrusversatz.

B.2.2 Charakterisierung des Ist-Zustandes von Bentonitversatz bei Lagerung in Tonstein

(a) Ist-Zustand: Charakterisierung der Versatzpermeabilität von Bentonit innerhalb des ewG

Die Einlagerungsstrecken sollen nach ENTRIA-AB-03 (2015) mit Bentonit (bzw. einem Bentonit-Sand-Gemisch) versetzt werden. Dadurch soll der langfristige Einschluss der Abfälle gewährleistet werden. Voraussetzung dazu ist, dass das Versatzmaterial durch Wasseraufnahme aufquillt (Volumenzunahme mit Quelldruck) und zusätzlich durch den auflaufenden Gebirgsdruck kompaktiert wird. Die Permeabilität des Versatzes direkt nach Einbau beträgt etwa 10^{-12} m^2 . Die langfristig angestrebte Versatzpermeabilität liegt bei 10^{-19} m^2 .

Zur Messung der Entwicklung der Permeabilität des Versatzmaterials existieren verschiedene vielfach erprobte Messmethoden (z.B. weggeregelte Ödometerversuche, Triaxiale Kompaktionsversuche, s. o. Salzversatz), deren Befunde hinsichtlich des Einflusses von Kerngrößen, Feuchte und Einbringtechnik auf die Permeabilitätsentwicklung bei Einbau des Versatzes als aussagekräftig zu bewerten sind.

Nach Angaben der GRS (2010-2a) sind zur Ermittlung der Permeabilität der Auflockerungszone im Konturbereich der versetzten Hohlräume in Untertagelabors eine Reihe von in situ Untersuchungen durchgeführt worden, die gute Kenntnisse über die Ausdehnung der Auflockerungszone und deren Permeabilität liefern. Die ermittelten Permeabilitätswerte für die Auflockerungszone liegen bei $< 10^{-17} \text{ m}^2$ auf. Die Aussagesicherheit für diesen Befund ist als gut zu bewerten.

Ergebnis: Charakterisierbarkeit der Permeabilität von Bentonit bzw. Bentonit-Sand-Versatz für den Ist-Zustand ist hoch (Bewertungsstufe 4)

(b) Ist-Zustand: Porosität des Bentonitversatzes innerhalb des ewG

Zur Bestimmung der Porosität existieren verschiedene Methoden (Pyknometer-Porosität, Wasserverlust-Porosität, Quecksilber-Druckporosität usw.), mit denen eine Vielzahl von Experimenten getätigt wurde. Gleiches gilt für die Bestimmung der Porenstruktur sowie des Bindungszustands der Porenwässer, der Porenradienverteilung sowie der Zugänglichkeit für gelöste Stoffe. Insbesondere bei Kombination der Methoden zur Ermittlung der Gesamtporosität und der effektiven Porosität wird ihre Aussagekraft als hoch eingeschätzt, und auch durch experimentellen Befunde hinsichtlich Kerngrößeneinfluss, Feuchteeffluss, Einbringtechnik ist die Kenntnis über die Porosität bei Einbau des Versatzes als gut zu bewerten. Gleiches gilt nach GRS (2010-2a) für den Bereich der Auflockerungszone.

Ergebnis: Charakterisierbarkeit der Porosität von Bentonit bzw. Bentonit-Sand-Versatz für den Ist-Zustand ist hoch (Bewertungsstufe 4)

(c) Ist-Zustand: Charakterisierung der Diffusivität des Bentonit bzw. des Bentonit/Sand-Versatzes

In Diffusionszellen kann die Diffusivität des Bentonit/Sand-Versatzes ermittelt werden. Umfangreiche Experimente mit kompaktiertem Bentonit sowie Bentonit/Sand-Gemischen liegen vor. Mit dieser Messtechnik werden gute Ergebnisse erzielt. Deshalb ist die Aussagesicherheit zur Diffusivität zu Bentonit bzw. Bentonit/Sand-Gemischen als gut zu bewerten.

Ergebnis: Charakterisierbarkeit der Diffusivität von Bentonit bzw. Bentonit/Sand-Versatz für den Ist-Zustand ist hoch (Bewertungsstufe 4)

(d) Ist-Zustand: Charakterisierung der Löslichkeitsgrenzen im Bentonitversatz

Die Löslichkeitsgrenzen sind abhängig von der Chemie des Porenwassers (v.a. Eh, pH) und der Konzentration der Radionuklide und ihrer Speziation (z.B. durch Redox-Prozesse). Zur Bestimmung des Porenwasserchemismus existieren verschiedene Extraktionsmethoden; direkte Messungen sind nicht möglich. Für die Bestimmung der hydrochemischen Parameter liegen erprobte Nachweisverfahren vor. Der ursprüngliche Chemismus sowie die thermodynamischen Löslichkeitsgrenzen werden mittels geochemischer Modellrechnungen bestimmt. Die Unsicherheiten der Bestimmung von Löslichkeitsgrenzen liegen in den Extraktionsmethoden und den thermodynamischen Daten. Deshalb ist die Bestimmung der tatsächlichen Höhe der Löslichkeitsgrenzen nach GRS (2010-2b) eher weniger gut einzuschätzen. Die Versuche lassen jedoch mit relativ hoher Sicherheit Aussagen zur maximalen Löslichkeit der Radionuklide zu.

Ergebnis: Charakterisierbarkeit der Löslichkeitsgrenzen in Bentonit bzw. Bentonit/Sand-Versatz für den Ist-Zustand ist hoch (Bewertungsstufe 4)

(e) Ist-Zustand: Charakterisierung der Sorptionseigenschaften des Bentonitversatzes innerhalb des ewG

Wegen des relativ geringen Aufwandes werden üblicherweise zur Bestimmung der Sorptionseigenschaften Batch-Experimente durchgeführt. Dabei kann das geochemische Milieu der Lösung (Eh, pH, Ionenstärke, Karbonatgehalt etc.) gut eingestellt werden. Es lassen sich die Sorptionseigenschaften auch im Zuge der Bestimmung der Diffusivität (Porendiffusionskoeffizienten) aus der Differenz des scheinbaren (apparenten) und des effektiven Diffusionskoeffizienten bestimmen. Die Untersuchungsmethode lässt bei entsprechendem Aufwand eine gute Charakterisierbarkeit der Kd-Werte zu. Darüber hinaus bestehen noch weitere spezielle spektroskopische Untersuchungsmethoden, mit denen sich die Stärke und Reversibilität der Bindungen (Einbau in Kristallgitter, Oberflächenkomplexierung und Ionenaustausch) bestimmen lässt.

Alle Untersuchungsmethoden besitzen das Problem, dass Probenahme und Versuchsdurchführung im Hinblick auf die Erhaltung der in situ Bedingungen (Sauerstoffgehalt, Redoxzustand etc.) ebenso wie die Extraktion des Porenwassers schwierig ist. Die Unsicherheiten liegen in der Schwierigkeit, das hydrochemische Milieu im Porenwasser des Bentonitversatzes in situ zu erfassen. Nachteilig ist weiterhin, dass die Ergebnisse (Kd-Werte) statisch, d.h. nur für die gegebenen Versuchsbedingungen gültig sind und die zugrunde liegenden Sorptionsmechanismen nicht erfasst werden können (Blackbox). Dies wirkt sich sowohl auf die Repräsentativität als auch auf die Prognostizierbarkeit der ermittelten Sorptionskennwerte bei veränderten Randbedingungen aus.

Aus den genannten Gründen ist die Charakterisierbarkeit der Sorptionseigenschaften nur mit mittel zu bewerten. Nach GRS (2010-2a) ist die Charakterisierbarkeit im Hinblick auf die „wahre“ Größe der Sorption gleichfalls als eher weniger gut einzustufen. GRS geht jedoch davon aus, dass die Versuche mit hoher Sicherheit eine Aussage hinsichtlich eines Mindestbeitrags der Sorption zur Radionuklidrückhaltung zulassen.

Ergebnis: Charakterisierbarkeit der Sorptionseigenschaften von Bentonit bzw. Bentonit/Sand-Versatz im Ist-Zustand ist mittel (Bewertungsstufe 4).

B.2.3 Zusammenfassende Bewertung der Charakterisierbarkeit der RSF-Parameter des Versatzes im Ist-Zustand

Sowohl für Versatz aus Salzgrus als auch aus Bentonit ist die Charakterisierbarkeit aller RSF-Parameter als hoch zu bewerten (s. Tab. B-2). Lediglich bei Salzgrus wird der entsprechende RSF-Parameter wegen praktisch fehlender Sorption nicht bewertet.

Der Grund für diese hohe Bewertung liegt in den vorhandenen Untersuchungsmethoden für die verschiedenen RSF-Parameter. Diese Methoden haben sich nachweislich bewährt und liefern gute Ergebnisse.

Da es in diesem ersten Bewertungsfeld nur um die Bewertung der Charakterisierung des Ist-Zustandes der RSF-Parameter geht, entfällt eine zeitdifferenzierte Betrachtung und Bewertung.

Komponente VER- SATZ:	Einstufung Salz (steil- u. flachlagernd)	Einstufung Tonstein TE + TL
RSF-Parameter	Versatz: Salzgrus TE + TM	Versatz: Bentonit TE + TM
Versatzpermeabilität	4	4
Porosität	4	4
Diffusivität	4	4
Löslichkeitsgrenzen	4	4
Sorption	n.B.	4

Tab. B-2: Ermittlung des Vertrauens in die Charakterisierung des Ist-Zustandes der RSF-Parameter für den Versatz im ewG für End- bzw. Tiefenlager in Steinsalz bzw. Tonstein (TE: Endlager, TM: Tiefenlager mit Monitoring u. Vorkehrungen zur Rückholbarkeit, n.b.: nicht bewertet)

Aggregiert man die Ergebnisse für die RSF-Parameter mit Blick auf die zugehörigen Sicherheitsfunktionen (s. Tab. B-3), dann zeigt sich insgesamt ein hohes Vertrauen in die Charakterisierbarkeit der RSF-Parameter sowie der zugehörigen Sicherheitsfunktionen im Ist-Zustand.

Komponente VERSATZ:			
Sicherheitsfunktion	RSF-Parameter	Salz-steil- u. flachlagernd (Versatz Salzgrus) TE + TM	Tonstein (Versatz Bentonit) TE + TM
Begrenzung/Verhinderung v. Lösungsbewegung u. RN-Transport	Permeabilität	4	4
	Porosität		
	Diffusivität		
Begrenzung RN-Ausbreitung wg. Löslichkeitsgrenzen	Löslichkeitsgrenzen	4	4
Verzögerung der RN-Ausbreitung d. Sorption	Sorption	n.b.	4

Tab. B-3: Aggregierte Ergebnisse für die Bewertung des Vertrauens in die Charakterisierbarkeit der RSF-Parameter der Sicherheitsfunktionen für den Ist-Zustand des Versatzes (TE: Endlager, TM: Tiefenlager mit Monitoring u. Vorkehrungen zur Rückholbarkeit, n.b.: nicht bewertet)

B.3 Vertrauen in die Prognostizierbarkeit der RSF-Parameter des Versatzes

Hierbei geht es um die Ermittlung des Vertrauens in die Prognostizierbarkeit der RSF-Parameter, die den drei radionuklidrückhaltenden Sicherheitsfunktionen der Komponente Versatz zugrunde liegen (Details dazu s. Kap. A.1). Dabei ist auch der Grad des Prozessverständnis bedeutsam, ohne das die Prognostizierbarkeit hinfällig ist.

B.3.1 Vertrauen in die Prognostizierbarkeit von Salzgrusversatz bei Lagerung in Steinsalz

(1 + 2) Prognostizierbarkeit von Permeabilität und Porosität des Salzversatzes

Da die Porosität und die Permeabilität gemeinsam die Durchlässigkeit des kompaktierten Salzgrusversatzes bestimmen und funktional zusammenhängen, werden beide Größen hier gemeinsam behandelt.

Im Laufe der Zeit läuft der Salzkörper auf den Versatz auf und komprimiert ihn. Dies führt sowohl zu einer Verringerung seiner Porosität als auch seiner Permeabilität. Die zur modellhaften Beschreibung des Prozesses benötigten Parameter werden aus Laborexperimenten abgeleitet. Diese werden in der Regel als Zeitrafferexperimente durchgeführt, wobei zwangsläufig einzelne Versuchsbedingungen nicht den Bedingungen in einem End- oder Tiefenlager entsprechen, z. B. weil höhere Kompaktionsdrücke als im Tiefenlager oder größere, konstante Verschiebungsraten verwendet werden.

Die Dauer bis zur vollständigen Kompaktion des Salzgrusversatzes wird bis maximal 1.000 Jahre abgeschätzt (Popp et al. 2012), wobei die tatsächliche Kompaktionszeit von mehreren Einflussgrößen abhängig ist (z.B. Feuchtegehalt des Salzgruses, Temperaturverlauf, Konvergenz des Ge-

birges). Danach wäre der langfristig sichere Einschluss der Abfälle im Tiefenlager gewährleistet. Zentrale Anforderung ist die weitgehende Dichtheit, die bei einer wirksamen Restporosität des Salzversatzes von $< 1\%$ erreicht werden könnte. GRS (2009) sieht dies bei einer wirksamen Restporosität von $0,01\%$ des kompaktierten Salzgruses, Lux et al. (2017) geben dafür eine Restporosität von $0,2\%$ an.

Der Zeitbedarf der Salzgruskompaktion bis zu einer vernachlässigbaren Restporosität ist derzeit nur unzureichend bestimmt. Vorhandene Daten sind oft nicht miteinander vergleichbar, da sie mit unterschiedlichen Methoden und Zielsetzungen erhoben wurden (GRS 2013a). Derzeit gibt es keinen in gängige geotechnische Modellierungstools (z. B. FLAC, FLAC3D) implementierten Stoffansatz, der umfassend und zufriedenstellend das langzeitliche Kompaktionsverhalten mit plastischer und Kriechverformung bis in den Bereich von kleinen Restporositäten (ca. 1%) und unter Berücksichtigung des Feuchteinflusses abbildet (GRS 2012).

Der Nachweis erfolgt im Allgemeinen rechnerisch mit Hilfe von Simulationsmodellen. Allerdings erweist sich dabei eine gesicherte quantifizierte Prognose aufgrund stark eingeschränkter Beobachtungszeiträume für die Qualifizierung von Modellen und Stoffgesetzen als äußerst schwierig. Außerdem ist die Übertragbarkeit von Kurzzeitexperimenten wegen der unterschiedlichen Wirkung mehrerer Einflussfaktoren wie der Verformungsgeschwindigkeit, der Temperatur, dem Druck, der Feuchte u. a. nur bedingt möglich (REPOPERM 2009). Ohne den Nachweis, dass diese Anforderung erreicht wird, ist das Ziel des vollständigen bzw. der sicheren Einschlusses nach derzeitigem Sicherheitskonzept (s. Bericht, Kap. 3) hinfällig.

Generell bestehen nach GRS (2013a) noch erhebliche Ungewissheiten zur Dynamik des Kompaktionsprozesses unter realen Gebirgsdruckbedingungen sowie den hydraulischen Eigenschaften bei kleinen Porositäten im Bereich $1 \pm 1\%$. Derzeit gibt es keinen Stoffansatz, der das Langzeitkompaktionsverhalten mit plastischer Verformung und Kriechverformung bis in den Bereich dieser kleinen Porositäten umfassen und zufriedenstellend abbildet (GRS 2012). Laut ISIBEL (2008) ist das Kompaktionsverhalten bis zur Porosität von 10% inzwischen gut beschreibbar, unterhalb von 10% besteht noch Forschungsbedarf, um belastbare Prognoseberechnungen durchführen zu können.

In GRS (2013b) werden hinsichtlich des hydraulischen und mechanischen Verhaltens von Salzgrusversatz mehrere zu klärende Fragenkomplexe als notwendig angesehen, um weitergehende Sicherheitsanalysen vornehmen zu können. Die Stoffansätze für die numerische Beschreibung der Kompaktion von Salzgrus als Ersatzmaterial sind im Bereich kleiner Porositäten und unter Berücksichtigung des Feuchteinflusses nicht hinreichend belegt. Deshalb werden stark vereinfachte Modellansätze verwendet, die die über die einfache mechanische Kompaktion hinausgehenden Kriechkompaktionsprozesse nur unvollständig beschreiben (GRS 2012). Dort wird eine noch zu schaffende Datenbasis für die Salzgruskompaktion bei Porositäten $< 10\%$ gefordert. Die Kompaktion des trockenen Salzgruses im Porositätsbereich $> 3\%$ ist nach REPOPERM (2009) bereits vergleichsweise gut untersucht. Damit können die vorhandenen Salzgrusstoffgesetze weiter entwickelt bzw. für die Anwendung im Langzeitsicherheitsnachweis qualifiziert werden.

Die systematische Ermittlung von Eigenschaften des Salzgrusversatzes ist notwendig. In GRS (2012) wird beispielsweise darauf hingewiesen, dass hinsichtlich den 2-Phasenflusseigenschaften und den Diffusionseigenschaften von Salzgrusversatz ein erheblicher Forschungsbedarf besteht, da hierzu fast keine Untersuchungen vorliegen. Weiterhin ist offen, mit welchen Diffusionskoeffizienten, Permeabilitäten sowie Kapillardrücken die hydraulischen Eigenschaften von Salzgrus für kleine Porositäten beschrieben werden können.

Weiterhin wird in GRS (2012) darauf hingewiesen, dass Kennwerte und Parameter im Hinblick auf eine fortschreitende Kompaktion und Veränderung des Porenraums auch im Zusammenhang mit

der zeitlichen Entwicklung der Auflockerungszone und der Kontaktzone zwischen Steinsalzkontur und abdichtendem Salzversatz fehlen. Die Sättigungsabhängigkeit der Permeabilität und des Kapillardrucks ist für Salzgrus weitgehend unbekannt, jedoch von großer Bedeutung für die hydraulische Entwicklung und den Stofftransport im Tiefenlager. Die systematische Ermittlung von Eigenschaften des Salzgrusversatzes ist notwendig. In GRS (2012) wird beispielsweise darauf hingewiesen, dass hinsichtlich der 2-Phasenflusseigenschaften und den Diffusionseigenschaften von Salzgrusversatz ein erheblicher Forschungsbedarf besteht, da hierzu fast keine Untersuchungen vorliegen. Weiterhin ist offen, mit welchen Diffusionskoeffizienten, Permeabilitäten sowie Kapillardrücken die hydraulischen Eigenschaften von Salzgrus für kleine Porositäten beschrieben werden können.

Die vorliegenden Kenntnisse zur Beschreibung des gekoppelten komplexen Kompaktions- und Transportverhaltens von befeuchtem Salzgrus sind nicht ausreichend. Dies betrifft die Zeitdauer der Kompaktion bis zur Restporosität von 1% (und kleiner), die Veränderungen der Transporteigenschaften (Übergang von advektivem zu diffusivem Transport, Verringerung der Porosität). Ungeklärt ist auch, inwieweit Fluide im Intergranularraum (Porenraum) eingeschlossen sind oder ob sie mobilisiert bzw. ausgepresst werden können.

Es liegen nach GRS (2013a) nur wenige Informationen und Versuche vor, die eine zuverlässige Quantifizierung von Zweiphasenflussparametern erlauben. Die Sättigungsabhängigkeit von Permeabilität und Kapillardruck ist für Salzgrus weitgehend unbekannt, hat jedoch eine große Bedeutung für die hydraulische Entwicklung und den Radionuklidtransport im Tiefenlager. Für zukünftige Forschungsaktivitäten bleibt zudem die Frage, wie der Gas- und Flüssigkeitstransport bei Porositäten im Prozentbereich physikalisch korrekt beschrieben werden kann (GRS 2012). Insbesondere für kleine Porositäten stellt sich die Frage, mit welchen Diffusionskoeffizienten, absoluten und relativen Permeabilitäten sowie Kapillardrücken die hydraulischen Eigenschaften von Salzgrus beschrieben werden können, oder ob grundsätzlich ein von der klassischen Zweiphasenflusstheorie abweichendes Modell gewählt werden muss (GRS 2012).

Es sind in situ Untersuchungen und THM-Simulationen erforderlich, um den Kompaktionsprozess weiter zu untersuchen. Dabei ist ein breiter Bereich an thermo-hydro-mechanischen Zuständen zu berücksichtigen. Wichtig sind unter anderem der Kompaktionsfortschritt bei kleinen Porositäten sowie die Homogenität des Kompaktionsvorganges. Die Kompaktion des Salzgrusversatzes ist ein zentraler Mechanismus im Sicherheitskonzept eines salinen Tiefenlagers. In hydrodynamischen Modellen muss der Kompaktionsvorgang vereinfacht beschrieben werden. Zudem sind weitere FuE-Arbeiten erforderlich, um mit solchen vereinfachenden Ansätzen verlässliche Inter- und Extrapolationen der Konvergenzraten für kompaktierten Versatz zu erhalten.

Zusammenfassend heißt es in GRS (2013a) zum Kenntnisstand über die Salzgrusversatzkompaktion: *„Es liegen derzeit zu wenige Informationen und Versuche vor, aus denen die hydraulischen Eigenschaften von Salzgrusversatz im fortgeschrittenen Kompaktionsstadium bei sehr geringem Lösungsangebot ausreichend genau quantifiziert werden können, um einen belastbaren Sicherheitsnachweis führen zu können.“*

Die Ergebnisse des F&E-Projektes REPOPERM (2016) weisen nochmals auf die besondere Bedeutung von Porositäten < 3% für thermo-hydraulisch-mechanische Prozesse hin. Nach Untersuchungen von Probekörpern wurde festgestellt, dass bei einer Porosität von > 5% von einem vollständig ausgebildeten Porennetzwerk im Versatz ausgegangen werden muss. Für Porositäten von $\leq 1\%$ wird vermutet, dass nur ein wenig effektives oder gar kein Porennetzwerk mehr auftritt.

Insgesamt bestehen noch Fragen zu den wesentlichen hydraulischen Eigenschaften des hoch kompaktierten Salzgrusversatzes bei sehr kleinen Porositäten, die noch nicht befriedigend gelöst sind. Das entsprechende Prozessverständnis ist noch unzureichend. Zusammengefasst resultiert daraus eine höchstens mäßige Prognostizierbarkeit.

Die Arbeitsgruppe Lux et al. (2017) zeigt im Rahmen von Entria Möglichkeiten auf, wie mittels TH2M-basierter multiphysikalischer Modellierung und Simulation von Referenztiefenlagersystemen im Salinar- und Tonsteingebirge Verbesserungen der Robustheit wichtiger Sicherheitsfunktionen im Hinblick auf die Entwicklung von Bewertungsgrundlagen für den Vergleich von Entsorgungsoptionen erreicht werden können. Hierbei spielt insbesondere die Simulation von Fluidströmen und ihre sicherheitliche Bedeutung eine wichtige Rolle.

Ergebnis: Das Vertrauen in die Prognostizierbarkeit von Permeabilität und Porosität von Salzversatz ist für alle Wirkzeiträume mäßig (jeweils Bewertungsstufe 3)

(3) Prognostizierbarkeit der zukünftigen Diffusivität im Salzversatz

Da die Diffusivität im lösungserfüllten Versatz von der Permeabilität und der Porosität des Versatzes abhängt, deren zukünftige Entwicklung derzeit aber nicht mit genügender Sicherheit bestimmt werden kann (s.o. 1+2), ist die Prognostizierbarkeit und Charakterisierbarkeit der Diffusivität ebenfalls nur mit mäßig zu bewerten. Insbesondere für kleine Porositäten ist noch nicht ausreichend geklärt, mit welchen Diffusionskoeffizienten die hydraulischen Eigenschaften von Salzgrus beschrieben werden können (ESK 2016).

Ergebnis: Das Vertrauen in die Prognostizierbarkeit der Diffusivität von Salzversatz ist für alle Wirkzeiträume mäßig (jeweils Bewertungsstufe 3)

(4) Prognostizierbarkeit der Löslichkeitsgrenzen im Salzversatzes

Der in den Porenräumen vorhandene Sauerstoff wird durch die Korrosion der Abfallbehälter (Eisen) relativ schnell aufgebraucht, so dass sich reduzierende Bedingungen einstellen, bei denen Wasserstoff freigesetzt wird. Nach GRS (2010-2b) wird Wasserstoff nach Überschreiten der Sättigungsgrenze als Gasphase vorliegen. Das Redoxpaar H_2/H_2O ist allerdings nicht sehr reaktiv, woraus folgt, dass der Wasserstoff sich nicht an den chemischen Reaktionen beteiligt und eher als inert anzusehen ist.

Wenn kein Lösungszutritt in den ewG stattfindet, führt der korrosionsbedingte Entzug des Lösungsmittels zur Hinfälligkeit der Lösungsgrenzen. Bei Annahme eines Zuflusses von Lösungsmittel in den ewG können die Löslichkeitsgrenzen für Radionuklide mittels geochemischen Modellrechnungen trotz Unsicherheiten bei thermodynamischen Daten bestimmt werden. Obwohl die Charakterisierbarkeit der tatsächlichen Höhe der Löslichkeit nur als mäßig einzustufen ist, so lassen sich unter Annahme realistischer Bedingungen zukünftige maximale Löslichkeitsgrenzwerte prognostizieren. Das dafür erforderliche Prozessverständnis wird als ausreichend hoch angesehen.

Insgesamt ist das Prozessverständnis zur Prognostizierbarkeit der Löslichkeitsgrenzen als hoch anzusehen.

Ergebnis: Das Vertrauen in die Prognostizierbarkeit der Löslichkeitsgrenzen im Salzversatz ist für alle Wirkzeiträume hoch (jeweils Bewertungsstufe 4).

(5) Prognostizierbarkeit der Sorption im Salzversatz

Der Aspekt besitzt bei Salz keine Bedeutung und wird deshalb nicht bewertet.

B.3.2 Vertrauen in die Prognostizierbarkeit von Bentonitversatz bei Lagerung in Tonstein

(1 + 2) Prognostizierbarkeit von Permeabilität und Porosität des Bentonitversatzes

Die Aufsättigung des Bentonitversatzes führt zu seiner Quellung und damit zu einer Volumenvergrößerung, die im Zusammenspiel mit der Konvergenz des Wirtsgesteins eine deutliche Verringerung der Permeabilität und der Porosität des Bentonits bedingt. Man geht heute von einer Endpermeabilität des Bentonits von $< 10^{-19} \text{ m}^2$ aus. Nach Einbau und Aufsättigung des Bentonits werden die durch Auflockerungen des Gebirges erhöhten Porositätswerte (bis 40% bei Bentonitversatz) wieder auf ihren ursprünglichen geringeren Wert von einigen wenigen Prozent zurückgehen. Dies gilt auch für die gestörten Zonen im Bereich der Hohlraumkonturen; hier kommt es zur Selbstabdichtung. Insgesamt ist dadurch von einer diffusiven Stoffausbreitung im Bereich des Versatzes und der Störungszone auszugehen. Die Zeitdauer bis zum Erreichen dieses Zustandes wird nach heutigem Kenntnisstand von mehreren hundert Jahren (GRS 2010-2b) bis zu einigen tausend Jahren (ESK 2016) dauern. Das Prozessverständnis für diese Entwicklung ist hoch.

Ergebnis: Das Vertrauen in die Prognostizierbarkeit von Permeabilität und Porosität von Bentonitversatz ist für alle Wirkzeiträume hoch (jeweils Bewertungsstufe 4)

(3) Prognostizierbarkeit der Diffusivität im Bentonitversatz

Der Versatz nimmt nach seiner Aufsättigung in spätestens einigen tausend Jahren neben Permeabilitäten und Porositäten auch Diffusivitäten an, die denen des Wirtsgesteins gleichen. Das erforderliche Prozessverständnis wird als ausreichend hoch angesehen (GRS 2010-2b).

Ergebnis: Das Vertrauen in die Prognostizierbarkeit der Diffusivität im Bentonitversatz ist für alle Wirkzeiträume hoch (jeweils Bewertungsstufe 4).

(4) Prognostizierbarkeit der Löslichkeitsgrenzen im Bentonitversatz

Die Löslichkeitslimiten sind v.a. von der Porenwasserzusammensetzung abhängig. In NAGRA NTB 14-03 (2014) wird am Beispiel des schweizer Opalinustons dargelegt, dass das Porenwasser im Bentonit hinsichtlich seines pH-Wertes und der Redox-Bedingungen gut gepuffert ist. Wegen der chemischen Ähnlichkeit zum Opalinuston (Beispiel Schweiz) ist diese Pufferung über lange Zeiträume gesichert. Deshalb haben der pH-Wert und die Redoxbedingungen im Porenwasser kaum Einfluss auf die Löslichkeit der Radionuklide im Nahfeld des Bentonits. Gleichfalls ist der Einfluss der Salinität auf die Löslichkeit der Radionuklide gering und beruht wesentlich auf dem Einfluss der Speziation. Eine erhöhte Salinität kann zur Komplexbildung einzelner Radionuklide führen und muss bei der Festlegung von Löslichkeitsdaten berücksichtigt werden. Anhand dieses Beispiels wird deutlich, dass auch unter anderen Bedingungen (z.B. norddeutsche Tonsteinvorkommen) bei guter Informationslage verlässliche Prognosen über die längerfristig zu erwartenden Löslichkeitsgrenzen im Bentonit bzw. Bentonit-Sand-Gemisch zu erwarten sind. Das entsprechende Prozessverständnis wird als ausreichend hoch angesehen.

Ergebnis: Das Vertrauen in die Prognostizierbarkeit der Löslichkeitsgrenzen im Bentonitversatz ist für alle drei Wirkzeiträume hoch (jeweils Bewertungsstufe 4).

(5) Prognostizierbarkeit der Sorptionseigenschaften im Bentonitversatz

Nach NAGRA NTB 14-03 (2014) wird die Sorption von Radionukliden im Bentonit des ewG durch den Verteilungskoeffizienten von Bentonitmineralen zu Porenwasser quantifiziert. Das Porenwasser ist im Versatz hinsichtlich pH-Wert und Redox-Bedingungen gut gepuffert. Diese Pufferung ist wegen der chemischen Ähnlichkeit zum umgebenden Tonstein (hier Bsp. Opalinuston Schweiz) gesichert. Deshalb haben der pH-Wert und die Redox-Bedingungen im Porenwasser des Opalinustons keinen signifikanten Einfluss auf die Sorption im Bentonit im Bereich des ewG (NAGRA NTB 14-03 – 2014). Weiterhin ist bekannt, dass die Sorption von Radionukliden, deren Sorption auf Kationenaustausch beruht, durch eine erhöhte Ionenstärke geschwächt werden kann. Dabei muss bei diesen Radionukliden die Sorption im Bentonit immer in Zusammenhang mit einem erhöhten Diffusionskoeffizienten betrachtet werden, der den Transport von Radionukliden mitbestimmt.

Die notwendigen standort- und tonsteinspezifischen Kenntnisse können an anderen Tonsteinstandorten gleichfalls ermittelt und berücksichtigt werden. Das Prozessverständnis wird deshalb als ausreichend hoch angesehen.

Ergebnis: Das Vertrauen in die Prognostizierbarkeit der Sorptionseigenschaften im Bentonitversatz ist für alle Wirkzeiträume hoch (jeweils Bewertungsstufe 4).

B.3.3 Zusammenfassende Bewertung des Vertrauens in die Prognostizierbarkeit der RSF-Parameter beim Versatz

Beide Wirtsgesteine unterscheiden sich hinsichtlich des wirkzeitabhängigen Vertrauens in die Prognostizierbarkeit der RSF-Parameter ihres Versatzes und damit auch der zugeordneten Sicherheitsfunktionen (s. Tab. B-4).

KOMPONENTE VERSATZ RSF-Parameter	Einstufung für Lagerung in Salz (steil- u. flachlagernd) Versatz: Salzgrus TE + TM			Einstufung für Lagerung in Ton- stein Versatz: Bentonit TE + TM		
	t < 1.000a	1.000 bis 10 ⁴ a	T > 10 ⁴ a	t < 1.000a	1.000 bis 10 ⁴ a	T > 10 ⁴ a
Wirkzeiträume						
Permeabilität	3	3	3	4	4	4
Porosität	3	3	3	4	4	4
Diffusivität	3	3	3	4	4	4
Löslichkeitsgrenzen	4	4	4	4	4	4
Sorption	n.b.	n.b.	n.b.	4	4	4

Tab. B-4: Zusammenfassung der zeitabhängigen Ergebnisse für das Vertrauen in die Prognostizierbarkeit der RSF-Parameter für den Versatz (TE: Endlager, TM: Tiefenlager mit Monitoring u. Vorkehrungen zur Rückholbarkeit, n.b.: nicht bewertet)

Steinsalz weist für die RSF-Parameter Permeabilität, Porosität und Diffusivität, die der Sicherheitsfunktion „Begrenzung/Verhinderung von Lösungsbewegung und Radionuklidtransport“ zugeordnet sind, ein mittleres Vertrauen auf. Grund hierfür ist die derzeitige Unsicherheit über das Erreichen einer ausreichend geringen Permeabilität und Porosität im Verlaufe des Kompaktionsprozesses des Salzgrusversatzes. Für den RSF-Parameter Löslichkeitsgrenzen weist der Salzgrusversatz ein hohes Vertrauen in seine Prognostizierbarkeit auf. Der Parameter Sorption wird bei Steinsalz nicht bewertet.

Das Vertrauen in die Prognostizierbarkeit des Bentonitversatzes ist höher als bei Salzgrusversatz. Alle RSF-Parameter zeigen ein hohes Vertrauen in die Prognostizierbarkeit. Wesentlicher Grund hierfür ist das Verhalten von Bentonit, bei dem man derzeit – anders als bei Salzgrus – von einem Kompaktions-Quellverhalten ausgehen kann, das mit hoher Wahrscheinlichkeit entsprechende Anforderungen erfüllen wird. Zudem ergibt die Bewertung für Bentonit das gleiche gute Ergebnis für die beiden anderen RSF-Parameter Löslichkeit und Sorption. Für beide besteht ein hohes Vertrauen in ihre Prognostizierbarkeit. Insgesamt ist das Vertrauen in die Prognostizierbarkeit von Bentonit als Versatz bei Lagerung in Tonstein eindeutig höher als das Vertrauen in Salzgrus bei Lagerung in Steinsalz.

Die Bewertungen umfassen alle drei ausgewiesenen Wirkzeiträume. Der Versatz ist aber insbesondere für Zeiträume > 10.000 Jahren von sehr hoher sicherheitsmäßiger Bedeutung (s. Bericht, Kap. 3). Eine zeitliche Differenzierung der Bewertung ergibt sich daraus nicht.

KOMPONENTE VERSATZ:		Salz (steil- u. flachlagernd)	Tonstein
Rückhaltende Sicherheitsfunktionen	zugehörige RSF-Parameter	Versatz Salzgrus TE + TM	Versatz Bentonit TE + TM
Begrenzung/Verhinderung v. Lösungsbewegung u. RN-Transport	Permeabilität	3	4
	Porosität		
	Diffusivität		
Begrenzung RN-Ausbreitung wg. Löslichkeitsgrenzen	Löslichkeitsgrenzen	4	4
Verzögerung der RN-Ausbreitung d. Sorption	Sorption	n.b.	4

Tab. B-5: Aggregierte Ergebnisse für die Bewertung des Vertrauens in die Prognostizierbarkeit der RSF-Parameter der Sicherheitsfunktionen des Versatzes (TE: Endlager, TM: Tiefenlager mit Monitoring u. Vorkehrungen zur Rückholbarkeit, n.b.: nicht bewertet)

In Tab. B-5 werden die aggregierten Ergebnisse der RSF-Parameter den Sicherheitsfunktionen des Versatzes zugeordnet. Der entscheidende Unterschied zwischen Salzgrusversatz und Bentonit zeigt bei der Sicherheitsfunktion „Begrenzung/Verhinderung von Lösungsbewegung und Radionuklidtransport“: Hier wird das Vertrauen in die Prognostizierbarkeit bei Bentonit deutlich höher bewertet als bei Salzgrus. Zudem weist Bentonit eine hohe Bewertung für die Sorption auf, wohingegen bei Salzgrus die entsprechende Funktion entfällt.

B.4 Bewertung der Auswirkungen interner Systementwicklungen auf die RSF-Parameter des Versatzes (Systemrobustheit)

In den folgenden Unterkapiteln werden die Auswirkungen der inneren Systementwicklungen auf die RSF-Parameter des Versatzes bewertet. Auf diese Weise kann die Systemrobustheit einzelner Sicherheitsfunktionen bzw. die Systemrobustheit ermittelt werden. Dabei beschränken wir uns auf die internen Gas- und Wärmeentwicklung des Endlagersystems. Sehr langfristige externe Einflüsse auf End- bzw. Tiefenlager werden anhand einer Kaltzeit beispielhaft bei der Komponente ewG (s. Anhang E) berücksichtigt.

Zu diesen internen Einflüssen zählen vor allem die Gas- und Wärmeentwicklung bei End- bzw. Tiefenlagerung, die Veränderungen der RSF-Parameter der Sicherheitsfunktionen der Systemkomponente Versatz mit sich bringen können. Das Ausmaß dieser Veränderungen ist ein Indikator für die jeweilige Systemrobustheit. **Systemrobustheit bedeutet somit die Unempfindlichkeit des Tiefenlagersystems gegenüber veränderten Randbedingungen, die sich aus der inneren und äußeren Standortentwicklung ergeben können** (z.B. Reaktionen auf Gasbildung oder auf Eisüberföhrung).

Dabei wird die Systemrobustheit reziprok, d.h. als Ausmaß der einwirkungsbedingten Veränderung des Parameterwertes, bewertet. Eine hohe Systemrobustheit ist dann gegeben, wenn die Änderung des Parameterwertes gering ist oder zur „sicheren Seite“ hin erfolgt, d.h. die Änderung

des Parameterwertes sich auf die Radionuklidrückhaltung innerhalb der betrachteten Endlagerkomponente „Versatz“ positiv auswirkt. Umgekehrt gilt das Gleiche. Entsprechend zeigen beispielsweise die Bewertungsstufen 4 bzw. 5 eine hohe bzw. sehr hohe Robustheit auf, die Bewertungsstufen 1 bzw. 2 eine sehr geringe bzw. geringe Robustheit auf.

Weitere damit zusammenhängende Gesichtspunkte werden in Anhang A, Kap. A.4, erläutert.

B.4.1 Auswirkungen von Gas und Wärme auf den Salzgrusversatz bei Lagerung im Steinsalz

(a+b) Salzgrusversatz: Auswirkungen von Gas und Wärme auf die RSF-Parameter Permeabilität und Porosität

Wegen des engen funktionalen Zusammenhangs zwischen Permeabilität und Porosität werden beide Größen zusammen behandelt.

Durch Konvergenz des Salzkörpers kommt es zur Kompaktion des Salzversatzes, was zu einer Reduktion der Permeabilität und Porosität führt. Ein **erhöhter Wärmeeintrag** wirkt sich nach GRS (2016) auf die Kompaktion von Salzgrus positiv aus, da die Kompaktionsrate infolge der Verringerung des Versatzwiderstandes bei einer Temperaturzunahme ansteigt. Durch eine höhere Kompaktionsrate nimmt die Porosität des Salzgruses schneller ab, und die thermischen Materialeigenschaften des Salzgruses wie die Wärmeleitfähigkeit sollen sich denen von Steinsalz annähern.

Allerdings zeigen die wenigen in-situ-Experimente zur Bestimmung der Permeabilitätsentwicklung unter Einfluss eines Wärmeeintrages (z.B. TSS Versuch in der Asse), dass die für die Tiefenlagerung erwünschten Ziele hinsichtlich einer Grenzporosität und Permeabilität dabei nicht erreicht werden konnten (GRS 2010-2b). Welcher Grad der Versatzkompaktion (Permeabilität, Porosität) als Endzustand im End- bzw. Tiefenlager tatsächlich erreicht werden kann, ist derzeit nicht abschließend zu beantworten. Daran ändert auch der positive Einfluss der Wärme auf die Kompaktion des Salzversatzes nichts, weil das Prozessverständnis hinsichtlich der erreichbaren Endpermeabilität und -porosität im Salzversatz derzeit nicht ausreicht.

In der Anfangsphase nimmt der Konvergenzprozess vor allem Einfluss auf den Aufbau des Porendrucks, da die Konvergenzraten wegen der anfänglich geringen Stützwirkung des Versatzes und der erhöhten Temperaturen hoch sind. Das Prozessverständnis hinsichtlich der erreichbaren Endpermeabilität im Salzversatz ist derzeit mäßig. Aufgrund dessen sind die realen Auswirkungen des **Gasdruckaufbaus**, d.h. die erreichbare Endpermeabilität bei dem im Endlagerbergwerk herrschendem Gasdruck, nicht genau bekannt. Gleiches gilt für die erreichbare Endporosität bei dem im End- bzw. Tiefenlagerbergwerk herrschendem Gasdruck.

Unsicherheiten bei der Erfassung des Temperatureinflusses implizieren zusätzlich Unsicherheiten bezüglich der Geschwindigkeit des Druckaufbaus der eingeschlossenen Gase und der Stärke und Richtung der Gasflüsse. Dies kann z. B. in Hinblick auf den frühen Transport kontaminierter Gase innerhalb des Tiefenlagers relevant sein. Die Geschwindigkeit und Höhe des Gasdruckaufbaus können aber auch wichtig sein, um ein eventuelles Eindringen von Lauge in das Endlager zu verhindern oder zu verzögern (GRS 2013c).

Im Bereich der Auflockerungszonen der mit Salzgrus verfüllten Strecken ist eine veränderte Situation gegeben. Beim Aufbau des Versatzwiderstandes bilden sich die erhöhten Permeabilitäten der Auflockerungszonen zurück und erreichen Werte $< 10^{-19} \text{ m}^2$, wie sie in der Asse an versetzten Be-

reichen oder am Dammjoch gemessen wurden GRS (2010-2b). Insgesamt werden die Auswirkungen des Gasdruckaufbaus als gering angesehen.

Ergebnis: Wegen des derzeit begrenzten Prozessverständnisses bezüglich des Einflusses von Gas und Wärme auf Permeabilität und Porosität wird die Gesamteinstufung der Auswirkungen der Systementwicklungen auf die Lösungs- und Gasporosität sowie die Permeabilität für alle Wirkzeiträume als mäßig bewertet (Bewertungsstufe 3). Auswirkungen der Wärme werden für $t > 10.000$ a nicht bewertet, da ursprüngliche Temperaturverteilung wieder hergestellt.

(c) Salzgrusversatz: Auswirkungen von Gas und Wärme auf den RSF-Parameter Diffusivität

Die Auswirkungen des beispielhaft angesetzten Ereignisses „**Gasbildung** mit Druckerhöhung im Porenraum“ auf die Diffusivität im lösungserfüllten Salzgrusversatz sind abhängig von der Entwicklung der Permeabilität und Porosität des Versatzes. Dazu liegt jedoch nur ein begrenztes Prozessverständnis vor (s.o. Abschnitt a+b). Aus diesem Grunde können die Auswirkungen der Systementwicklungen auf die Diffusivität im lösungserfüllten Salzversatz nur als mäßig eingestuft werden.

Hinsichtlich der Wärmeentwicklung sollen nach BMU (2010) durch Festlegung einer maximalen Grenztemperatur (Behälteroberfläche) Veränderungen im Nahfeld der Tiefenlagerbehälter mit Auswirkungen auf den ewG ausgeschlossen werden, so dass die Barrierewirkung des ewG nicht unzulässig beeinflusst wird. Unter dieser Voraussetzung wird die temporäre **Wärmeentwicklung** höchstens einen geringen Einfluss auf die Diffusivität im lösungserfüllten Salzversatz haben.

Ergebnis: Wegen des derzeit begrenzten Prozessverständnisses bezüglich des Einflusses von Gas auf die Diffusivität sind die Auswirkungen der Systementwicklungen auf die Diffusivität im lösungserfüllten Salzversatz für Gas als mäßig einzustufen (Bewertungsstufe 3) und für Wärme als gering (Bewertungsstufe 4). Auswirkungen der Wärme werden für $t > 10.000$ a nicht bewertet, da ursprüngliche Temperaturverteilung wieder hergestellt.

(d) Salzgrusversatz: Auswirkungen von Gas und Wärme auf den RSF-Parameter Löslichkeitsgrenzen

Durch Korrosion der ins End- bzw. Tiefenlager eingebrachten Metalle wird der Sauerstoff im Lager aufgebraucht, und es stellen sich reduzierende Verhältnisse ein. Der bei der Korrosion freigesetzte Wasserstoff wird nach Überschreiten der Sättigungsgrenze als **Gasphase** vorliegen. Nach GRS (2010-2b) wirkt das Redoxpaar H_2/H_2O nicht sehr reaktiv. Daraus ist abzuleiten, dass der Wasserstoff sich nicht an den chemischen Reaktionen beteiligt und als weitgehend inert anzusehen ist. Die Auswirkungen der Systementwicklungen werden daher als gering eingestuft. Das für diese Aussage erforderliche Prozessverständnis wird als ausreichend hoch angesehen.

Eine zeitweise **Temperaturerhöhung** im Salzgrusversatz kann - neben anderen Einflussfaktoren - eine Veränderung der Löslichkeitsgrenzen bewirken. Diese Auswirkung kann bei der im Rahmen von Entria durchgeführten generischen Betrachtungsweise und wegen komplexer multifaktorieller Einflüsse hier nicht bewertet werden.

Ergebnis: Wegen des ausreichenden Prozessverständnisses sind die Auswirkungen der Systementwicklung Gasdruckaufbau auf die Löslichkeitsgrenzen im Salzversatz als gering einzustufen (Bewertungsstufe 4). Die Auswirkungen der Wärmeentwicklung werden nicht bewertet, da ursprüngliche Temperaturverteilung wieder hergestellt.

(e) Salzgrusversatz: Auswirkungen von Gas und Wärme auf den RSF-Parameter Sorption

Ist bei Salz ohne Bedeutung; deshalb keine Bewertung.

B.4.2 Auswirkungen von Gas und Wärme auf den Bentonitversatz bei Lagerung in Tonstein

(a + b) Bentonitversatz: Auswirkungen von Gas und Wärme auf die RSF-Parameter Permeabilität und Porosität

Die Korrosion von Metallen im End- bzw. Tiefenlager führt zur **Gasbildung**. Dadurch erfolgt ein Druckaufbau im Porenraum des Versatzes und an den Konturen des Tiefenlagerbergwerks zum ewG, der zu einer Reduzierung der Konvergenzraten des ewG und bei Überschreitung des Gebirgsdrucks zur Ausbildung von Sekundärpermeabilitäten führen kann.

Nach GRS (2010-2b) wirkt sich der in Folge der Gasbildung hervorgerufene Gasdruck auf die Permeabilitätsentwicklung des Versatzes für Lösungen nur unwesentlich aus. Nach Aufsättigung des Versatzes, die je nach spezifischen Bedingungen von einigen hundert Jahren bis zu zweitausend Jahren dauern kann (Burlaka 2016), wird anschließend dort eine Permeabilität von $< 10^{-19} \text{ m}^2$ vorherrschen. Da vom Einschluss der Radionuklide in den Behältern über mindestens 1.000 Jahre ausgegangen wird (vgl. Anhang A), ist die konvergenzbedingte Verzögerung der Abnahme der Permeabilität durch den Einfluss des Gasdrucks für den **lösungsgetragenen Transport** von Radionukliden als gering einzustufen. Das für diese Aussage erforderliche Prozessverständnis wird als ausreichend hoch angesehen. Auswirkungen des Ereignisses auf die **Gaspermeabilität** können nicht ausgeschlossen werden. Sie werden jedoch im Hinblick auf die rückhaltenden Eigenschaften des Versatzes als gering eingestuft, da die Ausbildung dilatanter Gaswegsamkeiten nicht erwartet wird. Das für diese Aussage erforderliche Prozessverständnis wird als ausreichend hoch angesehen.

Für die **Porosität** gelten die gleichen Einschätzungen wie für die Permeabilität, da beide Parameter funktional zusammenhängen. Eine relevante Erhöhung der Porosität des Versatzes durch Druckerhöhung aufgrund der Gasbildung ist nicht zu erwarten. Ebenso kann ein Druckniveau ausgeschlossen werden, bei dem es zu einem Frac-Riss durch den Versatz kommt und singuläre hohe Porositäten für Lösungen unterstellt werden müssen. Bei Überschreiten des Gaseindringdruckes bilden sich sekundäre gasverfügbare Porositäten aus, die den Gastransport auf Mikrorissen ermöglichen und so zum Druckabbau beitragen. Auswirkungen des Gasdruckaufbaus auf die Lösungs- und die gasverfügbare Porosität können nicht ausgeschlossen werden. Sie werden jedoch im Hinblick auf die rückhaltenden Eigenschaften des Versatzes als gering eingestuft. Das für diese Aussage erforderliche Prozessverständnis wird als ausreichend hoch angesehen.

Bei der Auflockerungszone muss man den Effekt der Selbstabdichtung berücksichtigen. Beim Aufbau des Versatzwiderstandes bilden sich die erhöhten Porositäten zurück und erreichen Werte, die in etwa denen des unverritzten Tonsteins entsprechen (GRS 2010-2b). Das erforderliche Pro-

zessverständnis wird als ausreichend hoch angesehen. Insgesamt werden die Auswirkungen des Gasdruckaufbaus als gering bewertet.

Die **Wärmeentwicklung** in einem End- bzw. Tiefenlager in Tonstein darf nicht zu Temperaturen führen, welche die sicherheitsrelevanten Eigenschaften der technischen und geologischen Barrieren signifikant beeinträchtigen (ENSI 2010). Diese Aussage gilt auch für den Versatz. Unter der Voraussetzung, dass ein entsprechendes gesteinspezifisches Temperaturkriterium für Tonstein festgelegt wird, sind keine signifikanten Auswirkungen auf die **Permeabilität und die Porosität** des Bentonitversatzes zu erwarten.

Anhand einer Bewertung der in der einschlägigen Literatur vorliegenden Daten zur Wirkung der relevanten wärmeinduzierten Prozesse auf Materialeigenschaften des Wirtsgesteins und der Nahfeldbarrieren wurde in den Tiefenlagerkonzepten für die Endlagerstandortmodelle Tonstein-Nord und Tonstein-Süd im Rahmen des Projektes ANSICHT (2017) die Maximaltemperatur im Bentonitbuffer von 150°C vorgeschlagen. Hierfür berücksichtigt wurden sämtliche Effekte, die thermisch induziert oder stark temperaturabhängig sind wie z.B. thermische Expansion/Kontraktion des Tonsteins, mechanische und hydraulische Gesteinseigenschaften, Dehydrierung quellfähiger Tonminerale, Erzeugung hydraulischer Gradienten, Verdampfen von Wasser oder mikrobielle Aktivitäten. Die meisten aufgeführten Effekte sind zudem im betrachteten Temperaturbereich (20 – 150°C) vernachlässigbar.

Ergebnis: Die Auswirkungen der Systementwicklungen sowohl für Lösungen als auch für Gase auf die Permeabilität und die Porosität des Bentonitversatzes sind für alle Wirkzeiträume insgesamt als gering einzustufen (Bewertungsstufe 4). Die Auswirkungen der Wärmeentwicklung werden für den Wirkzeitraum $t > 10^4$ Jahre nicht bewertet, da die ursprüngliche Temperaturverteilung wieder hergestellt ist.

(c) Bentonitversatz: Auswirkungen von Gas und Wärme auf den RSF-Parameter Diffusivität

Nach GRS (2010-2b) nimmt der Versatz nach seiner Aufsättigung (Dauer: mehrere hundert bis zu 2.000 Jahren) Werte für die Permeabilitäten und Porositäten sowie speziell die Diffusivitäten an, die dem Wirtsgestein ähnlich sind. Das durch **Gasentwicklung** sich einstellende Druckniveau hat keinen wesentlichen Einfluss auf diese Verhältnisse. Das für diese Aussage erforderliche Prozessverständnis wird als ausreichend hoch angesehen. Die Auswirkungen der Systementwicklungen werden als gering eingestuft. Gleiches darf für die Auswirkungen des zeitlich begrenzten **Wärmeintrags** auf die Diffusivität im Bentonitversatz angenommen werden.

Ergebnis: Die Auswirkungen der Systementwicklungen Gas und Wärme auf die Diffusivität des Bentonitversatzes sind für alle Wirkzeiträume als gering einzustufen (Bewertungsstufe 4). Die Auswirkungen der Wärmeentwicklung werden für den Wirkzeitraum $t > 10^4$ Jahre nicht bewertet, da die ursprüngliche Temperaturverteilung wieder hergestellt ist.

(d) Bentonitversatz: Auswirkungen von Gas und Wärme auf den RSF-Parameter Löslichkeitsgrenzen

Durch Korrosion der ins End- bzw. Tiefenlager eingebrachten Metalle wird der Sauerstoff im Lager aufgebraucht, und es stellen sich reduzierende Verhältnisse ein. Der bei der Korrosion freigesetzte Wasserstoff wird nach Überschreiten der Sättigungsgrenze als **Gasphase** vorliegen. Nach GRS (2010-2b) wirkt das Redoxpaar H_2/H_2O nicht sehr reaktiv. Daraus ist abzuleiten, dass der Wasser-

stoff sich nicht an den chemischen Reaktionen beteiligt und als weitgehend inert anzusehen ist. Die Auswirkungen der Systementwicklungen auf die RFS-Parameter werden daher als gering eingestuft. Das für diese Aussage erforderliche Prozessverständnis wird als ausreichend hoch angesehen.

Eine zeitweise **Temperaturerhöhung** im Bentonitversatz kann - neben anderen Einflussfaktoren - eine Veränderung der Löslichkeitsgrenzen bewirken. Dieser Einfluss alleine kann bei der im Rahmen von Entria durchgeführten generischen Betrachtungsweise wegen der vielfältigen und komplexen Einflüsse (vgl. beispielweise GRS 2016) nicht abschließend bewertet werden.

Ergebnis: Die Auswirkungen der Systementwicklungen Gas- und Wärmebildung auf die Löslichkeitsgrenzen des Bentonitversatzes sind für alle Wirkzeiträume als gering einzustufen (Bewertungsstufe 4). Die Auswirkungen der Wärmeentwicklung werden für den Wirkzeitraum $t > 10^4$ Jahre nicht bewertet, da die ursprüngliche Temperaturverteilung wieder hergestellt ist.

(e) Bentonitversatz: Auswirkungen von Gas und Wärme auf den RSF-Parameter Sorption

Nach GRS (2010-2b) hat die Erhöhung des **Porengasdrucks** nur einen geringen Einfluss auf die Lösungsporosität, weshalb ein Einfluss auf die Größe der reaktiven Mineraloberflächen auszuschließen ist. Ein Einfluss auf die weiteren Sorptionsparameter kann ebenfalls ausgeschlossen werden. Der Gasdruckaufbau hat folglich keinen Einfluss auf die Sorptionseigenschaften des Bentonitversatzes. Das für diese Aussage erforderliche Prozessverständnis wird als ausreichend hoch angesehen. Die Auswirkungen der Systementwicklungen werden als sehr gering eingestuft.

Der zeitlich begrenzte **Wärmeeintrag** in den Bentonitversatz hat Auswirkungen auf die Sorptionseigenschaften der Tonminerale. Allerdings ist nach GRS (2016) die Datenlage nur auf wenige Radionuklide bzw. Radionuklidanaloga sowie Minerale begrenzt und somit unvollständig. Dieser Mangel wird auch im Projekt ANSICHT (2017) formuliert.

Mengel (2006) hat die verfügbaren experimentellen Daten zur Sorptionsfähigkeit verschiedener Tonminerale als Funktion der Temperatur für Tonsteine des Apt (Kreide, N-Deutschland) zusammengetragen. Dabei wird deutlich, dass für Europium, Nickel und die Gruppe der dreiwertigen Transurane mit einer erhöhten Sorption gerechnet werden kann, wenn sich die Temperatur des Tonsteins erhöht. Allein für Cäsium ist eine Verringerung der Sorptionsfähigkeit zu erwarten. Insgesamt werden die Sorptionsfähigkeit und damit das Rückhaltevermögen für die betrachteten Radionuklide - mit Ausnahme des Cäsiums - mit steigender Temperatur vergrößert.

Ergebnis: Die Auswirkungen der Systementwicklungen Gas und Wärme auf die Sorption des Bentonitversatzes sind für alle Wirkzeiträume als sehr gering einzustufen (Bewertungsstufe 5). Die Auswirkungen der Wärmeentwicklung werden für den Wirkzeitraum $t > 10^4$ Jahre nicht bewertet, da die ursprüngliche Temperaturverteilung wieder hergestellt ist.

B.4.3 Zusammenfassende Bewertung der Auswirkungen von Gas und Wärme auf den Versatz

Es zeigt sich (s. Tab. B-6), dass die Auswirkungen der Systementwicklungen Gas und Wärme auf die einzelnen RSF-Parameter des Bentonitversatzes generell als gering bzw. für den RSF-Parameter Sorption mit Ausnahme des Zeitraums $t < 1.000$ Jahre sehr gering zu bewerten sind. Die Auswirkungen für Steinsalz werden überwiegend als mäßig bewertet; lediglich für Gas werden die Auswirkungen auf die Löslichkeitsgrenzen als gering bewertet.

Nicht bewertet werden die Auswirkungen der Wärmeentwicklung auf alle RSF-Parameter für $t > 10^4$ Jahre, da in diesem Zeitraum die durch die Abfälle verursachte Temperaturerhöhung schon wieder auf das ursprünglichen Niveau abgefallen ist. Nicht bewertet wurden auch der Einfluss der Systementwicklungen Gas und Wärme auf die Sorption bei Salz, weil diese hier ohne Bedeutung ist. Zudem konnten bei Salzversatz und Bentonit die Auswirkungen von Wärme auf die Löslichkeitsgrenzen wegen des generischen Ansatzes bei Entria nicht bewertet werden.

KOMPONENTE VERSATZ: Auswirkung der innerer System- entwicklungen „Gas“ und „Wär- me“ auf die RSF- Parameter	Einstufung Steinsalz (steil- und flachlagernd)						Einstufung Tonstein					
	Versatz: Salzgrus						Versatz: Bentonit					
	TE + TM						TE + TM					
Wirkzeiträume	$t < 1.000a$		1.000 bis $10^4 a$		$T > 10^4 a$		$t < 1.000a$		1.000 bis $10^4 a$		$T > 10^4 a$	
	G	W	G	W	G	W	G	W	G	W	G	W
Permeabilität und Porosität	3	3	3	3	3	n.b.	4	4	4	4	4	n.b.
Diffusivität	3	4	3	4	3	n.b.	4	4	4	4	4	n.b.
Löslichkeitsgrenzen	4	n.b.	4	n.b.	4	n.b.	4	n.b.	4	n.b.	4	n.b.
Sorption	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	4	5	5	5	5	n.b.

Tab. B-6: Bewertung der ausgewählten zeitabhängigen Systementwicklungen Gas (G) und Wärme (W) auf die RSF-Parameter der Komponente Versatz (TE: Endlager, TM: Tiefenlager mit Monitoring u. Vorkehrungen zur Rückholbarkeit; 5 sehr geringe Auswirkungen bis 1 sehr starke Auswirkungen; n.b. = nicht bewertet)

Aggregiert man die Einzelbewertungen der RSF-Parameter (s. Tab. B-7) für Salzgrus und Bentonit auf der Ebene der radionuklidrückhaltenden Sicherheitsfunktionen des Versatzes, erkennt man, dass die Auswirkungen der Systementwicklungen Gas und Wärme auf die zugehörigen Sicherheitsfunktionen für Bentonit gering sind. Für Salzgrus sind die Auswirkungen der Systementwicklungen Gas und Wärme auf die zugehörigen Sicherheitsfunktionen des Versatzes mäßig. Die Verzögerung der Radionuklidausbreitung durch Sorption ist hier nicht zu bewerten.

Radionuklidrückhaltende Sicherheitsfunktionen des Versatzes	RSF-Parameter	Salz-steil- u. flachlagernd (Versatz Salzgrus)		Tonstein (Versatz Bentonit)	
		G	W	G	W
Begrenzung/Verhinderung v. Lösungsbewegung u. RN-Transport	Permeabilität	3	3	4	4
	Porosität				
	Diffusivität				
Begrenzung RN-Ausbreitung wg. Löslichkeitsgrenzen	Löslichkeitsgrenzen	4	n.b.	4	n.b.
Verzögerung der RN-Ausbreitung d. Sorption	Sorption	n.b.	n.b.	4	5

Tab. B-7: Aggregierte Ergebnisse für die ausgewählten Systementwicklungen Gas (G) und Wärme (W) auf die RSF-Parameter und die zugehörigen Sicherheitsfunktionen der Komponente Versatz (TE: Endlager, TM: Tiefenlager mit Monitoring u. Vorkehrungen zur Rückholbarkeit; 5 sehr geringe Auswirkungen bis 1 sehr starke Auswirkungen; n.b. = nicht bewertet)

B.5 Vertrauen in die Erfüllung sicherheitskonzeptioneller Auslegungsanforderungen an den Versatz

In diesem Kapitel wird geprüft, in welchem Verhältnis die RSF-Parameter zu den auslegungsbedingten Mindestanforderungen stehen. Im Ergebnis führt dies zur Bewertung des Vertrauens der RSF-Parameter in die Erfüllung der Auslegungsanforderungen, woraus sich Hinweise zur Robustheit der einzelnen RSF-Parameter ergeben.

In einem abschließenden Schritt (s. Kap. B.6) werden die Einzelbewertungen der Robustheiten aller untersuchten RSF-Parameter für alle Sicherheitsfunktionen der Komponente Versatz aggregiert und zu einem Gesamturteil der Robustheit der Sicherheitsfunktionen der Komponente geführt. Dieses Ergebnis ist eine wesentliche Grundlage für die Identifizierung möglicher Robustheitsdefizite der Referenzmodelle (s. Kap. 6.2.5 u. 7 Bericht).

B.5.1 Erfüllung der Auslegungsanforderungen an den Salzgrusversatz bei Lagerung in Steinsalz

(a + b) Auslegungsanforderungen an Permeabilität und Porosität des Salzversatzes

Die zentrale Anforderung an die langfristige Versatzpermeabilität ist nach GRS (2010-2b) die Unterschreitung des Parameterwertes 10^{-19} m^2 , da unter dieser Bedingung ein diffusionsdominiertes System vorherrscht und die Advektion vernachlässigbar ist. Eine Auslegungsanforderung an die Porosität existiert nicht, eine Endporosität von $< 1\%$ wird jedoch angestrebt (s. Kap. B.3.1). Diese Porosität wird derzeit noch nicht erreicht.

Da Porosität und Permeabilität als physikalisch verbundene Größen anzusehen sind, können sie zusammen bewertet werden. Es zeigt sich, dass die Prognose der Permeabilität und Porosität

derzeit mit erheblichen Unsicherheiten verbunden ist (s. Kap. B.3.1). Diese Unsicherheiten gelten auch bei Berücksichtigung der Systemauswirkungen von Gas und Wärme auf den Salzversatz (s. Kap. B.4.1).

Ergebnis: Es besteht ein mäßig hohes Vertrauen (Bewertungsstufe 3) darin, ob die Anforderungen an die Permeabilität und die Porosität für alle Wirkzeiträume erreicht werden können (für Zeiträume ≤ 1.000 Jahre ist dies sicherheitskonzeptionell nicht erforderlich).

(c) Auslegungsanforderungen an die Diffusivität des Salzversatzes

Möglichst geringe Porendiffusionskoeffizienten stellen eine generelle Anforderung an den Versatz dar. Die Auslegungsanforderung an die Diffusionskonstanten der Radionuklide mit $< 5 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ (GRS 2010-2b) beruht darauf, dass der Versatz durch Konvergenz quasi die Qualität des Wirtsgesteins erreicht. Auch hier gilt, dass unklar ist, ob und wann eine Endporosität $< 1 \%$ im Salzgrusversatz erreicht werden wird (s.o.). Ob die geforderten Diffusionskonstanten erreicht werden können, ist derzeit noch offen.

Ergebnis: Es besteht ein mäßig hohes Vertrauen (Bewertungsstufe 3) darin, ob die Anforderungen an die Diffusivität für alle Wirkzeiträume erreicht werden können.

(d) Auslegungsanforderungen an die Löslichkeitsgrenzen des Salzversatzes

Quantitative Auslegungsanforderungen existieren nicht. Da die Prognose der maximalen Löslichkeitsgrenzen recht sicher ist (s. Kap. B.3.2), besteht ein hohes Vertrauen in die Erfüllung entsprechend zu formulierender Auslegungsanforderungen.

Ergebnis: Es besteht ein hohes Vertrauen (Bewertungsstufe 4) darin, ob die Anforderungen an die Löslichkeitsgrenzen für alle Wirkzeiträume erreicht werden können.

(e) Auslegungsanforderungen an die Sorption des Salzversatzes

Ist hier nicht von Bedeutung. Eine Auslegungsanforderung existiert nicht. Eine Bewertung findet nicht statt.

B.5.2 Erfüllung der Auslegungsanforderungen an den Bentonitversatz bei Lagerung in Tonstein

(a + b) Auslegungsanforderungen an Permeabilität und Porosität des Bentonits

Als zentrale Anforderung gilt eine Permeabilität von $< 10^{-19} \text{ m/s}$, da der Bentonitversatz dann als diffusionsdominiertes System gilt. Sowohl die Charakterisierung als auch die Prognostizierbarkeit und das Prozessverständnis der Werte für Bentonit (und die zugehörigen Auflockerungszonen) werden als hoch zuverlässig bewertet (s. Kap. B.3.2). Gleiches gilt für die mit der Permeabilität gekoppelte Porosität des Bentonits (s. B.3.2), für die aber keine quantitative Auslegungsanforderungen vorliegen. Die Auswirkungen der Ereignisse Gasbildung und Wärme auf den Bentonitversatz sind nur gering (s. Kap. B.4.2).

Die Erfüllung diesbezüglicher Auslegungsanforderungen wird als hoch zuverlässig angesehen. Lediglich im Zeitraum < 1.000 a wird dies nicht unbedingt der Fall sein, da Aufsättigung und Quellen des Bentonits und die parallel ablaufende Konvergenz des Gebirges als Gesamtprozess mehrere hundert Jahre bis zum Erreichen der Auslegungsanforderungen benötigen.

Ergebnis: Es besteht ein hohes Vertrauen (Bewertungsstufe 4) darin, dass die Anforderungen an die Permeabilität und die Porosität für Zeiträume > 1000 Jahre erreicht werden (für Zeiträume ≤ 1.000 Jahre ist das Vertrauen mäßig hoch, sicherheitskonzeptionell aber nicht unbedingt erforderlich).

(c) Auslegungsanforderungen an die Diffusivität des Bentonitversatzes

GRS (2010-2b) fordert nach Aufsättigung eine Diffusionskonstante von $D_p > 5 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ als Auslegungsanforderung. Wegen der guten Charakterisierbarkeit und Prognostizierbarkeit von Bentonit (s. Kap. B.3.2) und den geringen Auswirkungen von Gas und Wärme auf die Diffusivität (s. Kap. B.4.2) besteht ein hohes Vertrauen in das Erreichen der Auslegungsanforderung für Zeiträume > 1.000 a. Für Zeiträume < 1.000 a besteht nur ein mäßiges Vertrauen, da Aufsättigung und Quellen des Bentonits zusammen mit der konvergenzbedingten Kompaktion in diesem Zeitraum ablaufen.

Ergebnis: Es besteht ein hohes Vertrauen (Bewertungsstufe 4) darin, dass die Auslegungsanforderungen an die Diffusivität des Bentonitversatzes für den Zeitraum ≥ 1.000 Jahre erreicht werden. Für den Zeitraum $t < 1.000$ Jahre besteht ein mäßiges Vertrauen (3) in die Erfüllung der Auslegungsanforderung.

(d) Auslegungsanforderungen an die Löslichkeitsgrenzen im Bentonitversatz

Es existieren keine nuklidspezifischen Auslegungsanforderungen an die Löslichkeitsgrenzen im Bentonitversatz. Wegen der guten Prognostizierbarkeit von Bentonit (s. B.3.2) und der geringen Auswirkungen von Gas und Wärme (s. B.4.2) besteht ein hohes Vertrauen in das Erreichen denkbarer Auslegungsanforderung. Diese Bewertung wird noch gestützt von der guten Charakterisierbarkeit und Prognostizierbarkeit der Diffusivität des Versatzes im Ist-Zustand (s. B.2.2). Dabei gilt, dass die Prognose der maximalen Löslichkeitsgrenzen mit hoher Sicherheit möglich ist.

Ergebnis: Es besteht ein hohes Vertrauen (Bewertungsstufe 4) darin, dass die Auslegungsanforderungen an die Löslichkeitsgrenzen des Bentonitversatzes für alle Wirkzeiträume erreicht werden können.

(e) Auslegungsanforderungen an die Sorption im Bentonitversatz

Es existieren keine quantitativen Auslegungsanforderungen an die Sorptionseigenschaften des Versatzes. Es wird aber qualitativ gefordert, dass im Betonitversatz Sorptionseigenschaften vorliegen, die dem Wirtsgestein Tonstein entsprechen. Dies ist für kationische Radionuklide weitgehend erreichbar. Nach GRS (2010-2b) ist eine nahezu vollständige sorptionsbedingte Rückhaltung für kationische Radionuklide bei K_d -Werten $> 0,005 \text{ m}^3/\text{kg}$ an Tonstein gegeben. Dies zeigt, dass beim Bentonitversatz ähnliche K_d -Werte vorliegen und die Anforderungen an die Sorption mit großer Gewissheit erfüllt werden können.

Hinzu tritt, dass die Auswirkungen der Systementwicklungen Gas und Wärme auf die Sorption des Bentonitversatzes als sehr gering eingestuft werden (s. B.4.2) und das Vertrauen in seine Prognostizierbarkeit hoch ist.

Ergebnis: Es besteht ein hohes Vertrauen (Bewertungsstufe 4) darin, dass die Auslegungsanforderungen an die Sorption im Bentonitversatzes für alle Wirkzeiträume erreicht werden können.

B.5.3 Zusammenfassende Bewertung des Vertrauens in die sicherheitskonzeptionellen Anforderungen an den Versatz

Die Zusammenstellung in Tab. B-8 zeigt das Ausmaß des Vertrauens in die Erfüllung der Auslegungsanforderungen des Versatzes durch die RSF-Parameter. Für Salz zeigt sich ein mäßiges Vertrauen in die Erfüllung der Auslegungsanforderungen für die RSF-Parameter Permeabilität, Porosität und Diffusivität sowie ein hohes Vertrauen in die Erfüllung der Anforderungen hinsichtlich der Löslichkeitsgrenzen. Sorption wird bei Salz nicht bewertet.

Tonstein zeigt gegenüber Salz insgesamt ein höheres Vertrauen in die Erfüllung der Auslegungsanforderungen: Fast alle beurteilten RSF-Parameter zeigen ein hohes Vertrauen in die Erfüllung der jeweiligen Auslegungsanforderungen. Lediglich für den Zeitraum < 1.000 Jahre wird den RSF-Parametern Permeabilität, Porosität und Diffusivität ein nur mäßiges Vertrauen zugeschrieben. Grund dafür ist der in diesem Zeitraum ablaufende komplexe Prozess zwischen Aufsättigung und Schwellung des Bentonits sowie der Gebirgskonvergenz. Allerdings ist dieser Zeitraum bei Tonstein – ebenso wie bei Salz – sicherheitskonzeptionell von geringer Bedeutung für den Versatz, da die Sicherheit innerhalb dieses Zeitraumes durch den intakten Behälter gewährleistet werden soll (s. Anhang A).

Aggregiert man die Einzelbewertungen der RSF-Parameter (s. Tab. B-8) auf der Ebene der radionuklidrückhaltenden Sicherheitsfunktionen des Versatzes, erkennt man, dass das Vertrauen in die Auslegungsanforderungen bei Ton für alle Sicherheitsfunktionen höher ist als bei Salz. Eine wesentliche Ursache hierfür ist die Unklarheit über die tatsächlich erreichbare Versatzpermeabilität im Bereich sehr kleiner Porositäten ($\leq 1\%$) beim Salzversatz. Zudem besitzt Tonstein gegenüber Salz den Vorteil der Verzögerung der Radionuklidausbreitung durch Sorption.

Vertrauen in die Erfüllung der Auslegungsanforderungen der Komponente Versatz - RSF-Parameter	Einstufung Salz (steil- und flachlagernd)			Einstufung Tonstein		
	TE + TM			TE + TM		
	t < 1.000a	1.000 bis 10 ⁴ a	T > 10 ⁴ a	t < 1.000a	1.000 bis 10 ⁴ a	T > 10 ⁴ a
Permeabilität und Porosität	3	3	3	3	4	4
Diffusivität	3	3	3	3	4	4
Löslichkeitsgrenzen	4	4	4	4	4	4
Sorption	n.b.	n.b.	n.b.	4	4	4

Tab. B-8: Vertrauen in die wirkzeitabhängige Erfüllung der Auslegungsanforderungen der RSF-Parameter für den Versatz (TE: Endlager, TM: Tiefenlager mit Monitoring u. Vorkehrungen zur Rückholbarkeit, n.b.: nicht bewertet)

Bei den in Tab. B-9 dargestellten aggregierten Ergebnissen für die einzelnen Sicherheitsfunktionen muss beachtet werden, dass sie nur für Wirkzeiträume ab 1.000 Jahren gelten. Bis 1.000 Jahre sind die Sicherheitsfunktionen konzeptionell nicht notwendig (wenn auch gegebenenfalls von Vorteil).

Komponente VERSATZ Radionuklidrückhaltende Sicherheitsfunktionen des Versatzes	RSF-Parameter	Salz-steil- u. flachlagernd (Versatz Salzgrus)	Tonstein (Versatz Bentonit)
Begrenzung/Verhinderung v. Lösungsbewegung u. RN-Transport	Permeabilität	3	4
	Porosität		
	Diffusivität		
Begrenzung RN-Ausbreitung wg. Löslichkeitsgrenzen	Löslichkeitsgrenzen	3	4
Verzögerung der RN-Ausbreitung d. Sorption	Sorption	n.b.	5

Tab. B-9: Aggregierte Ergebnisse der Erfüllung der Auslegungsanforderungen an den Versatz für die RSF-Parameter bzw. die zugehörigen Sicherheitsfunktionen (n.b. = nicht bewertet)

B.6 Aggregation der Einzelbewertungen zur Robustheit der radionuklidrückhaltenden Sicherheitsfunktionen des Versatzes

In diesem letzten Arbeitsschritt werden die Robustheiten der radionuklidrückhaltenden Sicherheitsfunktionen der Systemkomponente Versatz (Salzgrus bzw. Bentonit) über die verschiedenen Wirkzeiträume durch Aggregation ermittelt. **Diese Robustheit lässt sich ausdrücken als Vertrauen in die Wirksamkeit der rückhaltenden Sicherheitsfunktionen der Komponente Versatz** für End- bzw. Tiefenlager in Salz und Tonstein über die zu betrachtenden Wirkzeiträume ($t < 1.000$ a, $t = 1.000$ bis 10.000 Jahre und $t > 10.000$ Jahre).

Aufgrund der engen Verflechtung von Abhängigkeiten ist eine **Kompensation** besserer oder schlechterer Bewertungen von Parametern nicht möglich, entscheidend für die Gesamtbewertung ist der Parameter, zu dem das **geringste Vertrauen** in die Erfüllung der Auslegungsanforderungen besteht. Die Ermittlung der Robustheit geschieht durch Aggregation der RSF-Parameter der einzelnen Sicherheitsfunktionen (s. Tab. B-2, B-4, B-7-6, B-8) für die vier Bewertungsfelder (s. Kap. B.2 bis B.5) hin zu den Sicherheitsfunktionen des Versatzes (s. Tab. B-3, B-5, B-7 und B-9).

Das Ergebnis besteht in der Robustheit der dem Versatz zugeordneten Sicherheitsfunktionen für Lagerung in Salz- und Tonstein für die unterschiedlichen Wirkzeiträume (s. Tab. B-10). Eine weitere Aggregation über die Ebene der Sicherheitsfunktionen hinaus ist nicht sinnvoll, weil dadurch keine weiteren Informationen gewonnen werden, vielmehr der Detailblick auf die Sicherheitsfunktionen verloren geht.

Robustheit der Systemkomponente VERSATZ						
Radionuklidrückhaltende Sicherheitsfunktionen	Salz (steile u. flache Lagerung) Versatz Salzgrus TE + TM			Tonstein Versatz Bentonit TE + TM		
Wirkzeiträume	$t < 1.000$ a	1.000 bis 10^4 a	$t > 10^4$ a	$t < 1.000$ a	1.000 bis 10^4 a	$t > 10^4$ a
Begrenzung/Verhinderung Lösungsbewegung u. RN-Transport	Ro3	Ro3	Ro3	Ro3	Ro4	Ro4
Begrenzung RN-Ausbreitung wegen Löslichkeitsgrenzen	Ro4	Ro4	Ro4	Ro4	Ro4	Ro4
Verzögerte RN-Ausbreitung durch Sorption	n.b.	n.b.	n.b.	Ro4	Ro4	Ro4

Tab B-10: Zusammenfassende Bewertung der Robustheit (Ro) der rückhaltenden Sicherheitsfunktionen für die Systemkomponente Versatz für unterschiedliche Wirkzeiträume (TE: Endlager, TM: Tiefenlager mit Monitoring u. Vorkehrungen zur Rückholbarkeit, n.b.: nicht bewertet; Bewertung: 1 = vernachlässigbare/sehr geringe Robustheit bis 5 sehr hohe Robustheit, n.b.: nicht bewertet).

Hinweise zur Bewertung der drei radionuklidrückhaltenden Sicherheitsfunktionen des Versatzes:

a) Sicherheitsfunktion: Begrenzung/Verhinderung von Lösungsbewegung und Radionuklidtransport

Das Vertrauen in die **Charakterisierung des Ist-Zustandes** der zugeordneten RSF-Parameter ist für alle Gesteinsarten sowie das End- bzw. Tiefenlager gleich hoch und wird mit der Bewertungsstufe 4 bewertet. (s. Kap. B.2.3).

Die **Prognostizierbarkeit der RSF-Parameter** ergibt für End- bzw. Tiefenlager im Salzgestein nur eine mäßige Bewertung (Bewertungsstufe 3). Entscheidende Ursache hierfür ist, dass die hydraulischen Eigenschaften des Salzversatzes bei kleinen Porositäten derzeit nicht ausreichend belastbar quantifiziert werden können (s. Kap.B.3.1).

Bei Bentonitversatz gilt für Zeiträume > 1000 a ein hohes Vertrauen in die Prognostizierbarkeit (Bewertungsstufe 4), weil durch das Quellen des Bentonits in Verbindung mit der Gebirgskonvergenz die durch Auflockerung hervorgerufenen Poren- und Kluft Räume wieder auf ihre ursprünglichen Werte zurückgehen (s. Kap. B.3.2) In der Zeitspanne bis ca. 1.000 a läuft dieser Prozess noch ab, weshalb hier nur ein mäßiges Vertrauen in die Prognostizierbarkeit besteht (Bewertungsstufe 3).

Die **Auswirkungen der internen Systementwicklungen Gas und Wärme auf die RSF-Parameter** sind für Salzgrusversatz für den gesamten Wirkungszeitraum als mäßig zu bewerten (für Permeabilität, Porosität und Diffusivität), für Bentonit als gering (Bewertungsstufe 4). Für Zeiträume > 10⁵ Jahre sind die Auswirkungen der Wärmeentwicklung für beide Versatzarten ohne Belang, da sich die ursprüngliche Gebirgstemperatur wieder eingestellt hat. Ebenfalls nicht bewertet wurde der Einfluss der Wärme auf die Löslichkeitsgrenzen beider Versatzmaterialien (s. Kap. B.4.3). Insgesamt weist Bentonit eine höhere Systemrobustheit auf als Salzgrus.

Das **Vertrauen in die Erfüllung sicherheitskonzeptioneller Auslegungsanforderungen** an den Salzgrusversatz ist für End- bzw. Tiefenlager in Salzgestein für alle Zeiträume als mäßig zu bewerten (Bewertungsstufe 3). Auch hierbei ist die Unsicherheit über die erreichbare Endporosität entscheidend. Bei Tonstein gilt diese mäßige Bewertung nur für die Zeitspanne bis 1.000 a, für den darüber hinaus gehenden Zeitraum besteht jedoch ein hohes Vertrauen (Bewertungsstufe 4) in die Erfüllung der Anforderungen an den Bentonitversatz (s. Kap. B.5.2).

Die Ergebnisse in Tab. B-10 zeigen, dass für Salzgrusversatz nur eine mäßig hohe Systemrobustheit gegeben ist. Dies gilt für steile und flache Lagerung. Grund dafür ist die mäßige Prognostizierbarkeit und Charakterisierbarkeit der zukünftigen Entwicklung von Porosität, Permeabilität und damit zusammenhängend auch der Diffusivität (s. Kap. B.5.1).

Bei Bentonit ist eine hohe Systemrobustheit für t > 1.000 Jahre gegeben. Für Zeiten unter 1.000 a ist die Robustheit mäßig. Das liegt an der noch ablaufenden Quellung und Kompaktion des Bentonits, die erst am Ende des Zeitraums zur vollen Wirksamkeit des Versatzes führen.

b) Sicherheitsfunktion: Begrenzung der Radionuklid Ausbreitung wegen Löslichkeitsgrenzen

Das Vertrauen in die **Charakterisierung des Ist-Zustandes** des zugeordneten RSF-Parameters ist für alle Gesteinsarten sowie das End- bzw. Tiefenlager gleich hoch und wird mit der Bewertungsstufe 4 bewertet. (s. Kap. B.2.3).

Die **Prognostizierbarkeit der RSF-Parameters** ergibt für End- bzw. Tiefenlager im Salz- und Tongestein eine hohe Bewertung (Bewertungsstufe 4). Grund hierfür ist v.a., dass für beide Wirtsgestei-

ne unter Annahme realistischer Bedingungen die maximalen zukünftigen Löslichkeitsgrenzen ausreichend genau bestimmt werden können. (s. Kap. B.3.1 u. B.3.2).

Für den RSF-Parameter **Löslichkeitsgrenzen** wird der **Einfluss der systeminternen Entwicklungen Gas und Wärme** bei Bentonit und Salzgrus insgesamt als gering bewertet, wobei sich im Einzelfall differenzierte Bewertungen ergeben bzw. keine Bewertung vorgenommen werden kann. Nicht bewertet werden zum Beispiel die Auswirkungen der Wärmeentwicklung auf alle RSF-Parameter für $t > 10^4$ Jahre, da in diesem Zeitraum die durch die Abfälle verursachte Temperaturerhöhung schon wieder auf das ursprünglichen Niveau abgefallen ist. Zudem konnten bei Salzversatz und Bentonit die Auswirkungen von Wärme auf die Löslichkeitsgrenzen wegen des generischen Ansatzes bei Entria nicht bewertet werden.

Quantitative Anforderungen hinsichtlich der Löslichkeitsgrenzen bestehen derzeit nicht.

c) Verzögerte Radionuklidausbreitung durch Sorption

Das Vertrauen in die **Charakterisierung des Ist-Zustandes** der zugeordneten RSF-Parameter ist nur für ein End- bzw. Tiefenlager in Tonstein mit dem Versatzmaterial Bentonit von Bedeutung. Grundsätzlich ist die Charakterisierbarkeit der Sorption im gegenwärtigen Zustand nur bedingt für realistische Gegebenheiten möglich. Es wird aber davon ausgegangen, dass Versuche mit hoher Sicherheit eine Aussage zum Mindestbeitrag der Sorption zur Radionuklidrückhaltung ermöglichen. Deshalb wird die Charakterisierbarkeit der Sorption im Ist-Zustand als hoch (Bewertungsstufe 4) bewertet (s. Kap. B.2.2). Gleiches gilt auch für die **Prognostizierbarkeit** der Sorption an Bentonit sowie für die Erfüllung entsprechender **Auslegungsanforderungen**.

Der **Einfluss der Systementwicklungen Gas und Wärme auf die Sorption** führt bei Bentonit nur zu geringen bis sehr geringen Auswirkungen. Nicht bewertet wurde der Einfluss der Systementwicklungen Gas und Wärme auf die Sorption bei Salz, weil diese hier ohne Bedeutung sind (s. Kap. B.5.2).

Zusammenfassung (s. auch Tab. B-10):

Insgesamt zeigt sich bei Salzgrusversatz für End- und Tiefenlagerung in Salzgestein eine mittlere Robustheit für die radionuklidrückhaltende Sicherheitsfunktion (Begrenzung/Verhinderung Lösungsbewegung u. Radionuklidtransport) über die drei Wirkzeiträume. Wesentliche Ursache ist die derzeitige Unsicherheit hinsichtlich der Permeabilitäts- und Porositätsentwicklung des Versatzes im Verlaufe seiner Kompaktion. Dieses Ergebnis dominiert die Gesamtbewertung für Salzgrusversatz.

Das Versatzmaterial Bentonit bei End- und Tiefenlagerung in Tonstein weist für alle drei Sicherheitsfunktionen eine hohe Robustheit auf. Lediglich für den Zeitraum < 1.000 Jahre liegt die Robustheit bei einer mittleren Bewertung, weil in diesem Zeitraum die Aufsättigung und das Quellen des Bentonits sehr wahrscheinlich noch nicht in Zusammenhang mit der Gebirgskompaktion zu den erforderlichen geringen Permeabilitäts- und Porositätswerten geführt haben.

B.7 Quellen zu Anhang B

- ANSICHT (2017): Sicherheits und Nachweiskonzept für ein Endlager in Tongestein in Deutschland – Synthesebericht.- Koordinator: Jobmann, Michael, gemeinsame Bearbeitung durch GRS, BGR, DBEtec.- Auftraggeber: KIT (PTKA-WTE) FKZ: 02E11061A/B, Bericht TEC-19-2016-AB, Stand 30.03.2017.
- BMU (2010): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle, Stand 30. September 2010. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.
- Burlaka, V. (2016). 3D-Modellierungen zum gekoppelten Lösungs- und Gastransport im Endlager. In: Jobmann, M. (ed.): Spezifische Prozessanalysen, Projekt ANSICHT: Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein, DBE TECHNOLOGY GmbH, BGR, GRS, Peine, Hannover, Braunschweig.
- ENSI (2010): Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI): Sicherheitstechnisches Gutachten zum Vorschlag geologischer Standortgebiete. Sachplan geologische Tiefenlager, Etappe 1, ENSI, 33/070, 196 S., Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI): Brugg, Januar 2010.
- ENTRIA-AB-03 (2015): Entria Arbeitsbericht-03 „Generische Tiefenlagermodelle mit Option zur Rückholung der radioaktiven Reststoffe: Geologische und Geotechnische Aspekte für die Auslegung“.- Bearbeiter: Stahlmann, J., Leon-Vargas, R., Mintzlaff, V.; Braunschweig, 2015.
- ESK – Entsorgungskommission (2016): Endlagerforschung in Deutschland - Anmerkungen zu Forschungsinhalten und Forschungssteuerung.- Empfehlung der ESK v. 12. Mai 2016.
- GRS - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (2016): Wärmeentwicklung / Gesteinsverträglichkeit.- Ausarbeitung im Auftrag der AG 3 der Endlagerkommission (K-MAT 64), Bearbeiter: A. Meleshyn T. Weyand G. Bracke H. Kull K. Wieczorek.- Mai 2016.
- GRS - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (2013a): Synthesebericht für die vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben.- Bericht zum Arbeitspaket 13, Autoren: Klaus Fischer- Appelt, Bruno Baltes, Dieter Buhmann, Jürgen Larue, Jörg Mönig.- Bericht GRS-290, März 2013.
- GRS - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (2013b): Forschungs- und Entwicklungsbedarf auf Basis der Erkenntnisse aus der VSG sowie Empfehlungen.- Bericht zum Arbeitspaket 14, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, Autoren: Bruno Thomauske, Frank Charlier.- Bericht GRS-304, März 2013.
- GRS - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (2013c): Die vereinfachte Berechnung der Konvergenzrate salzgrusverfüllter Hohlräume im Steinsalz.- Autor: Navarro, Bericht GRS-290, März 2013.
- GRS - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (2012): Integritätsanalyse der geologischen Barriere, Bericht zum Arbeitspaket 9.1, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben.- Bearbeiter: Ingo Kock (GRS), Ralf Eickemeier (BGR), Gerd Frieling (GRS), Stefan Heusermann (BGR), Markus Knauth (IfG), Wolfgang Minkley (IfG), Martin Navarro (GRS), Hans-Konstantin Nipp (BGR), Peter Vogel (BGR).- Bericht GRS-286, Juli 2012, Corrigendum und Änderung der Vorbemerkung Dezember 2012.
- GRS – Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH (2010): Abwägungsmethodik für den Vergleich von Endlagersystemen in unterschiedlichen Wirtsgesteinsformationen. Anleitung zur Anwendung der Abwägungsmethodik.- Abschlussbericht zum Vorhaben 3607R02589

- „Evaluierung der Vorgehensweise“; Bericht GRS – A – 3536; Autoren: Fischer-Appelt, K. & Baltes, B., Dezember 2010, Köln.
- GRS – Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH (2010-2a): Bewertung der charakteristischen Parameter der rückhaltenden Sicherheitsfunktionen des Versatzes in der Restgrube.- Begleitbericht zum Vorhaben 3607R02589 VerSi „Evaluierung der Vorgehensweise“, Bericht GRS A 3536, (GRS 2010), Köln.
- GRS – Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH (2010-2b): Bewertung der charakteristischen Parameter der rückhaltenden Sicherheitsfunktionen des Versatzes in den Einlageungsbereichen.- Begleitbericht zum Vorhaben 3607R02589 VerSi „Evaluierung der Vorgehensweise“, Bericht GRS A 3536, (GRS 2010), Köln.
- GRS - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (2009): Restporosität und -permeabilität von kompaktierendem Salzgrus-Versatz in einem HAW-Endlager - Phase 1, Autoren: Kröhn, K.P., Stührenberg, D., Herklotz, M., Heemann, U., Lerch, C., Xie, M.- Bericht GRS-254, 266 S., 2009.
- ISIBEL (2008): Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW- Abschlussbericht, bearbeitet von GRS, BGR und DBE-Technology, Förderzeichen FKZ 02 E 10065 und 02 E 10055.- Braunschweig, Hannover, Peine.
- Lux, KH., Wolters, R., Zhao, J, Rutenberg, M, Feierabend, J., Pan, T. (2017): TH2M-basierte multiphysikalische Modellierung und Simulation von Referenz-Endlagersystemen im Salinar- und Tonsteingebirge ohne bzw. mit Implementierung einer Möglichkeit für ein direktes Monitoring des längerfristigen Systemverhaltens auch noch nach Verschluss der Einlagerungssohle. - Ein Beitrag zur Verbesserung der Robustheit von Sicherheitsfunktionen mit sehr hoher Relevanz im Hinblick auf die Entwicklung von Bewertungsgrundlagen zum Vergleich von Entsorgungsoptionen.- Arbeitsbericht der ENTRIA-Teilprojekte VP 5.1 und VP 5.2 sowie VP 6.7mod – Februar 2017, Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik, TU Clausthal, Stand Februar 2017.
- Mengel, K. (2006): Einfluss der Temperaturerhöhung auf die mineralogischen und anorganisch-chemischen Eigenschaften von Kreide-Tonformationen (Apt), Abschlussbericht Dezember 2006, Technische Universität Clausthal-Zellerfeld.
- NAGRA NTB 14-03 – Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (2014): SGT Etappe 2: Charakteristische Dosisintervalle und Unterlagen zur Bewertung der Barrierensysteme.- Wettingen, Dezember 2014.
- Popp, T, Salzer, K, Schulze, O, Stührenberg, D. (2012): Hydromechanische Eigenschaften von Salzgrusversatz – Synoptisches Prozessverständnis und Datenbasis.- Memorandum, Institut für Gebirgsmechanik Leipzig (IfG) und Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR).- (zitiert nach Bericht GRS-290, März 2013)
- REPOPERM Phase 1 (2009): Restporosität und -permeabilität von kompaktierendem Salzgrus-Versatz - Abschlussbericht des Verbundprojektes von GRS, EG und DBEtec.- Autoren: Klaus-Peter Kröhn (GRS), Dieter Stührenberg (BGR), Martin Herklotz (DBE TEC), Ulrich Heemann, (BGR), Christian Lerch (DBE TEC) & Mingliang Xie (GRS); GRS-Bericht 254, September 2009, Köln.
- REPOPERM Phase 2 (2016): Remaining porosity and permeability of compacted crushed rock salt backfill in a HLW repository - Final Report. Autoren: Jobmann, M., Müller, C., Schirmer, S., DBEtec, Peine.

Anhang C: Bestimmung der Robustheit der radionuklidrückhalten- den Sicherheitsfunktionen der Komponente Abdich- tung/Dämme

<u>Inhaltsverzeichnis:</u>	Seite
C.1 Einleitung	4
C.2 Vertrauen in die Charakterisierung der RSF-Parameter im Ist-Zustand	5
C.2.1 Ermittlung des Vertrauens in die Charakterisierung des Ist-Zustandes der RSF-Parameter von Salzbeton bei Lagerung in Salz	6
C.2.2 Ermittlung des Vertrauens in die Charakterisierung des Ist-Zustandes der RSF-Parameter bei Lagerung in Tonstein	7
C.2.3 Zusammenfassende Bewertung des Vertrauens in die Charakterisierbarkeit der RSF-Parameter der Abdichtungen für den Ist-Zustand	9
C.3 Vertrauen in die Prognostizierbarkeit der RSF-Parameter der Abdichtungen im Nachweiszeitraum	10
C.3.1 Vertrauen in die Prognostizierbarkeit der Salzbetonabdichtung bei Lagerung in Salz	11
C.3.2 Vertrauen in die Prognostizierbarkeit der Bentonitabdichtung bei Lagerung in Tonstein	12
C.3.3 Zusammenfassende Bewertung des Vertrauens in die Prognostizierbarkeit der RSF-Parameter der Abdichtung	13
C.4 Bewertung der Auswirkungen interner Systementwicklungen auf die RSF-Parameter der Komponente Abdichtung/Dämme (Systemrobustheit)	14
C.4.1 Auswirkungen von Gas und Wärme auf die Komponente Abdichtung aus Salzbeton	15
C.4.2 Auswirkungen von Gas und Wärme auf die Komponente Abdichtung aus Bentonit	17
C.4.3 Zusammenfassende Bewertung der Auswirkungen von Gas und Wärme auf die Komponente Abdichtung/Dämme	19
C.5 Vertrauen in die Erfüllung sicherheitskonzeptioneller Auslegungsanforderungen an Abdichtungen/Dammbauwerke	19

	Seite
C.5.1	Erfüllung der Auslegungsanforderung für Salzbeton bei Lagerung in Salz 21
C.5.2	Erfüllung der Auslegungsanforderung für Bentonit bei Lagerung in Tonstein 22
C.5.3	Zusammenfassende Bewertung des Vertrauens in die Erfüllung sicherheits- konzeptioneller Anforderungen an die Abdichtungen 24
C.6	Aggregation der Einzelbewertungen zur Ermittlung der Robustheit der radionuk- lidrückhaltenden Sicherheitsfunktionen bei Abdichtbauwerken/Dämmen 26
C.7	Quellen zu Anhang C 28

Verzeichnis der Tabellen

Tab. C-1:	Rückhaltende Sicherheitsfunktionen und zugeordnete RSF-Parameter für die Komponente Abdichtung/Dammbauwerke 5
Tab. C-2:	Zusammenfassung der Ergebnisse der Ermittlung des Vertrauens in die Charakteri- sierung der RSF-Parameter im Ist-Zustand für Abdichtungen bei Tiefenlagern 9
Tab. C-3:	Aggregierte Ergebnisse für die Bewertung des Vertrauens in die Charakterisierbarkeit der RSF-Parameter der Sicherheitsfunktionen für den Ist-Zustand des Versatzes 9
Tab. C-4:	Zusammenfassung der wirkzeitabhängigen Ergebnisse für das Vertrauen in die Prognostizierbarkeit der RSF-Parameter für den Versatz 13
Tab. C-5:	Zusammenfassung der Bewertungsergebnisse über das Vertrauen in die Prognostizierbarkeit der Sicherheitsfunktionen und zugehöriger RSF-Parameter für das Dichtmaterial der Dammbauwerke 14
Tab. C-6:	Zusammenfassung der Ergebnisse der Auswirkungen der Einfluss- größen Wärme- und Gasentwicklung auf die RSF-Parameter der Dichtelemente Salzbeton und Bentonit bei Tiefenlagern in Salz und Tonstein 20
Tab. C-7:	Aggregation der Bewertungsergebnisse über die Auswirkungen der Einflussgrößen Wärme- und Gasentwicklung auf die Sicherheits- funktionen der Dichtelemente Salzbeton und Bentonit bei Tiefenlagern 20

Tab. C-8:	Zusammenfassung der Ergebnisse zum Vertrauen in die Erfüllung sicherheitskonzeptioneller Anforderungen der RSF-Parameter an die Dichtelemente Salzbeton und Bentonit bei Tiefenlagern in Salz und Tonstein	25
Tab. C-9:	Aggregation der Bewertungsergebnisse über das Vertrauen in die Erfüllung sicherheitskonzeptioneller Anforderungen an die Abdichtungen Salzbeton und Bentonit für die zugehörigen Sicherheitsfunktionen von Tiefenlagern	25
Tab. C-10:	Zusammenfassende Bewertung der Robustheit der rückhaltenden Sicherheitsfunktionen für die Systemkomponente Abdichtung/Dämme für unterschiedliche Wirkzeiträume	26

C.1 Einleitung

In Anhang C wird die Robustheit der radionuklidrückhaltenden Sicherheitsfunktionen der Komponente Abdichtung/Dämme als qualitative Größe bestimmt (s. Bericht, Kap. 6.2.4). Sie dient im Zusammenspiel mit der Relevanz der entsprechenden Sicherheitsfunktionen der Identifizierung von Robustheitsdefiziten der Sicherheitsfunktionen (vgl. Bericht, Kap. 6.2.5).

Die Funktion der Abdichtungen bzw. Dämme im Bereich der Einlagerungsfelder besteht darin, ein- bzw. ausdringende Lösungen über die notwendigerweise hergestellten Strecken in die Einlagerungsbereiche zu verhindern bzw. zu behindern. Es geht hier also um die Abdichtung der Einlagerungsfelder zum restlichen Grubengebäude.

Die Bestimmung der Robustheit der rückhaltenden Sicherheitsfunktionen der Komponente Abdichtung/Dämme geschieht entsprechend der Methodik, die im Bericht (Kap. 6.2.4) beschrieben wird.

Bei Lagerung der Abfälle im Salzgestein sollen nach ENTRIA-AB-03 (2015) Abdichtungen aus „Salz-beton M2“ das Eindringen von Lösungen hydraulisch verhindern, bei Tonstein sollen es Abdichtungen aus Bentonit bzw. Bentonit-Sand-Gemische sein, die jeweils Widerlager aus Beton aufweisen. Die Wirksamkeit dieser Abdichtungen in Salz und Ton soll schnell wirken und ca. 10.000 Jahre andauern. Für die darüber hinaus gehende Zeit soll dann der ewG plus der Versatz aller Resthohlräume des End- bzw. Tiefenlagerbergwerks garantieren (s. Bericht, Kap. 3). Bei den Abdichtungen/Dämmen handelt es sich um kurzfristig wirksame Barrieren, deren Wirksamkeit dann abnehmen kann, wenn die Komponente Versatz voll wirksam wird (s. dazu Bericht, Kap. 3).

Die Bestimmung der Robustheit der Abdichtungen/Dämme geschieht für die **radionuklidrückhaltenden Sicherheitsfunktionen (RSF)** mit Hilfe der sie kennzeichnenden beiden **RSF-Parameter** (s. Bericht, Kap. 4.2 und Tab. 1):

- Begrenzung/Verhinderung von Lösungsbewegung und Radionuklidtransport (mit den RSF-Parametern Permeabilität, Porosität, Diffusivität),
- Verzögerte Radionuklidausbreitung durch Sorption (mit dem RSF-Parameter Sorption).

Dabei wird jede der zwei Sicherheitsfunktionen mit ihren RSF-Parametern in vier **Bewertungsfelder** beurteilt:

- Das Vertrauen in die Charakterisierung des Ist-Zustandes der RSF-Parameter,
- Das Vertrauen in die Prognostizierbarkeit der RSF-Parameter (einschließlich Prozessverständnis),
- Die Bewertung der Auswirkungen interner Systementwicklungen auf die RSF-Parameter,
- Das Vertrauen in die Erfüllung sicherheitskonzeptioneller Auslegungsanforderungen durch die RSF-Parameter.

Abschließend werden die Einzelergebnisse verbalargumentativ aggregiert, so dass sich für jede der radionuklidrückhaltenden Sicherheitsfunktionen eine Aussage über ihre Robustheit ergibt. Soweit möglich und sinnvoll, werden die Robustheitsaussagen zeitlich differenziert für drei **Wirkzeiträume** ($t < 1.000$ Jahre, für $t = 1.000$ Jahre bis 10.000 Jahre und $t > 10.000$ Jahre bis 1 Mio. Jahre) abgeleitet. Dabei ist zu beachten, dass die sicherheitsmäßige Bedeutung der Abdichtungen/Dämme, die sich aus dem Sicherheitskonzept ergibt, auf die ersten zehntausend Jahre beschränkt ist.

Die Bestimmung der Robustheit der rückhaltenden Sicherheitsfunktionen (RSF) der Komponente Abdichtungen/Dämme beruht auf ihnen zuzuordnenden Parametern (RSF-Parametern), denen wiederum bestimmte Eigenschaften und Prozesse zugrunde liegen. In Tab. C-1 sind die rückhal-

tenden Sicherheitsfunktionen und die ihnen zugeordneten RSF-Parameter zusammengestellt. Die einzelnen Eigenschaften und Prozesse werden in den jeweiligen Unterkapiteln behandelt. Sie können beispielhaft auch Tab. 1 des Berichtes entnommen werden.

Komponente	Rückhaltende Sicherheitsfunktion	TE + TM in Salz	TE + TM in Tonstein
ABDICHTUNG/ DAMM		RSF-Parameter für Salzbeton	RSF-Parameter für Bentonit
Abdichtung/ Dammbauwerke	Begrenzung/ Verhinderung von Lösungsbewegung und Radionuklidtransport	Permeabilität, Porosität, Diffusivität	Permeabilität, Porosität, Diffusivität
	Verzögerung der Radionuklidausbreitung durch Sorption	n.b.	Sorption

Tab.: C-1: Rückhaltende Sicherheitsfunktionen und zugeordnete RSF-Parameter für die Komponente Abdichtung/Dammbauwerke und zugehörige charakteristischen Parametern (TE=Endlager, TM=Tiefenlager mit Maßnahmen zur Rückholbarkeit der Abfälle, n.b. nicht bewertet)

C.2 Vertrauen in die Charakterisierung der RSF-Parameter im Ist-Zustand

Der Gebrauch von Salzbeton als Abdichtmaterial in Salz ist nicht unüblich (Beispiele Morsleben, Asse). Je nach geochemischen Umgebungsbedingungen können Salzbetone mit verschiedenen Komponenten eingesetzt werden. In ENTRIA-AB-03 (2015) handelt es sich um den Salzbeton M2, der auch in Morsleben zur Abdichtung der Einlagerungsbereiche eingesetzt wird. Er besteht dort aus Salzzuschlag, Zement, Filterasche und Wasser.

Bentonit ist als Material zur Herstellung von Dammbauwerken, insbesondere der Dichtungskerne, lange bekannt. Er benötigt allerdings eine gewisse Zeit, bis er nach Einbau seine volle Wirksamkeit erreicht.

Wegen des generischen Charakters des Entria-Vorhabens steht kein konkreter Salz- und Tonsteinstandort zur Verfügung und damit auch nicht die notwendigen Daten über geochemische Verhältnisse und sonstige Randbedingungen, die eine detaillierte Bewertung erfordert. Es kann deshalb hier nur **beispielhaft** auf qualitative Aspekte der Robustheit von Sicherheitsfunktionen der Streckenabdichtungen/Dämme aus Salzbeton bzw. Bentonit eingegangen werden. Bei einem realen End- bzw. Tiefenlager können in Abhängigkeit von der standortspezifischen Situation verschiedene Abdichtungsmaterialien auch in Kombination verwendet werden.

C.2.1 Ermittlung des Vertrauens in die Charakterisierung des Ist-Zustandes der RSF-Parameter von Salzbeton bei Lagerung in Salz

(a) Ist-Zustand: Ermittlung der Permeabilität bei Dammbauwerken mit Salzbeton

Anhand der experimentellen Methoden (z.B. Durchströmungsversuche) kann die Permeabilitätsentwicklung von Salzbeton unter Konvergenzbedingungen im Labor recht zuverlässig ermittelt werden. Aufgrund vieler experimenteller Befunde hinsichtlich Korngrößeneinfluss und Feuchteinfluss ist der Kenntnisstand zur Porosität und Permeabilität des Salzbetons als gut zu bewerten. Die Aussagesicherheit hinsichtlich der Permeabilität einzelner Bauelemente des Dichtungsbauwerkes, speziell auch des Salzbetons, ist aufgrund von Messmethoden als gut einzuschätzen.

Hinsichtlich des Upscalings, d.h. des Hochskalierens von Ergebnissen der Laborexperimente hin zu der Bewertung der integralen Permeabilitäten und Porositäten (d.h. der Verbund von Salzbeton, Fugen, Injektionen, Auflockerungszone usw.) liegen jedoch nur wenige experimentelle Ergebnisse vor. Die hydraulische Wirkung des gesamten Verbundes der Abdichtung in situ (z.B. Dichtkörper, Rissbildung nach Abkühlung Gebirge) ist derzeit nur schwer zu bestimmen.

Bei der abzudichtenden Strecke muss nach Beraubung eine instantane Neuausbildung der Auflockerungszone nicht unterstellt werden, so dass in den Konturbereichen Permeabilitäten kleiner 10^{-19} m^2 angenommen werden können. Diese Permeabilitäten des intakten Steinsalzgebirges sind geringer als diejenigen der Salzbetonabdichtung, weswegen im weiteren Verlauf der Bewertung lediglich die Salzbetonabdichtung als permeabilitätsdominierende Komponente weiter betrachtet wird (GRS 2010-3).

Ergebnis: Das Vertrauen in die Charakterisierung der Permeabilität des Istzustandes bei Salzbeton führt wegen des Upscalingsproblems zu einer mittleren Verlässlichkeit (Bewertungsstufe 3).

(b) Ist-Zustand: Ermittlung der Porosität bei Dammbauwerken mit Salzbeton

Zur Bestimmung der Porosität stehen wissenschaftlich anerkannte Verfahren zur Verfügung, bei denen für den Fall ihrer Kombination die Qualität der Erhebung als gut einzustufen ist. Die Porosität und ihre kompaktionsbedingte Entwicklung lassen sich mit den oben aufgeführten Methoden im Labor gut ermitteln. Dies gilt auch sinnentsprechend für Messungen unter in situ Bedingungen. Aufgrund vieler experimenteller Befunde hinsichtlich Korngrößeneinfluss, Feuchteinfluss, Einbringtechnik ist die Kenntnis über die Porosität bei Einbau von Salzbeton als recht gut zu bewerten. Die Porositätsentwicklung des Fugen- und des Injektionsmaterials hingegen sind weniger gut zu charakterisieren. Hier sind weitere Untersuchungen erforderlich. Insbesondere ist nicht geklärt, ob sich in dem Bereich diskrete Wegsamkeiten entwickeln können, die die Dichtwirkung des Salzbetons überprägen.

Ergebnis: Die Charakterisierung der Porosität des Salzbetons für den Istzustand ist wegen Unklarheiten über das Vorhandensein diskreter Wegsamkeiten als mäßig einzuschätzen (Bewertungsstufe: 3).

(c) Ist-Zustand: Ermittlung der Diffusivität bei Dammbauwerken mit Salzbeton

Es stehen Messverfahren zur Verfügung, die eine hohe Aussagesicherheit zur Diffusivität von Dammbaumaterialien (Salzbeton) ermöglichen. Problematisch ist aber die Aussagesicherheit über die integrale Diffusivität des Dammbauwerks.

Ergebnis: Das Vertrauen in die Charakterisierung der Diffusivität der Dammbauwerke für den Istzustand wird wegen mangelnder Aussagesicherheit zur integralen Diffusivität des Salzbetons als mäßig eingeschätzt (Bewertungsstufe: 3).

(d) Ist-Zustand: Ermittlung der Sorptionseigenschaften bei Dammbauwerken mit Salzbeton

Sorption hat bei Dammbauwerken mit Salzbeton keine Bedeutung.

Ergebnis: Bewertung entfällt.

C.2.2 Ermittlung des Vertrauens in die Charakterisierung des Ist-Zustandes der RSF-Parameter bei Lagerung in Tonstein

Nach ENTRIA-AB-03 (2015) bestehen die Abdichtungsbauwerke bei Lagerung in Tonstein, die die Einlagerungsstrecke vom übrigen Grubengebäude hydraulisch trennen sollen, aus Bentonit. Aufgrund des Quelldrucks, der sich bei der Aufsättigung entwickelt, ist zur Aufrechterhaltung dieses Druckes ein Widerlager erforderlich. Hierfür wird in Entria Beton oder Mauerwerk angenommen. Die Ausbausicherung der Strecke muss bei der Errichtung des Abdichtungsbauwerkes rückgebaut werden. Die Bentonitdichtung erfüllt direkt nach ihrem Einbau noch nicht die Anforderungen, die längerfristig an die Dichtheit gestellt werden (z.B. Permeabilität $< 10^{-19} \text{ m}^2$). Dies wird erst im Laufe der Zeit durch Aufsättigung und Schwellen des Bentonits und das Auflaufen des umgebenden Gebirges erreicht.

(a) Ist-Zustand: Ermittlung der Permeabilität bei Dammbauwerken in Tonstein

Zur Messung der Permeabilitätsentwicklung des Verschlussmaterials werden hauptsächlich drei Versuchstechniken eingesetzt (triaxiale Kompaktionsversuche, Permeabilitätsversuche im Einaxialpermeameter, weggeregelte Ödometerversuche), die zuverlässige Ergebnisse bei der Bestimmung der Permeabilität der Bentonitdichtung ergeben. Durch viele experimentelle Befunde sind gute Kenntnisse über die Permeabilität bei Einbau des Bentonits erlangt worden. Die Aussagesicherheit ist deshalb als hoch zu bewerten.

Zur Ermittlung der Permeabilität der Auflockerungszone im Konturbereich der Hohlräume wurde in Untertagelabors eine Reihe von in situ Untersuchungen durchgeführt, so dass die Kenntnis über Ausdehnung der Auflockerungszone und deren Permeabilität ebenfalls als gut zu bewerten ist. Die Befunderhebung weist nach GRS (2010-3) einen Wert $< 10^{-19} \text{ m}^2$ auf. Die Aussagesicherheit für diesen Befund ist als hoch zu bewerten.

Durch viele experimentelle Befunde zu Kerngrößen- und Feuchteinfluss, Einbringtechnik u.a. sind die Kenntnisse über die Permeabilität bei Einbau der Verschlüsse als gut zu bewerten. Die Permeabilität direkt nach Einbau des Bentonits beträgt etwa 10^{-13} m^2 . Die Aussagesicherheit für diesen Befund ist als hoch zu bewerten.

Ergebnis: Das Vertrauen in die Charakterisierung der Permeabilität sowohl für die Bentonitabdichtung als auch der Auflockerungszone im Ist-Zustand ist hoch (Bewertungsstufe 4).

(b) Ist-Zustand: Ermittlung der Porosität bei Dammbauwerken in Tonstein

Es existieren mehrere Untersuchungsmethoden (z.B. Pyknometer-Porosität, Wasserverlust-Porosität, Quecksilber-Druckporosität), mit denen die Porosität des Bentonits zuverlässig ermittelt werden kann.

Gleiches gilt für die Auflockerungszone im Konturbereich der Strecken. Hierfür liegen etliche in situ Untersuchungen vor, die eine gute Kenntnis über die Ausdehnung der Auflockerungszone im Tonstein und deren Porosität zeigen.

Ergebnis: Das Vertrauen in die Charakterisierung der Porosität sowohl für die Bentonitabdichtung der Einlagerungsstrecken als auch für die Auflockerungszone im Istzustand wird als hoch eingeschätzt (Bewertungsstufe: 4).

(c) Ist-Zustand: Ermittlung der Diffusivität bei Dammbauwerken in Tonstein

Die Diffusivität des Bentonits kann in Diffusionszellen ermittelt werden. Es liegen umfangreiche Experimente mit kompaktiertem Bentonit sowie Bentonit-Sand-Gemischen vor. Mit dieser Messtechnik werden gute Ergebnisse erzielt. Nach GRS (2010-3) ist wegen der Einbautechnik, die einen relativ homogenen Einbau der Verschlüsse erwarten lässt, die Möglichkeit eines Upscalings auf das gesamte Bauwerk als relativ zuverlässig anzusehen. In der Summe ist die Aussagesicherheit zur Diffusivität im Tonsteinverschluss als gut zu bewerten.

Ergebnis: Das Vertrauen in die Charakterisierung der Diffusivität der Bentonitabdichtung der Einlagerungsstrecken für den Istzustand ist als hoch einzuschätzen (Bewertungsstufe 4).

(d) Ist-Zustand: Ermittlung der Sorptionseigenschaften bei Dammbauwerken in Tonstein

Zur Ermittlung der Sorptionseigenschaften werden überwiegend Batchexperimente durchgeführt. Sie lassen sich aber auch im Zuge der Bestimmung der Diffusivität (Porendiffusionskoeffizienten) aus der Differenz des scheinbaren (apparenten) und des effektiven Diffusionskoeffizienten bestimmen. Für beide Methoden gilt, dass Unsicherheiten in der Schwierigkeit liegen, das hydrochemische Milieu im Porenwasser des Bentonitkörpers in situ zu erfassen. Spektroskopische Methoden zur Ermittlung der Bindungsmechanismen können zudem zu einem verbesserten Prozessverständnis führen.

Allen Methoden unterliegen dem Problem, dass Probenahme und Versuchsdurchführung im Hinblick auf die Erhaltung der in situ Bedingungen (z.B. Sauerstoffgehalt, Redoxzustand) ebenso wie die Extraktion des Porenwassers schwierig sind. Dadurch können Ergebnisse verfälscht werden. Selbst bei einer sinnvollen Kombination aller Methoden wird ihre Aussagekraft zur Ermittlung der Sorptionseigenschaften nur als mittelmäßig eingestuft. Wenn auch die Charakterisierbarkeit im Hinblick auf die „wahre“ Größe der Sorption als eher weniger gut einzustufen ist, so lassen die Versuche jedoch nach GRS (2010-3) mit hoher Sicherheit eine Aussage hinsichtlich eines Mindestmaßes der Sorption zu.

Ergebnis: Das Vertrauen in die Charakterisierbarkeit der Sorptionseigenschaften des Bentonits im Istzustand wird als hoch eingeschätzt (Bewertungsstufe 4).

C.2.3 Zusammenfassende Bewertung des Vertrauens in die Charakterisierbarkeit der RSF-Parameter für den Ist-Zustand

Die folgende Tab. C-2 zeigt die Ergebnisse der Charakterisierung der RSF-Parameter der Dichtungsmaterialien Salzbeton und Bentonit im Ist-Zustand für Dammbauwerke bei End- bzw. Tiefenlager. Die Bewertung gilt nur für den Ist-Zustand.

Komponente ABDICHTUNG/DAMM	TE + TM in Salz (steil u. flach)	TE + TM in Tonstein	Anmerkung
RSF-Parameter	Salzbeton	Bentonit	
Permeabilität	3	4	Keine Differenzierung zwischen Salz (flach u. steil) möglich;
Porosität	3	4	
Diffusivität	3	4	Keine Differenzierung zwischen End- und Tiefenlager möglich
Sorption	n.b.	4	

Tab. C-2: Zusammenfassung der Ergebnisse der Ermittlung des Vertrauens in die Charakterisierung der RSF-Parameter im Ist-Zustand für Abdichtungen bei Tiefenlagern (TE = Endlager, TM = Tiefenlager mit Monitoring und Maßnahmen zur Rückholbarkeit; Bewertung: 5 sehr gute Charakterisierbarkeit bis 1 sehr geringe / vernachlässigbare Charakterisierbarkeit, n.b. = nicht bewertet)

Komponente ABDICHTUNG/DAMM		TE + TM in Salz (steil- u. flach)	TE + TM Tonstein
Sicherheitsfunktion	RSF-Parameter	Salzbeton	Bentonit
Begrenzung/Verhinderung v. Lösungsbewegung u. RN-Transport	Permeabilität	3	4
	Porosität		
	Diffusivität		
Verzögerung der RN-Ausbreitung d. Sorption	Sorption	n.b.	4

Tab. C-3: Aggregierte Ergebnisse für die Bewertung des Vertrauens in die Charakterisierbarkeit der RSF-Parameter der Sicherheitsfunktionen für den Ist-Zustand des Versatzes (TE: Endlager, TM: Tiefenlager mit Monitoring und Maßnahmen zur Rückholbarkeit; Bewertung: 5 sehr gute Charakterisierbarkeit bis 1 sehr geringe / vernachlässigbare Charakterisierbarkeit, n.b.: nicht bewertet)

Hinsichtlich der RSF-Parameter der Sicherheitsfunktion „Begrenzung/ Verhinderung von Lösungsbewegung und Radionuklidtransport“ ist die gute Charakterisierbarkeit im Ist-Zustand bei Dammbauwerken aus Bentonit für End- bzw. Tiefenlager in Tonstein erkennbar (s. Tab. C-3). Alle drei RSF-Kriterien (Permeabilität, Porosität und Diffusivität) werden entsprechend bewertet.

Bei Einlagerung in Salz und Dammbauwerken aus Salzbeton ist die Charakterisierbarkeit im Ist-Zustand für alle drei RSF-Kriterien nur mäßig (s. Tab. C-3).

Hinsichtlich der RSF „Verzögerung der Radionuklid ausbreitung durch Sorption“ wird das Abdichtungsbauwerk aus Salzbeton nicht bewertet. Beim Abdichtungsbauwerk aus Bentonit bei Lagerung im Tonstein ist die Charakterisierung für den Ist-Zustand mit hoch bewertet worden.

C.3 Vertrauen in die Prognostizierbarkeit der RSF-Parameter der Abdichtungen im Nachweiszeitraum

Hierbei geht es um die Ermittlung des Vertrauens in die Prognostizierbarkeit der RSF-Parameter, die den zwei radionuklidrückhaltenden Sicherheitsfunktionen der Komponente Abdichtung zugrunde liegen. Dabei ist auch der Grad des Prozessverständnisses bedeutsam, ohne dass die Prognostizierbarkeit hinfällig ist.

Die Auswirkungen möglicher zukünftiger Veränderungen der RSF-Parameter der Komponente Abdichtung sind dabei qualitativ zu berücksichtigen. Eindeutige Veränderungen eines RSF-Parameters hin zu der „sicheren Seite“ der Komponente, d.h. positiver Einfluss auf die Radionuklid ausbreitung bzw. die Isolationswirkung, sind positiv zu bewerten. Sie sind ein Hinweis auf eine hohe Robustheit. Bei nur geringen Veränderungen der RSF-Parameter bleibt ihre ursprüngliche Bewertung bestehen.

Die Prognose der möglichen Veränderungen von Parameterwerten in der Zukunft hängt auch von der standortspezifischen Entwicklung des End- bzw. Tiefenlagersystems ab. Diese ist aber nicht sicher bekannt. Hinzu kommt, dass auf der Ebene der Entria-Referenzmodelle standortspezifische Daten nicht vorliegen. Selbst wenn sie bekannt wären, bestünden noch Unsicherheiten, wie sich ein Parameterwert bei bekannten Änderungen äußerer Randbedingungen langfristig ändert. Es kann sogar unklar sein, ob sich ein Parameterwert innerhalb der betrachteten Komponente in positiver oder negativer Richtung ändert. Hieraus ergeben sich naturgemäß Ungewissheiten hinsichtlich der Bewertung der Änderung des Parameterwertes.

In GRS (2010) wird versucht, die skizzierte Problematik durch die Verknüpfung der Unsicherheiten bei der Vorhersage der Entwicklung der End- bzw. Tiefenlagersysteme (Prognoseunsicherheit) mit der Unsicherheit bei der Prognostizierbarkeit bzw. dem Prozessverständnis zu begegnen. Diese Lösung ist bei der Anwendung der Methodik auf die generischen Entria-Referenzmodelle wegen naturgemäß fehlendem Detaillierungsgrad der Referenzmodelle und fehlendem Standortbezug nur sehr begrenzt umsetzbar.

Deshalb wird nach der Bewertung der Prognostizierbarkeit und des Prozessverständnisses der RSF-Parameter (Kap. C.3.3) im darauf folgenden Kap. C.4 mit den inneren Systemeinflüssen Gas- und Wärmeentwicklung zwei ausgewählte und zwangsläufig auftretende Aspekte der Systemrobustheit beispielhaft und unabhängig von den Prognoseunsicherheiten behandelt. Die externen Systemeinflüsse (z.B. Eisüberfahung) werden in Anhang E in Zusammenhang mit dem ewG behandelt.

Die hier skizzierte Problematik und ihr Lösungsansatz gelten auch für alle anderen Systemkomponenten und ihre zugehörigen Sicherheitsfunktionen samt RSF-Parametern. Dabei muss zur Vermeidung eventuell verdeckter Mehrfachbewertungen bei der späteren Aggregation von Einzelergebnissen sorgfältig vorgegangen werden.

C.3.1 Vertrauen in die Prognostizierbarkeit der Salzbetonabdichtung bei Lagerung in Salz

(a, b, c) Prognostizierbarkeit von Permeabilität, Porosität und Diffusivität bei Dammbauwerken aus Salzbeton

Das in Kap. C.2.1 ermittelte mäßige Vertrauen in die Charakterisierbarkeit der integralen Permeabilität des Dammbauwerks im Ist-Zustand wird sich auch im weiteren Nachweiszeitraum für die drei funktional zusammenhängenden RSF-Parameter Permeabilität, Porosität und Diffusivität nicht erhöhen.

So muss im Zusammenhang mit dem Nachweis der Langzeitstabilität für Salzbeton gezeigt werden, dass sich die Permeabilität in Folge chemischer Einwirkungen (insbesondere Salzkorrosion) nicht in unzulässiger Weise erhöht (BfS 2003, Müller-Hoeppel et al. 2007). Dazu wiederum müssen die (langfristigen) geo- bzw. hydrochemischen Eigenschaften zutretender Lösungen bekannt sein. In DBEtec (2008) wird angemerkt, dass es ebenso offensichtlich sei, dass eine Extrapolation der Aussagen zur Funktionstüchtigkeit auf den geforderten Nachweiszeitraum allein anhand der Beobachtungen von wenigen bis einigen Jahrzehnten nicht zulässig ist.

Nach Herbert, H.-J. et al. (2011) steht eine experimentelle Ableitung der Porositäts-Permeabilitätsbeziehung für Salzbeton noch aus. Gleiches gilt für eine Optimierung der Rezepturen hinsichtlich seiner Korrosionsbeständigkeit sowie die Validierung der geochemischen und reaktiven Stoffmodellrechnungen.

Darüber hinaus sind nach DBEtec (2008) unter anderem zu berücksichtigen: Vermeidung thermisch induzierter Rissbildungen während des Hydratationsprozesses, Einhaltung des Festigkeitskriteriums des Baukörpers für einen frühen Nachweiszeitraum (bis 100 Jahre) sowie die Einhaltung des Dilatanzkriteriums unter Ansatz der wirksamen Spannungen für Baukörper und Gebirge für den langfristigen Nachweiszeitraum und das Vorhandensein und Nachweis eines ausreichend hohen Strömungswiderstandes im Baukörper, der Kontaktzone sowie der Auflockerungszone ($k < 10^{-18} \text{ m}^2$).

Thomauske & Charlier (2013) leiten aus der Vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG) unter anderen folgende dringenden F&E-Arbeiten ab, damit Lücken geschlossen werden: Entwicklung eines Versuchskonzeptes zur laborativen Ermittlung hydraulischer und geochemischer Eigenschaften von Kontaktzonen zwischen unterschiedlichen Baustoffen und Weiterentwicklung entsprechender Modellkonzepte. Ermittlung hydraulischer und geochemischer Eigenschaften der Kontaktzonen zwischen Steinsalzkontur und Dichtelementen (z.B. Salzbeton, Sorelbeton, Bentonit) sowie Weiterentwicklung entsprechender Modellierungskonzepte. Zudem fordern sie weitere Untersuchungen zur langfristigen Beständigkeit von Verschlussbauwerken im salinaren Milieu sowie zur Alteration der verwendeten Materialien.

Insgesamt ist unter Berücksichtigung der auszugsweise wiedergegebenen Fragestellungen für Salzbeton im Salz trotz erheblicher Anstrengungen noch keine abgesicherte Lösung zur Erstellung langzeitsicherer Dammbauwerke vorhanden. Die vielfältigen Ungewissheiten lassen deshalb die Prognostizierbarkeit und das Prozessverständnis der RSF-Parameter für die integrale Durchlässigkeit als höchstens mittel erscheinen.

Ergebnis: Das Vertrauen in die Prognostizierbarkeit und das Prozessverständnis der RSF-Parameter Permeabilität, Porosität und Diffusivität bei Salz ist mittel (Ergebnis: Bewertungsstufe jeweils 3). Die Bewertung gilt für die Wirkzeitraum $t < 10.000 \text{ a}$ und $t \geq 10.000 \text{ a}$.

b) Prognostizierbarkeit der Sorption bei Dammbauwerken aus Salzbeton

Sorption hat bei Dammbauwerken mit Salzbeton keine Bedeutung.

Ergebnis: Bewertung entfällt.

C.3.2 Vertrauen in die Prognostizierbarkeit der Bentonitabdichtung bei Lagerung in Tonstein

(a, b, c) Prognostizierbarkeit von Permeabilität, Porosität und Diffusivität bei Dammbauwerken aus Bentonit

Zentrale Anforderung an die Permeabilität ist die Unterschreitung des Parameterwertes 10^{-19} m^2 , damit der Verschluss als ein diffusionsdominiertes System, bei dem die advective Komponente beim Lösungstransport vernachlässigbar gering ist, den Einschluss der Radionuklide gewährleisten kann.

Der Bentonit des Dammbauwerkes wird sich auf sättigen, und nach Auf sättigung wird eine Permeabilität von $<10^{-19} \text{ m}^2$ vorherrschen. Nach GRS (2010-3) wird die Auf sättigung einige hundert Jahre benötigen. Sie führt zum Anschwellen des Bentonits, so dass ein dichter Verbund mit dem umgebenden und seinerseits kompaktierenden Tonsteingebirge erreicht wird. Die Auflockerungszone wird nach relativ kurzer Zeit Permeabilitätsbereiche $< 10^{-19} \text{ m}^2$ erreichen. Das für diese Aussage erforderliche Prozessverständnis wird als ausreichend hoch angesehen.

Insgesamt nimmt der Verschluss nach GRS (2010-3) nach Einbau und insbesondere nach seiner Auf sättigung Permeabilitäten, Porositäten und insbesondere Diffusivitäten an, die dem Wirtsgestein ähnlich sind. Das für diese Aussage erforderliche Prozessverständnis wird als ausreichend hoch angesehen.

Ergebnis: Das Vertrauen in die Prognostizierbarkeit und das Prozessverständnis der RSF-Parameter Permeabilität, Porosität und Diffusivität bei Tonstein ist hoch (Ergebnis: Bewertungsstufe für alle RSF-Parameter 4. Dabei ist zu beachten, dass im Wirkzeitraum bis ca. 1.000 a eine volle Dichtwirkung wegen der Auf sättigung des Bentonits noch nicht gegeben ist. Deshalb wird dieser Zeitraum mit der Bewertungsstufe 3 belegt). Erst ab 1.000 a gilt die Bewertungsstufe 4 für den restlichen Wirkzeitraum.

(d) Prognostizierbarkeit der Sorption bei Dammbauwerken aus Bentonit

In Kap. C.2.2 Abschnitt (d) wird das Vertrauen in die Charakterisierung der Sorptionseigenschaften des Bentonits für den Ist-Zustand insgesamt als hoch (Bewertungsstufe 4) eingeschätzt.

Gleiches gilt für die Prognostizierbarkeit der Sorption im Zeitverlauf. Wenn auch die Charakterisierbarkeit im Hinblick auf die „wahre“ Größe der Sorption als eher weniger gut einzustufen ist, so lassen die Versuche jedoch nach GRS (2010-3) mit hoher Sicherheit eine Prognose hinsichtlich eines Mindestmaßes der künftigen Sorption zu. Das dazu erforderliche Prozessverständnis ist vorhanden.

Ergebnis: Das Vertrauen in die Prognostizierbarkeit und das Prozessverständnis des RSF-Parameter Sorption bei Tonstein ist hoch (Ergebnis: Bewertungsstufe 4). Die Bewertung gilt für die Wirkzeitraum $t < 10.000 \text{ a}$ und $t \geq 10.000 \text{ a}$.

C.3.3 Zusammenfassende Bewertung des Vertrauens in die Prognostizierbarkeit der RSF-Parameter der Abdichtung

Die Auswertung (Tab. C-4) zeigt, dass das Vertrauen in die Prognostizierbarkeit des Dichtmaterials Salzbeton über sämtliche Wirkzeiträume nur mäßig ist (Bewertungsstufe 3). Die Sorption wird bei Salzbeton nicht bewertet.

Das Vertrauen in den Bentonit bei End- bzw. Tiefenlager in Tonstein ist hoch (Bewertungsstufe 4) und gilt für die Zeiträume > 1.000 Jahre. Für den Zeitraum bis 1.000 Jahre hingegen ist durch die Aufsättigung und den Quellvorgang des Bentonits die volle Isolationsleistung noch nicht gegeben. Deshalb ist das Vertrauen in die Prognostizierbarkeit des Bentonits für diesen Wirkzeitraum nur mäßig (Bewertungsstufe 3). Bezüglich der Sorption ist die Bewertung des Bentonits für alle Wirkzeiträume hoch.

Komponente ABDICHTUNG / DÄMME RSF-Parameter	TE + TM Salz (steil- u. flachlagernd)			TE + TM Tonstein		
	Dichtmaterial Salzbeton			Dichtmaterial Bentonit		
	<i>Wirkzeiträume</i>	<i>t bis 1.000 a</i>	<i>t > 1.000 a bis ≤ 10⁴ a</i>	<i>t > 10⁴ a</i>	<i>t bis 1.000 a</i>	<i>t > 1.000 a bis ≤ 10⁴ a</i>
Permeabilität	3	3	3	3	4	4
Porosität	3	3	3	3	4	4.
Diffusivität	3	3	3	3	4	4
Sorption	n.b.	n.b.	n.b.	4	4	4

Tab. C-4: Zusammenfassung der wirkzeitabhängigen Ergebnisse für das Vertrauen in die Prognostizierbarkeit der RSF-Parameter für den Versatz (TE: Endlager, TM: Tiefenlager mit Monitoring und Maßnahmen zur Rückholbarkeit; Bewertung: 5 sehr gute Charakterisierbarkeit bis 1 sehr geringe / vernachlässigbare Charakterisierbarkeit, n.b.: nicht bewertet)

Zusammengefasst bedeutet dies (s. Tab. C-4), dass die Sicherheitsfunktion „Begrenzung/Verhinderung v. Lösungsbewegung u. RN-Transport“ für Bentonit ein insgesamt höheres Vertrauen aufweist als Salzbeton. Zudem kommt bei Bentonit noch zusätzlich die Sicherheitsfunktion „Verzögerung der Radionuklidenausbreitung durch Sorption“ mit einer hohen Bewertung zum Tragen.

Tab. C-5 zeigt die aggregierten Bewertungsergebnisse zur Prognostizierbarkeit für die beiden Sicherheitsfunktionen. Bei der Sicherheitsfunktion „*Begrenzung/Verhinderung von Lösungsbewegung...*“ ist bei Tonstein eine wirkzeitendifferenzierte Bewertung für Bentonit gegeben. Bis 1.000 Jahre ist das Vertrauen in die Sicherheitsfunktion nur mässig hoch, für den darüberhinausgehenden Zeitraum jedoch hoch.

Komponente ABDICHTUNG/DAMM		TE + TM Salz (steil- u. flachlagernd)	TE + TM Ton- stein
Rückhaltende Sicher- heitsfunktionen	zugehörige RSF-Parameter	Salzbeton	Bentonit
Begrenzung/Verhinderung v. Lösungsbewegung u. RN-Transport	Permeabilität	3	3 (bis 1.000 a) 4 (für t > 1.000 a)
	Porosität		
	Diffusivität		
Verzögerung der RN- Ausbreitung d. Sorption	Sorption	n.b.	4

Tab. C-5: Zusammenfassung der Bewertungsergebnisse über das Vertrauen in die Prognostizierbarkeit der Sicherheitsfunktionen und zugehöriger RSF-Parameter für das Dichtmaterial der Dammbauwerke. (5 sehr gute Prognostizierbarkeit bis 1 sehr geringe / vernachlässigbare Prognostizierbarkeit; n.b. = nicht bewertet)

C.4 Bewertung der Auswirkungen interner Systementwicklungen auf die RSF-Parameter der Komponente Abdichtung/Dämme (Systemrobustheit)

Neben der Prognostizierbarkeit der RSF-Parameter ist auch die Bewertung des Verhaltens der Dammbauwerke gegenüber inneren Einwirkungen für die Bestimmung der Robustheit wichtig. Solche Einwirkungen sind beispielweise Wärme- und Gasentwicklung oder auch als äußere Einwirkungen die Folgen klimatischer Änderungen. Äußere Einwirkungen werden zusammenfassend bei der Behandlung des ewG für alle betroffenen Sicherheitsfunktionen (s. Anhang E) behandelt.

In den folgenden Unterkapiteln werden mögliche Auswirkungen interner Einflüsse des End- bzw. Tiefenlagersystems auf die RSF-Parameter der radionuklidrückhaltenden Sicherheitsfunktionen der Komponente Abdichtungen/Dammbauten ermittelt. Diese Auswirkungen hängen stark von standort- und konzeptspezifischen Bedingungen ab. Da beim generischen Ansatz von Entria solche spezifischen Bedingungen nicht vorliegen oder aber hilfsweise angenommen werden müssen, gelten die resultierenden qualitativen Aussagen zwangsläufig nur beispielhaft.

Zu diesen internen Einflüssen zählen vor allem die Gas- und Wärmeentwicklung bei End- bzw. Tiefenlagerung, die Veränderungen der RSF-Parameter der Sicherheitsfunktionen der Systemkomponente Abdichtungen mit sich bringen können. Das Ausmaß dieser Veränderungen ist ein Indikator für die jeweilige Systemrobustheit. **Systemrobustheit bedeutet somit die Unempfindlichkeit des Tiefenlagersystems gegenüber veränderten Randbedingungen, die sich aus der inneren und äußeren Standortentwicklung ergeben können** (z.B. Reaktionen auf Gasbildung oder auf Eisüberfahung).

Dabei wird die Systemrobustheit reziprok, d.h. als Ausmaß der einwirkungsbedingten Veränderung des Parameterwertes, bewertet. Eine hohe Systemrobustheit ist dann gegeben, wenn die Änderung des Parameterwertes gering ist oder zur „sicheren Seite“ hin erfolgt, d.h. die Änderung des Parameterwertes sich auf die Radionuklidrückhaltung innerhalb der betrachteten Tiefenlagerkomponente „Abdichtung/Dämme“ positiv auswirkt. Entsprechend zeigen beispielsweise die Be-

wertungsstufen 4 bzw. 5 eine hohe bzw. sehr hohe Robustheit auf, die Bewertungsstufen 1 bzw. 2 eine sehr geringe bzw. geringe Robustheit auf (entsprechend gilt, dass geringe Auswirkungen mit einer hohen Robustheit verknüpft sind, und starke Auswirkungen mit einer niedrigen Robustheit).

Zudem beziehen sich die Aussagen für die Gasentwicklung auf den Zeitraum von 10^5 Jahren, für die Wärmeentwicklung nur auf den Zeitraum von 10^4 Jahren, weil nach einigen tausend Jahren das ursprüngliche Temperaturniveau im End- bzw. Tiefenlagerbereich wieder erreicht wird und die wesentliche Gasentwicklung und -ausbreitung im Verlaufe von 10^5 Jahren erlischt. Lux et al. (2017) zeigen an beispielhaften Simulationen der Wärmeausbreitung und der Gasentstehung sowie der Gasausbreitung für Entria-Referenzmodelle, dass die Temperaturerhöhung durch wärmeentwickelnde Abfälle nach 10^4 Jahre wieder abgeklungen ist und Gasentstehung durch Korrosion von Metallen und daraus resultierende Gasausbreitung im Verlauf einiger 10^5 Jahre ablaufen kann.

Die obigen Aussagen zur Systemrobustheit und der mit Wärme und Gasbildung verbundenen Wirkzeiträume gelten in gleicher Weise auch für die anderen Komponenten des End- oder Tiefenlagers (s. Anhänge A, B, D und E).

C.4.1 Auswirkungen von Gas und Wärme auf die Komponente Abdichtung aus Salzbeton

(a, b) Auswirkungen von Gas und Wärme auf die Permeabilität und Porosität bei Dammbauwerken aus Salzbeton bei Lagerung im Salz

Nach Einbau des Dammbauwerks läuft der Salzkörper auf den Salzbeton des Dammbauwerks auf und komprimiert diesen. Dadurch kommt es zu einer Reduzierung der Permeabilität und Porosität des Dammbauwerks sowie der Auflockerungszone im Wirtsgestein um die Kontur der Strecke. Erhöhte Temperaturen beschleunigen die Reduktion der Porosität und der Permeabilität des Bauwerks sowie der gestörten Zone im Wirtsgestein. Parallel kommt es durch die Korrosion der metallischen Abfallbehälter zu einer Gasentwicklung und durch die wärmeentwickelnden Abfälle zu einer fortschreitenden Temperaturerhöhung im Wirtsgestein. Daraus können sich Auswirkungen auf die Funktion der Abdichtung ergeben.

Umfangreiche Untersuchungen zu Salzbeton wurden im Rahmen des Planfeststellungsverfahrens zur Stilllegung des Endlagers Morsleben durchgeführt (DBE 2004). Dort wurden Untersuchungen der Gaspermeabilität bei Salzbeton an Versuchskörpern mit unterschiedlichem Manteldruck durchgeführt. Dabei wurden effektive Gaspermeabilitäten von 10^{-20} m² festgestellt. Bei Erhöhung des Manteldrucks sinkt die Gaspermeabilität. Dieser Vorgang ist teilweise reversibel. Versuche zur Ermittlung des Gaseindringdrucks mit gesättigten Proben (Q-Lösung) konnten keine Gasdurchströmung der Probenkörper feststellen. Zudem konnte keine Permeabilität des Salzbetons gegenüber NaCl- und Q-Lösung festgestellt werden; die Salzbetonproben waren bei einem Manteldruck von 2,5 MPa hydraulisch dicht. Die totale Porosität betrug bei den Versuchskörpern durchschnittlich 17,8%.

Diese Ergebnisse weisen darauf hin, dass Salzbeton für **Gas und Lösungen** nicht bzw. extrem gering durchlässig ist. Ein kritischer Punkt dabei ist die Übertragung der an relativ kleinen Proben ermittelten Versuchsergebnisse auf um ein Vielfaches größere Streckenabdichtungen. Nach GRS (2010-3) sind bisher keine in situ Experimente zur Bestimmung der Permeabilitätsentwicklung in Salzbeton mit dem Messziel eines hermetischen Einschlusses durchgeführt worden. Druck- und weggeregelte Laborexperimente müssen im Hinblick auf den Zeitbedarf unter „Zeitrafferbedingungen“ durchgeführt werden. Beide Typen der Experimente bilden somit die in der Realität vor-

liegenden Bedingungen nur sehr eingeschränkt nach. Es ist also zu klären, wie die Einflüsse der natürlichen Bedingungen (z.B. Gebirgsdruck, Zugkräfte) auf die Messgrößen z. B. Permeabilität und Porosität Einfluss nehmen können.

Ein weiteres Problem stellt das Schwindverhalten von Salzbeton dar. Es ist auf die Reduzierung von Feuchte im Zementstein zurückzuführen. Es nimmt ab mit der Permeabilität des Salzbetons und steigt mit wachsender Temperatur und Abnahme der Luftfeuchtigkeit. Schwindverhalten wurde bei allen Prüfkörpern nachgewiesen. Das durchschnittliche Schwindmaß der Proben nach 50 Tagen beträgt 1,1 mm pro m. Hier liegt das gleiche upscaling-Problem vor wie bei Bestimmung der Durchlässigkeit. Denn der Salzbeton als solcher mag extrem gering durchlässig sein für Gase, bei Bildung eines durch Schwindverhalten hervorgerufenen Kluftnetzes ist die geringe Permeabilität und Porosität obsolet.

Insgesamt ist also ein Grundverständnis über den Einfluss der Gasentwicklung auf Porosität und Permeabilität für Lösungen und Gase des Dammbauwerkes aus Salzbeton vorhanden, aber es bleiben noch wichtige Fragen dazu offen. Dazu gehören vorrangig zwei Aspekte: Die Lösung des Upscaling-Problems und des langfristigen Schwindverhaltens des Salzbetons.

Der **Einfluss von Wärme** auf Salzversatz betrifft zwei Aspekte: Zum einen die durch Abbinden hervorgerufene Hydrationswärme, zum anderen die durch die Abfälle verursachte generelle Temperaturerhöhung im Lagerbereich und darüber hinaus.

In DBE (2004) wurden Laborversuche zur Temperaturentwicklung beim Abbinden der Bindemittel durchgeführt. Sie zeigen im Verlaufe von ein bis zwei Wochen eine Temperaturerhöhung an den Salzbetonproben von 30 bis 50 Grad Celsius (Maximaltemperaturen von 50 bis 60 Grad Celsius). Diese Maximaltemperaturen überschreiten die in einem bewetterten Endlager- bzw. Tiefenlagerbergwerk herrschenden Temperaturen (mit Ausnahme der unmittelbaren Umgebung der Lagerung der Abfälle), sie werden nach dem Abbinden jedoch auf die Umgebungstemperatur im Bergwerk zurückgehen.

Durch die Bildungs- und Reaktionswärme des Salzbetons kann es zu thermomechanischen Zwangsbeanspruchungen im Versatzkörper und im Gebirge kommen. Dadurch besteht die Gefahr, dass der gewünschte Dichteffekt des Salzbetons gegenüber Fluiden durch Rissbildung infolge mechanischer Einwirkungen teilweise oder ganz verloren geht (s.o. Rissbildung durch Schwinden).

Insgesamt lässt sich aus diesen Aussagen hinsichtlich der Auswirkungen der Gas- und Wärmeentwicklung auf Permeabilität und Porosität des Dammbauwerks zwei Aussagen treffen: Zum einen kann die Wärmeentwicklung eine potenziell stärkere Auswirkungen auf die Salzbetonabdichtung haben als die Gasbildung (Abbindewärme kann über Kluftbildung zu neuen Durchlässigkeiten führen). Zum anderen bestehen Fragen hinsichtlich des upscalings der Untersuchungsergebnisse vom Labor in den Maßstab der realen Abdichtungsmaßnahmen. Wegen dieser vielen Einflussgrößen sind auch die tatsächlichen Auswirkungen des Gasdruckaufbaus, d.h. die erreichbare Endpermeabilität bei dem im Tiefenlagerbergwerk herrschendem Gasdruck, für Dammbauwerke aus Salzbeton (einschließlich Fugen, Auflockerungszone usw.) schwer bestimmbar.

Diese Aussagen gelten auch für das Verschlussmaterial Salzbeton (vgl. auch Kap.C.3.1).

Ergebnis: Die Auswirkungen der inneren Einflussgrößen Wärme- und Gasentwicklung auf die Lösungs- und Gaspermeabilität und die entsprechenden Porositäten des Dichtelemente Salzbeton sind als mäßig zu bewerten (Bewertungsstufe jeweils 3). Dies gilt für alle Wirkzeiträume.

(c) Auswirkungen von Gas und Wärme auf die Diffusivität bei Dammbauwerken aus Salzbeton bei Lagerung im Salz

Die Entwicklung der Diffusivität im lösungserfüllten Dammbauwerk ist abhängig von der Entwicklung der dortigen Permeabilität und Porosität. Da derzeit - wie unter Punkt (a,b) oben dargestellt - nur ein begrenztes Verständnis zu einigen Einflussgrößen vorhanden ist (v.a. upscaling), können die Auswirkungen der Wärme- und Gasentwicklung auf die Diffusivität im lösungserfüllten Damm ebenfalls nur als mäßig eingestuft werden.

Ergebnis: Die Auswirkungen der inneren Einflussgrößen Wärme- und Gasentwicklung auf die Diffusivität des Dichteelementes Salzbeton sind als mäßig zu bewerten (Bewertungsstufe 3). Das gilt für alle Wirkzeiträume.

(d) Auswirkungen von Gas und Wärme auf die Sorption bei Dammbauwerken aus Salzbeton bei Lagerung im Salz

Sorption hat bei Dammbauwerken mit Salzbeton keine Bedeutung.

Ergebnis: Bewertung entfällt.

C.4.2 Auswirkungen von Gas und Wärme auf die Komponente Abdichtung aus Bentonit

(a, b) Auswirkungen von Gas und Wärme auf die Permeabilität und Porosität bei Dichteelementes Bentonit bei Lagerung in Tonstein

Der **Wärmeeintrag** durch die Abfälle kann zu einer Beeinträchtigung der Barrierenintegrität durch wärmeinduzierte Änderungen der mineralogischen Zusammensetzung sowie der physikochemischen und geomechanischen Eigenschaften der Tonminerale führen. Dies geht möglicherweise einher mit einer Abnahme des Sorptionsvermögens und einem zumindest partiellen Verlust der plastischen Gesteinseigenschaften. Durch die Wärmeabgabe der Endlagerbehälter kann es zu Schrumpfungen des Tongesteins kommen, was zur Entstehung von Klüften und damit zur Erhöhung der hydraulischen Durchlässigkeit führt.

Da die Dammbauwerke am Rande der Einlagerungsstrecken liegen, wird die Temperaturentwicklung dort geringer sein als direkt in den Einlagerungsfeldern bzw. – strecken. Eine Berechnung von Jobmann et al. (2016) zeigt, dass die Temperatur 15 m vom Einlagerungsort (Abfallbehälter) zu keinem Zeitpunkt über 80⁰ C beträgt.

Jobmann et al. (2016) stellen zudem weitere Untersuchungen über die hydraulische Leitfähigkeit eines über mehrere Jahre auf bis zu 150 °C erhitzten Na-Bentonits in einem In-situ-Versuch im Untertagelabor Äspö vor. Danach unterschied sich hydraulische Leitfähigkeit nicht signifikant von derjenigen nicht erhitzter Bentonite. In einem anderen In-situ Versuch im UTL Äspö wurden ebenfalls keine signifikanten Unterschiede in der hydraulischen Leitfähigkeit für die bis auf 125°C erhitzten und nicht erhitzten Bentonite festgestellt.

Die Erwärmung eines gesättigten Tonsteins führt zu einer Erhöhung des Porendruckes durch die thermische Ausdehnung des Porenfluides. Dadurch werden hydraulische Druckgradienten im Tonstein erzeugt, die dazu führen, dass Fluide, die sich in den Poren befinden, in Richtung des geringeren Druckes zu migrieren beginnen. Dieser Prozess ist zeitlich begrenzt und reversibel, solange die effektive Spannung nicht die Zugfestigkeit des Gesteins übersteigt.

Das durch die Metallkorrosion erzeugte **Gas** beeinflusst die Permeabilitätsentwicklung der Verschlüsse für Lösungen nur unwesentlich. Nach Aufsättigung der Bentonitabdichtungen wird dort eine Permeabilität von $<10^{-20} \text{ m}^2$ vorherrschen. Die Aufsättigung benötigt, je nach Permeabilität des ewG, mehrere hundert Jahre. Die Temperaturentwicklung kann infolge Dampfbildungsprozessen zu einer Verzögerung der Aufsättigung um einige hundert Jahre führen. Da im Sicherheitskonzept für End- bzw. Tiefenlager im Tonstein vom Einschluss der Radionuklide in den Behältern über mindestens tausend Jahre ausgegangen wird, ist der Einfluss des Gasdrucks auf die Permeabilitätsreduktion der Bentonitabdichtungen im Hinblick auf eine Radionuklidfreisetzung aus den Einlagerungsbereichen als gering einzustufen (GRS 2010-3).

Auswirkungen des Ereignisses auf die Gaspermeabilität sind nicht auszuschliessen, werden jedoch mit Blick auf die rückhaltenden Eigenschaften der Abdichtungen nur als gering eingestuft. Das für diese Aussage erforderliche Prozessverständnis wird als ausreichend hoch angesehen (GRS 2010-3).

Ergebnis: Die Auswirkungen der inneren Einflussgrößen Wärme- und Gasentwicklung auf die Permeabilität und Porosität des Dichtelementes Bentonit bei Lagerung in Tonstein sind jeweils als gering zu bewerten (Bewertungsstufe 4).

(c) Auswirkungen von Gas und Wärme auf die Diffusivität des Dichtelementes Bentonit bei Lagerung in Tonstein

Die Bentonitabdichtung nimmt nach GRS (2010-3) nach Einbau und insbesondere nach ihrer Aufsättigung Permeabilitäten, Porositäten und insbesondere Diffusivitäten an, die dem Wirtsgestein ähnlich sind. Das durch Wärme- und Gasentwicklung sich einstellende Druckniveau hat keinen wesentlichen Einfluss auf diese Verhältnisse. Das für diese Aussage erforderliche Prozessverständnis wird als ausreichend hoch angesehen. Die Auswirkungen von Wärme und Gas auf die Diffusivität werden als gering eingestuft.

Ergebnis: Die Auswirkungen der inneren Einflussgrößen Wärme- und Gasentwicklung auf die Diffusivität des Dichtelementes Bentonit bei Lagerung in Tonstein sind als gering zu bewerten (Bewertungsstufe 4).

(d) Auswirkungen von Gas und Wärme auf die Sorption des Dichtelementes aus Bentonit bei Lagerung in Tonstein

Jobmann et al. (2016) haben ermittelt, dass für Europium, Nickel und eine Gruppe der dreiwertigen Transurane mit einer erhöhten Sorption gerechnet werden kann, wenn sich die Temperatur des Tonsteins erhöht. Allein für Cäsium ist eine Verringerung der Sorptionsfähigkeit zu erwarten. In Summe betrachtet, werden die Sorptionsfähigkeit und damit das Rückhaltevermögen mit steigender Temperatur vergrößert. Dies gilt auch für Tonminerale in geotechnischen Barrieren. Insgesamt ist die Datenlage zum Temperatureinfluss auf die Sorptionseigenschaften der Tonminerale derzeit auf wenige Radionuklide bzw. Radionuklidanaloga sowie Minerale begrenzt und somit unvollständig.

Da der Aufbau eines Gasdruckes nur geringen Einfluss auf die Lösungsporosität hat, ist ein Einfluss auf die Größe der reaktiven Mineraloberflächen auszuschließen. Ein Einfluss auf die weiteren Parameter, die die Sorption bestimmen, kann mit großer Sicherheit ausgeschlossen werden. Der Gasdruckaufbau hat folglich keinen Einfluss auf die Sorptionseigenschaften des Bentonitverschlusses.

Das für diese Aussage erforderliche Prozessverständnis wird von GRS (2010-3) als ausreichend hoch angesehen. Die Auswirkungen von Wärme- und Gasentwicklung auf die Sorption werden deshalb als gering eingestuft.

Ergebnis: Die Auswirkungen der inneren Einflussgrößen Wärme- und Gasentwicklung auf die Sorption des Dichtelementes Bentonit bei Lagerung in Tonstein sind gering zu bewerten (Bewertungsstufe 4).

C.4.3 Zusammenfassende Bewertung der Auswirkungen von Gas und Wärme auf die Komponente Abdichtung/Dämme

Die Tabelle C-6 zeigt, dass der Einfluss von Wärme und Gas auf die RSF-Parameter des Dichtelementes Salzbeton insgesamt mäßig ist. Sorption wird bei Salzbeton nicht bewertet. Bei dem Dichtelement Bentonit ist der Einfluss von Wärme und Gas für alle RSF-Parameter als gering zu bewerten.

Zu beachten ist, dass wegen der gleichen Bewertungsergebnissen für Gas und Wärme jeweils für Salzbeton bzw. Bentonit keine diesbezügliche Differenzierung in den Tabellen C-5 und C-6 vorgenommen wurde.

In Tabelle C-7 werden die RSF-Parameter auf die Sicherheitsfunktionen hin aggregiert dargestellt. Danach ist der Einfluss von Wärme und Gas auf die Sicherheitsfunktion „Begrenzung/Verhinderung von Lösungsbewegung u. Radionuklidtransport“ für das Dichtelement Salzbeton mäßig stark, und für Bentonit gering zu bewerten. Für die Sicherheitsfunktion „Verzögerung der Radionuklid- ausbreitung durch Sorption“ ist der Einfluss von Wärme und Gas ebenfalls nur gering für das Dichtelement Bentonit. Bei Salzbeton ist es ohne Bedeutung.

C.5 Vertrauen in die Erfüllung sicherheitskonzeptioneller Auslegungsanforderungen an Abdichtungen/Dammbauwerke

In den folgenden Unterkapiteln wird die Erfüllung der Auslegungsanforderungen für die verschiedenen RSF-Parameter überprüft und bewertet (getrennt nach Lagerung in Salz und in Tonstein). Dabei werden auch Ergebnisse aus anderen Bewertungsfeldern mit einbezogen.

Die Bewertungen beziehen sich immer auf den Zeitraum, in dem Dammbauwerke auf Grund des Sicherheitskonzeptes (s. Bericht, Kap. 3) voll wirksam sein müssen. Für Dammbauwerke ist das der Zeitraum bis 10.000 Jahre. Dammbauwerke haben ihre Hauptfunktion in eine schnell wirksame Abdichtung der Einlagerungsbereiche. Für längere Zeiträume kann Dammbauwerken eine sicherheitsmäßige Bedeutung zukommen, sie ist aber sicherheitskonzeptuell nicht mehr notwendig.

Komponente ABDICHTUNG / DÄMME	TE + TM in Salz (steil u. flach)	TE + TM Tonstein	Anmerkung
RSF-Parameter	Salzbeton (Gas u. Wärme)	Bentonit (Gas u. Wärme)	
Permeabilität	3	4	Keine Differenzierung zwischen Salz (flach u. steil) möglich;
Porosität	3	4	
Diffusivität	3	4	
Sorption	n.b.	4	Keine Differenzierung zwischen EL und TL möglich

Tab. C-6: Zusammenfassung der Ergebnisse der Auswirkungen der Einflussgrößen Wärme- und Gasentwicklung auf die RSF-Parameter der Dichtelemente Salzbeton und Bentonit bei Tiefenlagern in Salz und Tonstein (TE: Endlager, TM: Tiefenlager mit Monitoring und Maßnahmen zur Rückholbarkeit; Bewertung: 5 sehr geringe/Vernachlässigbare Auswirkungen bis 1 sehr starke Auswirkungen; n.b. = nicht bewertet; Hinweis: je geringer die Auswirkungen, umso höher die Robustheit)

Komponente ABDICHTUNG / DÄMME		TE + TM Salz (steil- u. flachlagernd)	TE + TM Ton- stein
Rückhaltende Sicher- heitsfunktionen	zugehörige RSF-Parameter	Dichtmaterial Salzbeton (Gas u. Wärme)	Dichtmaterial Bentonit (Gas u. Wärme)
Begrenzung/Verhinderung v. Lösungsbewegung u. RN-Transport	Permeabilität	3	4
	Porosität		
	Diffusivität		
Verzögerung der RN- Ausbreitung d. Sorption	Sorption	n.b.	4

Tab. C-7: Aggregation der Bewertungsergebnisse über die Auswirkungen der Einflussgrößen Wärme- und Gasentwicklung auf die Sicherheitsfunktionen der Dichtelemente Salzbeton und Bentonit bei Tiefenlagern (TE: Endlager, TM: Tiefenlager mit Monitoring und Maßnahmen zur Rückholbarkeit; Bewertung: 5 sehr geringe/vernachlässigbare Auswirkungen bis 1 sehr starke Auswirkungen; n.b. = nicht bewertet; Hinweis: je geringer die Auswirkungen, umso höher die Robustheit)

C.5.1 Erfüllung der Auslegungsanforderung für Salzbeton bei Lagerung im Salz

(a) Vertrauen in die Erfüllung der Auslegungsanforderungen zur Permeabilität bei Dammbauwerken in Salz

Die Konvergenzentwicklung des Wirtsgesteines soll durch Kompaktion der Auflockerungszone um die abzudichtende Strecke und den Salzbeton als Dichtelement zu einem diffusionsdominierten System führen, bei dem der advective Anteil am Lösungstransport auch im Bereich der Abdichtung vernachlässigbar gering ist. Nur so ist Isolation der Radionuklide im ewG langfristig zu gewährleisten.

Zentrale Anforderung an die integrale Dammpermeabilität ist die Unterschreitung des Parameterwertes $< 1 \times 10^{-19} \text{ m}^2$. Die Ergebnisse der vorherigen Arbeitsschritte zeigen, dass die Charakterisierung des RSF-Parameters Permeabilität im Ist-Zustand nur eine mäßige Bewertung erlaubt. Gleiches gilt für das Vertrauen in die Prognostizierbarkeit des Parameters. Andererseits zeigen die Ergebnisse der Auswirkungen von Wärme- und Gasentwicklung auf die Permeabilität, dass diese ebenfalls mäßig zu bewerten sind. Hauptgrund der Einzelbewertungen liegen vor allem in der Unsicherheit über den tatsächlich zu erreichenden Einbauzustand des Salzbetons und die Wirksamkeit des Übergangsbereichs Salzbeton zu Wirtsgestein. Im Ergebnis kann das Vertrauen in die Erfüllung der Auslegungsanforderung gleichfalls nur mäßig sein.

Ergebnis: Das Vertrauen in die Erfüllung der Anforderung des RSF-Parameters Permeabilität für das Dichtelement Salzbeton wird unter Berücksichtigung der Ergebnisse anderer Bewertungsfelder als mäßig bewertet. (Bewertungsstufe 3). Die Bewertung bezieht sich auf den Zeitraum bis 10.000 a.

(b) Vertrauen in die Erfüllung der Auslegungsanforderungen zur Porosität bei Dammbauwerken in Salz

Eine konkrete Auslegungsanforderung existiert nach GRS (2010-3) für die Porosität nicht. Porosität und Permeabilität sind jedoch physikalisch gekoppelte Größen und können deshalb im Zusammenwirken betrachtet werden. Im Hinblick auf die zentrale Anforderung eines diffusionsdominierten Radionuklidtransports gelten für die Porosität somit sinnentsprechend die gleichen Einschätzungen hinsichtlich der Erfüllung der Auslegungsanforderung wie für die Permeabilität.

Auch die Charakterisierung des RSF-Parameters Porosität im Ist-Zustand wird für Salz nur mäßig bewertet. Gleiches gilt für seine Prognostizierbarkeit. Zudem ist die Einschätzung der Auswirkungen auf die Wärme- und Gasentwicklung des Parameters ebenfalls nur als mäßig zu bewerten. Im Ergebnis kann das Vertrauen in die Erfüllung der Auslegungsanforderung gleichfalls nur mäßig sein (Bewertungsstufe 3).

Ergebnis: Das Vertrauen in die Erfüllung der Anforderung des RSF-Parameters Porosität für das Dichtelement Salzbeton wird unter Berücksichtigung der Ergebnisse anderer Bewertungsfelder als mäßig bewertet. (Bewertungsstufe 3). Die Bewertung bezieht sich auf den Zeitraum bis 10.000 a.

(c) Vertrauen in die Erfüllung der Auslegungsanforderungen zur Diffusivität bei Dammbauwerken in Salz

Die Charakterisierung des Parameters im Ist-Zustand ist mäßig, gleiches gilt für seine Prognostizierbarkeit. Auch die Auswirkungen von Wärme- und Gasentwicklung auf die Diffusivität sind als mäßig zu bewerten. Damit führt die aggregierte Einstufung des Vertrauens in den Parameterwert zu eine mäßigen Bewertung.

Die allgemeine Anforderung an die Diffusivität an das Dichtelement ist weniger scharf. Die Auslegungsanforderung an die Diffusionskonstante der Radionuklide liegt nach (Rübel & Mönig 2010) bei $D_p < 1 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$. Der Wert resultiert nach GRS (2010-3) hauptsächlich aus der Unsicherheit über den Parameter. Ungeachtet der ansonsten mäßigen Bewertungen des Parameters gilt es als sehr sicher, dass die Anforderung an die Auslegungsgröße eingehalten werden kann, denn sie bezieht sich auf ein nicht diffusionsdominiertes System.

Trotz der nur mäßigen Bewertung des Diffusivität bei anderen Bewertungsfeldern besteht ein hohes Vertrauen darin, dass die Auslegungsanforderung erfüllt wird (Bewertungsstufe 4).

Ergebnis: Das Vertrauen in die Erfüllung der Anforderung des RSF-Parameters Diffusivität für das Dichtelement Salzbeton wird unter Berücksichtigung der Ergebnisse anderer Bewertungsfelder als mäßig bewertet. (Bewertungsstufe 4). Die Bewertung bezieht sich auf den Zeitraum bis 10.000 a.

(d) Vertrauen in die Erfüllung der Auslegungsanforderungen zur Sorption bei Dammbauwerken in Salz

Dieser Aspekt ist ohne Bedeutung bei Salzbeton. Deshalb wird er nicht bewertet.

C.5.2 Erfüllung der Auslegungsanforderung für Bentonit bei Lagerung in Tonstein

(a) Vertrauen in die Erfüllung der Auslegungsanforderungen zur Permeabilität bei Dammbauwerken in Tonstein

Zentrale Anforderung an die integrale Dammpermeabilität ist die Unterschreitung des Parameterwertes $< 10^{-19} \text{ m}^2$. Unter dieser Bedingung stellt das Dammbauwerk ein diffusionsdominiertes System dar. Dieser Parameterwert wird erst erreicht bzw. unterboten nach Aufsättigung des Bentonits. Der Aufsättigungsprozess kann wegen des Temperatureinflusses mehrere hundert Jahre dauern. Auch die Auflockerungszone erreicht nach GRS (2010-3) den Wert nach kurzer Zeit. Während des Aufsättigungszeitraumes müssen deshalb die Abfallbehälter die Isolation der Radionuklide für mindestens tausend Jahre gewährleisten (s. Anhang A).

In den vorherigen Kapiteln wurde die Charakterisierung des Parameters als hoch bewertet, und gleiches gilt auch für das Vertrauen in seine Prognostizierbarkeit. Der Einfluss der Einwirkungen der Wärme- und Gasentwicklung auf die Permeabilität wurde als gering bewertet.

Unter Berücksichtigung der genannten Bewertungen wird die Erfüllung der Anforderungen an die Permeabilität als hoch eingeschätzt (Bewertungsstufe 4).

Ergebnis: Das Vertrauen in die Erfüllung der Anforderung des RSF-Parameters Permeabilität für das Dichtelement Bentonit wird unter Berücksichtigung der Ergebnisse anderer

Bewertungsfelder als hoch bewertet. (Bewertungsstufe 4). Die Bewertung bezieht sich auf den Zeitraum bis 10.000 a.

(b) Vertrauen in die Erfüllung der Auslegungsanforderungen zur Porosität bei Dammbauwerken in Tonstein

Eine konkrete Auslegungsanforderung existiert nach GRS (2010-3) für die Porosität nicht. Porosität und Permeabilität sind jedoch physikalisch gekoppelte Größen und können deshalb im Zusammenwirken betrachtet werden. Im Hinblick auf die zentrale Anforderung eines diffusionsdominierten Radionuklidtransports gelten für die Porosität somit sinnentsprechend die gleichen Einschätzungen hinsichtlich der Erfüllung der Auslegungsanforderung wie für die Permeabilität.

Auch die Charakterisierung des GSF-Parameters Porosität im Ist-Zustand wird für Dammbauwerke in Tonstein hoch bewertet. Gleiches gilt für seine Prognostizierbarkeit. Andererseits wird die Einschätzung der Auswirkungen der Wärme- und Gasentwicklung auf den Parameter nur als gering bewertet. Im Ergebnis kann das Vertrauen in die Erfüllung der Auslegungsanforderung gleichfalls nur mäßig sein (Bewertungsstufe 4).

Ergebnis: Das Vertrauen in die Erfüllung der Anforderung des RSF-Parameters Porosität für das Dichtelement Bentonit wird unter Berücksichtigung der Ergebnisse anderer Bewertungsfelder als hoch bewertet. (Bewertungsstufe 4). Die Bewertung bezieht sich auf den Zeitraum bis 10.000 a.

(c) Vertrauen in die Erfüllung der Auslegungsanforderungen zur Diffusivität bei Dammbauwerken in Tonstein

Nach Aufsättigung wird laut Angabe der GRS (2010-3) als Auslegungsgröße eine Diffusionskonstante $D_p < 5 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ gefordert, die in etwa der des unverritzten Tonsteins entspricht. Danach wird diese Auslegungsanforderung an die Diffusivität mit hoher Sicherheit eingehalten. Es bestehen allerdings geringe Restunsicherheiten bezüglich der homogenen Aufsättigung des Bentonitverschlusses.

Unter Berücksichtigung der weiteren Bewertungen zum Parameter Diffusivität, die sowohl für den Ist-Zustand des Parameters als auch für seine Prognostizierbarkeit eine hohe Charakterisierbarkeit aufweisen sowie der sehr geringe Einfluss von Wärme- und Gasentwicklung auf die Diffusivität, führt eine Aggregation dieser Bewertungen zu einem hohen Vertrauen, dass die Auslegungsanforderungen an die Diffusivität bei Dammbauwerken aus Bentonit mit hoher Sicherheit erfüllt werden (Bewertungsstufe 4).

Ergebnis: Das Vertrauen in die Erfüllung der Anforderung des RSF-Parameters Diffusivität für das Dichtelement Bentonit wird unter Berücksichtigung der Ergebnisse anderer Bewertungsfelder als hoch bewertet. (Bewertungsstufe 4). Die Bewertung bezieht sich auf den Zeitraum bis 10.000 a.

(d) Vertrauen in die Erfüllung der Auslegungsanforderungen zur Sorption bei Dammbauwerken in Tonstein

Es bestehen keine nuklidspezifischen quantitativen Anforderungen an die Sorptionseigenschaften der Verschlüsse der Einlagerungsstrecken. Allerdings wird davon ausgegangen, dass die Verschlüsse Sorptionseigenschaften aufweisen, die denen des Wirtsgesteins des ewG gleichen. Demnach müssen auch in Bentonitverschlüssen gegenüber kationischen Radionukliden, die in den radioaktiven Abfällen enthalten sind, hohe Sorptionskapazitäten bestehen. Je stärker diese Wirkung, umso günstiger ist die Rückhaltung im Verschluss.

GRS (2010-3) geht davon aus, dass eine sorptionsbedingte Rückhaltung für kationische Radionuklide bei K_d -Werten $>0,005 \text{ m}^3/\text{kg}$ gegeben ist. Für die überwiegende Anzahl der kationischen Radionuklide besteht deshalb eine sehr weitgehende sorptionsbedingte Rückhaltung am Tonstein des ewG. Da bei einem Dammbauwerk aus Bentonit ähnliche K_d -Werte wie bei Tonstein vorliegen, kann die Auslegungsanforderung an die Sorptionseigenschaften deshalb mit großer Sicherheit eingehalten werden.

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse der sonstigen Bewertungen zur Sorption, die eine hohe Charakterisierbarkeit für den Ist-Zustand und ein gleichfalls hohes Vertrauen in die Prognostizierbarkeit des Parameters ergeben, führt eine Aggregierung der Bewertungen zu einem insgesamt hohen Vertrauen in die Auslegungsanforderung (Bewertungsstufe 4). Gestützt wird dies durch die geringen Auswirkungen der Wärme- und Gasentwicklung auf die Sorption.

Ergebnis: Das Vertrauen in die Erfüllung der Anforderung des RSF-Parameters Sorption für das Dichtelement Bentonit wird unter Berücksichtigung der Ergebnisse anderer Bewertungsfelder als hoch bewertet. (Bewertungsstufe 4). Die Bewertung bezieht sich auf den Zeitraum bis 10.000 a.

C.5.3 Zusammenfassende Bewertung des Vertrauens in die Erfüllung sicherheitskonzeptioneller Anforderungen an die Abdichtungen

Die Tabelle C-8 zeigt, dass das Vertrauen in die Erfüllung sicherheitskonzeptioneller Anforderungen an die RSF-Parameter des Dichtelementes Salzbeton insgesamt mäßig ist (abgesehen von hohem Vertrauen bei Diffusivität). Sorption wird bei Salzbeton nicht bewertet. Bei dem Dichtelement Bentonit ist das Vertrauen in die Erfüllung sicherheitskonzeptioneller Anforderungen an die RSF-Parameter durchweg als hoch zu bewerten.

In Tabelle C-9 werden die RSF-Parameter auf die Sicherheitsfunktionen hin aggregiert dargestellt. Danach ist das Vertrauen in die Erfüllung sicherheitskonzeptioneller Anforderungen für die Sicherheitsfunktion „Begrenzung/Verhinderung von Lösungsbewegung u. Radionuklidtransport“ für

Erfüllung der sicherheitskonzeptionellen Auslegungsanforderungen der Abdichtungen			
Komponente ABDICHTUNG / DÄMME	TE + TM in Salz (steil u. flach)	TE + TM Tonstein	Anmerkung
RSF-Parameter	Salzbeton	Bentonit	
Permeabilität	3	4	Keine Differenzierung zwischen Salz (flach u. steil) möglich; Keine Differenzierung zwischen End- und Tiefenlager möglich
Porosität	3	4	
Diffusivität	4	4	
Sorption	n.b.	4	

Tab. C-8: Zusammenfassung der Ergebnisse zum Vertrauen in die Erfüllung sicherheitskonzeptioneller Anforderungen der RSF-Parameter an die Dichtelemente Salzbeton und Bentonit bei End- bzw. Tiefenlager in Salz und Tonstein (TE: Endlager, TM: Tiefenlager mit Monitoring und Maßnahmen zur Rückholbarkeit; Bewertung: 5 sehr hohes Vertrauen bis 1 sehr geringes / vernachlässigbares Vertrauen; nb. = nicht bewertet)

das Dichtelement Salzbeton als mäßig zu bewerten, und für Bentonit hoch zu bewerten. Für Sicherheitsfunktion „Verzögerung der Radionuklid Ausbreitung durch Sorption“ ist das Vertrauen in die Erfüllung sicherheitskonzeptioneller Anforderungen für das Dichtelement Bentonit hoch zu bewerten. Bei Salzbeton ist dieser Aspekt ohne Bedeutung.

Erfüllung der sicherheitskonzeptionellen Auslegungsanforderungen der Abdichtungen			
Komponente ABDICHTUNG / DAMM		EL + TL Salz (steil- u. flachlagernd)	EL + TL Tonstein
Rückhaltende Sicherheitsfunktionen	zugehörige RSF-Parameter	Salzbeton	Bentonit
Begrenzung/Verhinderung v. Lösungsbewegung u. RN-Transport	Permeabilität	3	4
	Porosität		
	Diffusivität		
Verzögerung der RN-Ausbreitung d. Sorption	Sorption	n.b.	4

Tab. C-9: Aggregation der Bewertungsergebnisse über das Vertrauen in die Erfüllung sicherheitskonzeptioneller Anforderungen an die Abdichtungen Salzbeton und Bentonit für die zugehörigen Sicherheitsfunktionen von Tiefenlagern (TE: Endlager, TM: Tiefenlager mit Monitoring und Maßnahmen zur Rückholbarkeit; Bewertung: 5 sehr hohes Vertrauen bis 1 sehr geringes/vernachlässigbares Vertrauen; n.b. = nicht bewertet)

C.6 Aggregation der Einzelbewertungen zur Ermittlung der Robustheit der radionuklidrückhaltenden Sicherheitsfunktionen bei Abdichtbauwerken/Dämmen

In diesem letzten Arbeitsschritt werden die Robustheiten der radionuklidrückhaltenden Sicherheitsfunktionen der Systemkomponente Abdichtungen/Dämme der Einlagerungsbereiche gegenüber dem Rest des Endlager- bzw. Tiefenlagerbergwerks über die verschiedenen Wirkzeiträume durch Aggregation der RSF-Parameter ermittelt. **Diese Robustheit lässt sich ausdrücken als Vertrauen in die Wirksamkeit der rückhaltenden Sicherheitsfunktionen der Komponente Abdichtungen/Dämme** für End- bzw. Tiefenlager in Salz und Tonstein über die zu betrachtenden Wirkzeiträume ($t < 1.000$ a, $t = 1.000$ bis 10.000 Jahre und $t > 10.000$ Jahre). Dabei ist zu beachten, dass für Abdichtungen/Dämme bei End- oder Tiefenlagerung in Steinsalz und Tonstein sicherheitskonzeptionell nur eine Funktionsfähigkeit der abdichtenden Elemente von rund 10.000 Jahren erforderlich ist. Der Zeitraum $t > 10^4$ Jahre wird deshalb nicht mehr für alle RSF-Parameter bewertet, obwohl angenommen werden kann, dass die Abdichtungen wahrscheinlich auch dann noch eine im Einzelnen aber unbekannte Rückhalteleistung aufweisen.

Aufgrund der engen Verflechtung von Abhängigkeiten ist eine **Kompensation** besserer oder schlechterer Bewertungen von Parametern nicht möglich, entscheidend für die Gesamtbewertung ist der Parameter, zu dem das **geringste Vertrauen** in die Erfüllung der Auslegungsanforderungen besteht. Die Ermittlung der Robustheit geschieht durch Aggregation der RSF-Parameter der einzelnen Sicherheitsfunktionen (s. Tab. C-3, C-5, C-7, C-9) über die vier Bewertungsfelder (s. Kap. C.1) hin zu den zwei Sicherheitsfunktionen der Komponente Streckenabdichtungen/Dämme.

Robustheit der Systemkomponente Streckenabdichtung/Dämme						
Radionuklidrückhaltende Sicherheitsfunktionen	Salz (steile u. flache Lagerung) Abdichtung Salzbeton TE + TM			Tonstein Abdichtung Bentonit TE + TM		
Wirkzeiträume	$t < 1.000$ a	1.000 bis 10^4 a	$t > 10^4$ a	$t < 1.000$ a	1.000 bis 10^4 a	$t > 10^4$ a
Begrenzung/Verhinderung von Lösungsbewegung und Radionuklidtransport	Ro3	Ro3	Ro3	Ro4	Ro4	Ro4
Verzögerte RN-Ausbreitung durch Sorption	n.b.	n.b.	n.b.	Ro4	Ro4	Ro4

Tab. C-10: Zusammenfassende Bewertung der Robustheit (Ro) der rückhaltenden Sicherheitsfunktionen für die Systemkomponente Abdichtung/Dämme für unterschiedliche Wirkzeiträume (TE: Endlager, TM: Tiefenlager mit Monitoring und Maßnahmen zur Rückholbarkeit; Bewertung: 5 sehr hohe Robustheit bis 1 sehr geringe Robustheit; n.b. = nicht bewertet)

Tabelle C-10 zeigt, dass die Robustheit der Sicherheitsfunktion „*Begrenzung/Verhinderung von Lösungsbewegung und Radionuklidtransport*“ für die Komponente Abdichtung/Dämmelemente für End- bzw. Tiefenlagerung in Steinsalz mit dem Dichtelement Salzbeton eine mäßige Bewertung aufweist (Bewertungsstufe 3). Die Sicherheitsfunktion „*Sorption*“ ist in Salz ohne Bedeutung.

Die Robustheit der beiden Sicherheitsfunktionen für End- bzw. Tiefenlagerung in Tonstein mit dem Dichtelement Bentonit wird für jede der beiden Sicherheitsfunktionen mit hoch bewertet (Bewertungsstufe 4).

Hinweise zur Ermittlung der Robustheit der zwei radionuklidrückhaltenden Sicherheitsfunktionen:

Lagerung in Salz: Abdichtelement Salzbeton

Sicherheitsfunktion: Begrenzung/Verhinderung von Lösungsbewegung und Radionuklidtransport

Die aggregierten Gesamtrobustheiten der einzelnen RSF-Parameter ergeben eine **mäßige Robustheit (Bewertungsstufe 3)** für diese Sicherheitsfunktion im relevanten Zeitraum bis 10.000 Jahren. Wesentliche Argumente für die nur mäßige Robustheit der Sicherheitsfunktion sind die derzeit immer noch offenen Fragen und das noch nicht ausreichendes Prozessverständnis hinsichtlich der Korrosion von Salzbeton unter bestimmten chemischen Bedingungen, der Probleme der thermisch bedingten Rissbildung bei Abkühlung des Salzbetons und des upscalings von Ergebnissen aus Laborversuchen auf benötigte Größenverhältnisse.

Für den Zeitraum ≥ 10.000 a wird ebenfalls von einer mäßigen Robustheit der Sicherheitsfunktion ausgegangen, wobei diese Bewertung ungewiss ist. Da aber die Relevanz der Sicherheitsfunktion für diesen Zeitraum nur sehr gering ist, ist der Aspekt ohne größere Bedeutung.

Sicherheitsfunktion: Verzögerung der Radionuklidausbreitung durch Sorption

Nicht bewertet, ohne Bedeutung bei Salzbeton.

Lagerung in Tonstein: Abdichtelement Bentonit

Sicherheitsfunktion: Begrenzung/Verhinderung von Lösungsbewegung und Radionuklidtransport

Die aggregierten Gesamtrobustheiten der einzelnen RSF-Parameter ergeben eine **hohe Robustheit (Bewertungsstufe 4)** für diese Sicherheitsfunktion für den gesamten Nachweiszeitraum. Wesentlich zu dieser Bewertung beigetragen haben die bisher schon vorliegenden Kenntnisse und das Prozessverständnis über die Eigenschaften von Bentonit als Dichtmaterial. Insbesondere nach Aufsättigung und Quellung des Bentonits werden Permeabilitäten und Porositäten erreicht, bei denen Diffusion gegenüber Advektion vorherrscht. Allerdings ist zu beachten, dass die Aufsättigung eine gewisse Zeit benötigt. Diese Zeitspanne ist sicherheitskonzeptionell jedoch durch die Komponente Abfallbehälter abgedeckt.

Sicherheitsfunktion: Verzögerung der Radionuklidausbreitung durch Sorption

Die Bewertung der Sicherheitsfunktion „Verzögerung der Radionuklidausbreitung durch Sorption“ ergibt eine **hohe Robustheit (Bewertungsstufe 4)** für den gesamten Nachweiszeitraum. Gründe dafür sind u.a. die Erkenntnis, dass Bentonit eine nahezu vollständige sorptionsbedingte Rückhaltung für kationische Radionuklide aufweist und dass eine realistische Abschätzung der minimalen Sorption mit hoher Wahrscheinlichkeit möglich ist.

C.7 Quellen zu Anhang C

BfS – Bundesamt für Strahlenschutz (2003): Planfeststellungsverfahren zur Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfälle Morsleben – Verfahrensunterlage P-180: Endlager Morsleben – Korrosion von Salzbeton durch salinare Lösungen.- Autoren: Meyer, T, Herbert, H. J., Schmidt-Döhl, F., erarbeitet von GRS und iBMB/MPA, Salzgitter.

DBEtec (2008): EUGENIA -: Entwicklung und Umsetzung von technischen Konzepten für geologische Endlager in allen Wirtsgesteinen.- AP 7 - Verfüll- und Verschlusskonzepte, Autor: Lommerzheim, A., Dezember 2008, Peine.

DBE (2004): Verfüllmaterial für Strecken mit hohen Anforderungen. Materialeigenschaften und Materialkennwerte von Salzbeton M2.-Verfahrensunterlage P129, Peine.

ENTRIA-AB-03 (2015): Entria Arbeitsbericht-03 „Generische Tiefenlagermodelle mit Option zur Rückholung der radioaktiven Reststoffe: Geologische und Geotechnische Aspekte für die Auslegung“.- Bearbeiter: Stahlmann, J., Leon-Vargas, R., Mintzlaff, V.; Braunschweig, 2015.

GRS - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH (2016): Gesteinverträglichkeit.- Autoren: A. Meleshyn T. Weyand G. Bracke H. Kull K. Wieczorek.- Bearbeitet im Auftrag der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfälle, Auftragsnr. 565003, Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit mbH, Mai 2016.

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

GRS (2010-3): Abwägungsmethodik für den Vergleich von Endlagersystemen in unterschiedlichen Wirtsgesteinsformationen - Bewertung der charakteristischen Parameter rückhaltenden Sicherheitsfunktionen der Verschlüsse (Verschlüsse der Einlagerungsstrecken Tonstein, Abdämmungen der Einlagerungsbereiche Salzstandort Gorleben), 53 S.- Begleitbericht zum Vorhaben 3607R02589 VerSi „Evaluierung der Vorgehensweise“, Bericht GRS A 3536, Köln.

Herbert, H.-J., Freyer, D. Gruner, M. (2011): Kap. 3.7 Nichtarteigene Materialien.- In Bericht GRS-267: Endlagern für wärmeentwickelnde Abfälle in Salzformationen, Workshop der GRS in Zusammenarbeit mit dem Projektträger Karlsruhe PTKA-WTE, Braunschweig, 24. – 25. August 2010, Zusammengestellt von Tilmann Rothfuchs, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH, Januar 2011.

- Jobmann, M., Meleshyn, A., Maßmann, J., Polster, M. (2016): Ableitung und quantitative Formulierung der Integritätskriterien für die geologische Barriere zur Verwendung im Rahmen der Nachweismethodik. Entwurfsfassung vom Stand Dezember 2015, TEC-08-2013-AP, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine, 2016. (zit. nach GRS 2016).
- Lux, K.H., Wolters, R., Zhao, J, Rutenberg, M, Feierabend, J., Pan, T. (2017): TH2M-basierte multi-physikalische Modellierung und Simulation von Referenz-Endlagersystemen im Salinar- und Tonsteingebirge ohne bzw. mit Implementierung einer Möglichkeit für ein direktes Monitoring des längerfristigen Systemverhaltens auch noch nach Verschluss der Einlagerungssohle. - Ein Beitrag zur Verbesserung der Robustheit von Sicherheitsfunktionen mit sehr hoher Relevanz im Hinblick auf die Entwicklung von Bewertungsgrundlagen zum Vergleich von Entsorgungsoptionen.- Arbeitsbericht der ENTRIA-Teilprojekte VP 5.1 und VP 5.2 sowie VP 6.7mod – Februar 2017, Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik, TU Clausthal, Stand Februar 2017.
- Müller-Hoeppel, N., Jobmann, M., Polster, M., Schmidt, H. (2007): The Role of Structural Reliability of Geotechnical Barriers of an HLW/SF Repository in Salt Rock within the Safety Case. OECD/NEA Symposium on Safety Cases for the Deep Disposal of Radioactive Waste–Where do we stand ?” Paris, 23.-25.01.2007.
- Thomauske, B. & Charlier, F. (2013): Vorläufige Sicherheitsanalyse Gorleben - Forschungs- und Entwicklungsbedarf auf Basis der Erkenntnisse aus der VSG sowie Empfehlungen.- Bericht zum Arbeitspaket 14, Bericht GRS-314, März 2013, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit, Köln.
- Rübel, A.& Mönig, J. (2010): Prozesse, Modellkonzepte und sicherheitsanalytische Rechnungen für ein Endlager im Salz. Bericht GRS-A-3521, , Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH, Oktober 2010, Braunschweig.

Anhang D: Bestimmung der Robustheit der radionuklidrückhalten- den Sicherheitsfunktionen der Komponente Schachtver- schluss

<u>Inhaltsverzeichnis</u>	Seite
D.1 Einleitung	4
D.2 Charakterisierung von RSF-Parametern der Sicherheitsfunktionen von Schacht- verschlüssen im Ist-Zustand	5
D.2.1 Charakterisierung des Ist-Zustandes des Schachtverschlusses aus verdichtetem Salzgrus bei Lagerung in Steinsalz	6
D.2.2 Charakterisierung des Ist-Zustandes des Schachtverschlusses aus Bentonit bei Lagerung in Tonstein	8
D.2.3 Zusammenfassende Bewertung der Charakterisierbarkeit der RSF-Parameter der Schachtverschlüsse im Ist-Zustand	10
D.3 Vertrauen in die Prognostizierbarkeit der RSF-Parameter der Sicherheits- funktionen der Schachtverschlüsse im Nachweiszeitraum	11
D.3.1 Vertrauen in die Prognostizierbarkeit des Schachtverschlusses aus Salzgrus bei einem Schacht im Steinsalz	12
D.3.2 Vertrauen in die Prognostizierbarkeit des Schachtverschlusses aus Bentonit bei einem Schacht im Tonstein	13
D.3.3 Zusammenfassende Bewertung des Vertrauens in die Prognostizierbarkeit der RSF-Parameter der Schachtverschlüsse	15
D.4 Änderung der Komponente Schachtverschluss gegenüber inneren Einflüssen des End- bzw. Tiefenlagers (Systemrobustheit)	16
D.4.1 Auswirkungen von Gas und Wärme auf die Komponente Schachtverschluss aus Salzgrus bei Lagerung in Steinsalz	17
D.4.2 Auswirkungen von Gas und Wärme auf die Komponente Schachtverschluss aus Bentonit bei Lagerung in Tonstein	19
D.4.3 Zusammenfassende Bewertung der Auswirkungen von Gas und Wärme auf die Schachtverschlüsse	20

	Seite
D.5 Vertrauen in die Erfüllung sicherheitskonzeptioneller Auslegungsanforderungen an Schachtverschlüsse	22
D.5.1 Vertrauen in die Erfüllung der Auslegungsanforderungen bei einem Dichtelement aus Salzgrus bei Lagerung in Steinsalz	22
D.5.2 Vertrauen in die Erfüllung der Auslegungsanforderungen bei einem Dichtelement aus Bentonit bei Lagerung in Tonstein	24
D.5.3 Zusammenfassende Bewertung des Vertrauens in die Erfüllung sicherheitskonzeptioneller Anforderungen an die Schachtverschlüsse	26
D.6 Aggregation der Einzelbewertungen zur Ermittlung der Robustheit der radionuklidrückhaltenden Sicherheitsfunktionen für die Komponente Schachtverschluss	27
D.7 Quellen zu Anhang D	30

Verzeichnis der Tabellen

Tab. D-1:	Rückhaltende Sicherheitsfunktionen und zugeordnete charakteristische RSF-Parameter für die Komponente Schachtverschluss	6
Tab. D-2:	Charakterisierung der RSF-Parameter im Ist-Zustand für Schachtabdichtungen bei End- bzw. Tiefenlager	11
Tab. D-3:	Aggregierte Ergebnisse für die Bewertung des Vertrauens in die Charakterisierbarkeit der Sicherheitsfunktionen für den Ist-Zustand der Schachtabdichtung	11
Tab. D-4:	Zusammenfassung der Ergebnisse für das Vertrauen in die Prognostizierbarkeit der RSF-Parameter für den Schachtverschluss	15
Tab. D-5:	Aggregierte Bewertungsergebnisse über das Vertrauen in die Prognostizierbarkeit der Sicherheitsfunktionen für die Dichtelemente der Schachtverschlüsse	16
Tab. D-6:	Zusammenfassung der Ergebnisse der Auswirkungen der Einflussgrößen Wärme- und Gasentwicklung auf die RSF-Parameter der Dichtelemente Salz- beton und Bentonit bei End- bzw. Tiefenlager in Salz und Tonstein	21
Tab. D-7:	Aggregation der Bewertungsergebnisse über die Auswirkungen der Einflussgrößen Wärme- und Gasentwicklung auf die Sicherheitsfunktionen der Dichtelemente Salz- beton und Bentonit bei End- bzw. Tiefenlager	21

	Seite
Tab. D-8: Vertrauen in die Erfüllung sicherheitskonzeptioneller Anforderungen der RSF-Parameter der Schachtverschlusselemente Salzbeton und Bentonit bei End- bzw. Tiefenlager in Salz und Tonstein	26
Tab. D-9: Bewertungsergebnisse über das Vertrauen in die Erfüllung sicherheitskonzeptioneller Anforderungen an die Schachtverschlusselemente Salzbeton und Bentonit für die zugehörigen Sicherheitsfunktionen von End- bzw. Tiefenlagern	27
Tab. D-10: Bewertung der Robustheit (Ro) der radionuklidrückhaltenden Sicherheitsfunktionen für die Systemkomponente Schachtverschluss für unterschiedliche Wirkzeiträume	28

D.1 Einleitung

In Anhang D wird die Robustheit der radionuklidrückhaltenden Sicherheitsfunktionen der Komponente Schachtverschluss als qualitative Größe bestimmt (s. Bericht, Kap. 6.2.4). Sie dient im Zusammenspiel mit der Relevanz der entsprechenden Sicherheitsfunktionen der Identifizierung von Robustheitsdefiziten der Sicherheitsfunktionen (vgl. Bericht, Kap. 6.2.5).

Allerdings besteht wegen des generischen Charakters der End- und Tiefenlageroptionen in Entria und den damit zusammenhängenden allgemeinen Aussagen zu Schachtverschlussystemen das Problem, welche Schachtverschlüsse bei Lagerung in Salz bzw. in Tonstein betrachtet werden sollen. Allein in Deutschland sind im Zusammenhang mit der Endlagerung etliche Schachtverschlussysteme mit diversitären und redundanten Abdichtsystemen untersucht worden. Die eigentlichen Dichtelemente bestehen beispielsweise aus Bentonit, Sorelbeton, Salzbeton, Salzgrus oder Asphalt bzw. aus Kombinationen dieser Dichtungselemente (z.B. GRS 2013, GRS 2010, DBEtec 2013, DBEtec 2008). Hinzu treten verschiedene Widerlager, Verfüllsäulen und Filterschichten.

ENTRIA-AB-03 (2015) sind nur wenige Angaben zu den Schächten zu entnehmen. Ihr lichter Durchmesser soll 7,50 m betragen, und bei End- bzw. Tiefenlagerung im Tonstein soll Bentonit als Dichtelement dienen. Über das bzw. die Abdichtelement(e) bei Lagerung in Salz gibt es in ENTRIA-AB-03 (2015) keine Angaben.

Um eine **beispielhafte Bewertung der Robustheit zumindest einzelner Dichtelemente** der Schachtverschlüsse im Rahmen von Entria vornehmen zu können, wird deshalb für das Lager in **Tonstein** ein Dichtelement aus Ca-Bentonit betrachtet, wie es in dem Projekt ANSICHT von GRS/BGR/DBEtec (2017) betrachtet wird. Für ein Lager in **Salzgestein** wird ein Dichtelement aus angefeuchtetem und vorverdichtetem Salzgrus, wie es GRS (2013) als Langzeitdichtung in der Vorläufigen Sicherheitsanalyse Gorleben (VSG) annimmt, betrachtet. Dieses Langzeitdichtelement liegt zwischen 650 und 680 m Teufe im Salzgestein. Der entsprechend des umliegenden Salzgesteins arteigene Salzgrus wird während des Einbaus technisch verdichtet. Zur besseren Verdichtbarkeit ist es notwendig, den Salzgrus anzufeuchten. Langfristig führt die Kompaktion der (Salzgrus-)Langzeitdichtung in Verbindung mit der Konvergenz des umliegenden Gebirges zur Abdichtung des durch den Schachtbau gestörten Gebirgsbereiches. Damit sollen mögliche Zutritte von Fluiden zu den Abfällen und potenzielle Austritte von Lösungen aus dem verschlossenen Tiefenlager über den verschlossenen Schacht heraus verhindert werden.

Diese Betrachtung zweier unterschiedlicher Dichtungselemente ersetzt nicht eine umfassende Analyse und Bewertung von Schachtabdichtungssystemen oder gar konkreten standortspezifischen Schachtabdichtungen. Vielmehr liegt der Zweck darin, zu zwei unterschiedlichen Dichtungsmaterialien über die Bewertung der jeweiligen Parameter der rückhaltenden Sicherheitsfunktionen (RSF-Parameter) Hinweise auf mögliche Robustheitsdefizite der zugehörigen radionuklidrückhaltenden Sicherheitsfunktionen zu erhalten.

Die Bestimmung der Robustheit der Abdichtungen/Dämme geschieht für die **radionuklidrückhaltenden Sicherheitsfunktionen** mit Hilfe der sie kennzeichnenden beiden **RSF-Parameter** (s. Bericht, Kap. 4.2 und Tab. 1):

- Begrenzung/Verhinderung von Lösungsbewegung und Radionuklidtransport (mit den RSF-Parametern Permeabilität, Porosität, Diffusivität),
- Verzögerte Radionuklid Ausbreitung durch Sorption (mit dem RSF-Parameter Sorption).

Dabei wird jede der zwei Sicherheitsfunktionen mit ihren RSF-Parametern in vier **Bewertungsfelder** beurteilt:

- Das Vertrauen in die Charakterisierung des Ist-Zustandes der RSF-Parameter,

- Das Vertrauen in die Prognostizierbarkeit der RSF-Parameter (einschließlich Prozessverständnis),
- Die Bewertung der Auswirkungen interner Systementwicklungen auf die RSF-Parameter,
- Das Vertrauen in die Erfüllung sicherheitskonzeptioneller Auslegungsanforderungen durch die RSF-Parameter.

Abschließend werden die Einzelergebnisse verbalargumentativ aggregiert, so dass sich für jede der radionuklidrückhaltenden Sicherheitsfunktionen eine Aussage über ihre Robustheit ergibt. Soweit möglich und sinnvoll, werden die Robustheitsaussagen zeitlich differenziert für die **Wirkzeiträume** (t bis 10.000 Jahre und $t > 10.000$ Jahre bis max. 100.000 Jahre) abgeleitet. Dabei ist zu beachten, dass die sicherheitsmäßige Bedeutung der Schachtverschlüsse, die sich aus dem Sicherheitskonzept ergibt, auf die ersten zehntausend Jahre beschränkt ist.

Die Bestimmung der Robustheit der rückhaltenden Sicherheitsfunktionen (RSF) der Komponente Schachtverschluss beruht auf verschiedenen Parametern (RSF-Parametern), denen wiederum bestimmte Eigenschaften und Prozesse zugrunde liegen. In Tab. D-1 sind die rückhaltenden Sicherheitsfunktionen und die ihnen zugeordneten RSF-Parameter zusammengestellt. Die einzelnen Eigenschaften und Prozesse werden in den jeweiligen Unterkapiteln behandelt. Sie können auch dem Hauptteil (Tab.1) entnommen werden.

D.2 Charakterisierung von RSF-Parametern der Sicherheitsfunktionen von Schachtverschlüssen im Ist-Zustand

Der Gebrauch von Bentonit oder vorverdichtetem Salzgrus spielt wegen ihrer speziellen Eigenschaften bei der Entwicklung von Schachtabschlussystemen – neben anderen Abdichtungsmaterialien - für End- bzw. Tiefenlager mit stark wärmeentwickelnden Abfällen in Tonstein und Salz eine wichtige Rolle. Deshalb sind diese beiden Materialarten beispielhaft ausgewählt worden, um exemplarisch den hier verfolgten methodischen Ansatz zur Bestimmung von Robustheit, insbesondere aber von Robustheitsdefiziten, auch ohne standortspezifische Daten darzulegen.

Diese Dichtelemente aus Salzgrus und Bentonit sollen schnell wirksam sein und verhindern, dass Lösungen in das End- bzw. Tiefenlagerbergwerk zu einem Zeitpunkt eindringen, bevor der Salzgrusversatz im gesamten Grubengebäude seine volle Wirksamkeit erreicht hat. In GRS (2013) geht man von 50.000 Jahren Wirksamkeit des Dichtelementes aus, Entria nimmt 10.000 a Wirksamkeit an. Die tatsächliche Lebensdauer des Dichtelementes ist offen, und sie hängt von verschiedenen Einflüssen ab (z.B. Entwicklung des Übergangsbereichs Verschluss-Nebengebirge, Chemismus eventuell zutretender Lösungen). Spätestens im Falle der Eisüberföhrung und/oder tiefen Rinnenbildung im Schachtbereich muss von einem Versagen der Dichtung(en) ausgegangen werden.

Komponente Schachtverschluss	Rückhaltende Sicherheits- funktion	TE + TM in Salz RSF-Parameter für Salzgrus	TE + TM in Salz RSF-Parameter für Bentonit
Schachtabdichtung	Begrenzung/ Verhinderung von Lösungsbewegung und Radionuklidtransport	Permeabilität, Poro- sität, Diffusivität,	Permeabilität, Porosität, Diffusivität,
	Verzögerung der Radionukli- dausbreitung durch Sorption	n.b.	Sorption,

Tab. D-1: Rückhaltende Sicherheitsfunktionen und zugeordnete charakteristische RSF-Parameter für die Komponente Schachtverschluss (TE: Endlager, TM: Tiefenlager mit Maßnahmen zur Rückholbarkeit der Abfälle, n.b. nicht bewertet)

D.2.1 Charakterisierung des Ist-Zustandes des Schachtverschlusses aus verdichtetem Salzgrus bei Lagerung in Steinsalz

(a) Ist-Zustand: Ermittlung der Permeabilität bei Schachtverschlüssen aus vorverdichteten Salzgrus

Das aus angefeuchtetem und vorverdichtetem Salzgrus bestehende Dichtelement von 50 m Länge soll im Bereich anstehenden Steinsalzes in die Schachtröhre eingebracht werden und direkt im Kontakt mit dem Steinsalz stehen (GRS 2013). Durch konvergenzbedingte Verdichtung des Salzgruses soll langfristig eine Permeabilität von etwa 10^{-19} m^2 erreicht werden. Zur Messung der Permeabilitätsentwicklung an Salzgrus werden vorrangig folgende drei Versuchsmethoden eingesetzt: Weggeregelte Ödometerversuche, Permeabilitätsversuche im Einaxialpermeameter und Triaxiale Kompaktionsversuche zur Bestimmung des Kompaktionsverhaltens. Die Kenntnis über die Permeabilität des Verschlussmaterialies Salzgrus ist wegen vieler experimenteller Befunde unter Berücksichtigung des Einflusses von Feuchte des Materials, Kerngröße und Einbringtechnik als gut zu bewerten.

Allerdings liegen hinsichtlich des Upscalings, d.h. der Bewertung der integralen Schachtverschlusspermeabilitäten, die aus den Einzelpermeabilitäten des Salzgruselementes, der Kontaktfuge sowie der Auflockerungszone und deren Verbund resultieren, nach GRS (2010-4) nur wenige experimentelle Ergebnisse vor. Insbesondere sind die Gegebenheiten in der Saumzone zum Wirtsgestein nur schwer prüfbar. Hierzu werden weitere Experimente für erforderlich gehalten.

Hinzu tritt das Problem der Porositäts-Permeabilitäts-Beziehung für kleine Porositäten (s. dazu Anhang B). Die Porositäts-Permeabilitätsbeziehungen für Steinsalzgrus sind zurzeit noch Gegenstand der Forschung; dies gilt auch für die Bildung und insbesondere die Rekompaktion der Auflockerungszone selbst (GRS/DBEtec 2012). Zudem muss nach GRS/BGR/DBEtec (2017) die Datenbasis über Messwerte der 2-Phasen-Flussparameter für kompaktierten Salzgrus und Steinsalz deut-

lich verbessert werden. Im Übrigen sind in situ Untersuchungen bzw. Messwerte zur Permeabilität der Auflockerungszone im Steinsalz, insbesondere in Schächten, nur in sehr geringem Umfang verfügbar (BA Freiberg/DBEtec 2013).

Abschließend sei noch auf Aussagen aus BA Freiberg/DBEtec (2013) hingewiesen. Sie sehen derzeit für Schachtverschlüsse von Tiefenlagern und Untertagedeponien im Salinar die Tendenz, art-eigenes Material zum Bau von Widerlagern und der Füllsäule zu benutzen. Derartige Materialien und die zugehörige Einbautechnologien sind jedoch noch in einem Entwicklungsstadium. Es ist derzeit nicht möglich, den Salzgrus mit einer geringeren Porosität als 10% einzubauen und gleichzeitig eine ausreichende Setzungsstabilität zu erreichen.

Ergebnis: Das Vertrauen in die Charakterisierbarkeit der integralen Permeabilität des Salzgrusdichtungselementes im Istzustand wird wegen des Upscalingproblem es und grundlegender offener Fragen trotz zuverlässiger Messmethoden im Labor nur als mäßig eingeschätzt werden (Bewertungsstufe 3).

(b) Ist-Zustand: Ermittlung der Porosität bei Schachtverschlüssen aus vorverdichteten Salzgrus

Die Bestimmung der Porosität des Salzgrusdichte elementes und des anstehenden Salzgesteins kann mittels verschiedener Messverfahren zuverlässig vorgenommen werden (s. dazu Anhang B Salzgrusversatz, Kap. B.2). Hinsichtlich des upscalings gilt jedoch das unter (a) Gesagte: Für die Bewertung der integralen Schachtverschlussporosität (Salzgrusdichtung, Kontaktzone zum Wirtsgestein, Wirtsgestein Salz mit Auflockerungszone) liegen nur wenige experimentelle Ergebnisse vor. Zudem treten hier auch die weiteren unter (a) genannten Probleme bzw. noch nicht gelösten Fragen auf.

Ergebnis: Das Vertrauen in die Charakterisierbarkeit der integralen Porosität des Salzgrusdichtungselementes im Istzustand wird wegen des Upscalingproblem es und grundlegender offener Fragen trotz zuverlässiger Messmethoden im Labor nur als mäßig eingeschätzt werden (Bewertungsstufe 3).

(c) Ist-Zustand: Ermittlung der Diffusivität bei Schachtverschlüssen aus vorverdichteten Salzgrus

Die Diffusivität des Salzgrusdichte elementes wird in Diffusionszellen ermittelt. Mit dieser Messtechnik werden laut GRS (2010-4) gute Ergebnisse erzielt.

Ergebnis: Das Vertrauen in die Charakterisierbarkeit der Diffusivität des Salzgrusdichtungselementes im Istzustand wird als hoch eingeschätzt werden (Bewertungsstufe 4).

(d) Ist-Zustand: Ermittlung der Sorptionseigenschaften bei Schachtverschlüssen aus vorverdichteten Salzgrus

Spielt bei Salzgrus keine Rolle.

Ergebnis: Wird nicht bewertet

D.2.2 Charakterisierung des Ist-Zustandes des Schachtverschlusses aus Bentonit bei Lagerung in Tonstein

(a) Ist-Zustand: Ermittlung der Permeabilität bei Schachtverschlüssen aus Bentonit

Bei Einlagerung in Tonstein besteht das wesentliche (hydraulische) Dichtungselement aus Bentonit. Beispielsweise sieht das schweizer Tiefenlagerkonzept vor, im Opalinuston eine ca. 40 m lange Dichtung aus kompaktiertem Bentonit einzubringen (Nagra 2002). Die Aufgabe dieses Dichtungselementes besteht darin – wie auch bei Salzgrus (s. Kap. 3 Hauptteil) – den Zutritt von Lösungsmitteln in das Lager so lange zu verhindern, bis die dortigen Barrieren (z.B. Versatzmaterial) ihre volle Leistungen erbringen. Dieser Zeitpunkt soll im Verlaufe von 10.000 Jahren erreicht sein.

Unter Berücksichtigung der Auflockerungszone wird eine integrale Permeabilität der Bentonitabdichtung von 10^{-19} m^2 angenommen (GRS 2010-4). Es ist jedoch auch denkbar, dass nach dem Einbau des Bentonits im Zuge der Bentonitaufsättigung der Quelldruck im Bentonitsegment zu einer weitergehenden Reduktion der Permeabilität und der Porosität der Auflockerungszone führt.

Zur Messung der Permeabilitätsentwicklung an Bentonit stehen verschiedene geeignete Methoden zur Verfügung (s. Anhang B, Kap. B.2.2). Aufgrund vieler experimenteller Befunde zum Einfluss der Korngrößenverteilung und des Wassergehaltes auf die Permeabilität ist die Kenntnis darüber bei Einbau des Verschlusses als gut zu bewerten. Die Aussagesicherheit für diesen Befund ist als gut zu bewerten.

Zur Ermittlung der Permeabilität der Auflockerungszone im Tonstein des Schachthohlraumes wurde in Untertagelabors eine Reihe von in situ Untersuchungen durchgeführt, so dass die Kenntnis über Ausdehnung der Auflockerungszone und deren Permeabilität als gut zu bewerten ist (BA Freiberg/DBEtec 2013). Die Befunderhebung weist einen Wert 10^{-19} m^2 auf. Die Aussagesicherheit dafür ist als gut zu bewerten.

Die Bewertung der integralen Schachtverschlusspermeabilitäten, die aus den Einzelpermeabilitäten Bentonitsegment-Kontaktfuge-Auflockerungszone und deren Verbund resultieren (Upscaling), liegen nur wenige experimentelle Ergebnisse vor. Insbesondere sind die Gegebenheiten in der Saumzone zum Wirtsgestein nur schwer prüfbar. Hierzu sind jedoch weitere Experimente erforderlich. Denkbar ist, dass ein Kraftschluss des Bentonits wegen seines Quelldruckes mit der Auflockerungszone unterstellt werden kann.

Festzuhalten bleibt, dass die Aussagesicherheit der Messungen der Permeabilitätsentwicklungen von Bentonit und der Auflockerungszone im Tonstein im Ist-Zustand als gut bewertet werden muss. Zur integralen Verschlusspermeabilität bestehen jedoch noch Fragen, die der Beantwortung harren.

Ergebnis: Das Vertrauen in die Charakterisierbarkeit der integralen Permeabilität der Bentonitabdichtung im Istzustand wird trotz des Upscalingproblem es wegen zuverlässiger Messmethoden im Labor nur als gut eingeschätzt werden (Bewertungsstufe 4).

(b) Ist-Zustand: Ermittlung der Porosität bei Schachtverschlüssen aus Bentonit

Zur Bestimmung der Porosität des Bentonits im Ist-Zustand existieren mehrere Methoden (z.B. Pygrometer-Porosität, Wasserverlust-Porosität), deren Kombination eine gute Aussagekraft hinsichtlich der Gesamtporosität und der effektiven Porosität zulässt. Viele vorliegende experimentelle Befunde zu Kerngrößen- und Feuchteinfluss sowie der Einbringtechnik erlauben es, die

Kenntnis zur Porosität bei Einbau des Verschlusses als gut zu bewerten. Die Aussagesicherheit für diesen Befund ist als gut zu bewerten.

Gleiches gilt bei der Bestimmung der Porosität der Auflockerungszone. Sie wird mit den gleichen Methoden ermittelt. Zur Ermittlung der Porosität der Auflockerungszone im Konturbereich der Hohlräume wurden nach GRS (2010-4) eine Reihe von in situ Untersuchungen durchgeführt, so dass die Kenntnis über Ausdehnung der Auflockerungszone und deren Porosität als gut zu bewerten ist. Die Befunderhebung weist einen Wert von einigen Prozent auf, und die Aussagesicherheit dafür ist als gut zu bewerten.

Hingegen liegen nach GRS (2010-4) nur wenige experimentelle Ergebnisse vor hinsichtlich des Upscalings, d.h. der Bewertung der integralen Schachtverschlussporosität, vor. Sie besteht aus den Einzelporositäten der Bentonitabdichtung, der Kontaktfuge und der Auflockerungszone. Speziell die Gegebenheiten in der Saumzone zum Wirtsgestein sind nur schwer prüfbar. Zu diesem Aspekt werden weitere Experimente für erforderlich gehalten. Die Charakterisierung des Ist-Zustandes der integralen Schachtverschlusspermeabilität ist insgesamt aber wegen der guten Bewertung der Bentonitabdichtung und der Auflockerungszone trotz der begrenzten Aussage zum Upscaling noch als gut zu bewerten.

Ergebnis: Das Vertrauen in die Charakterisierbarkeit der integralen Porosität der Bentonitabdichtung im Istzustand als gut eingeschätzt (Bewertungsstufe 4).

(c) Ist-Zustand: Ermittlung der Diffusivität bei Schachtverschlüssen aus Bentonit

Die Diffusivität der vorkompaktierten Bentonite werden mit Hilfe von Diffusionszellen ermittelt. Umfangreiche Experimente mit kompaktiertem Bentonit sowie Bentonit-Sand-Gemischen liegen vor. Die Aussagesicherheit des Messverfahrens ist als gut zu bezeichnen. Das Upscaling ist ebenfalls als relativ gut anzusetzen, weil die Einbautechnik einen weitgehend homogenen Einbau des Bentonits ermöglicht. Die Aussagesicherheit zur Diffusivität in der Bentonitabdichtung ist deshalb als gut zu bewerten.

Für die Auflockerungszone liegen nur einige wenige Experimente zur Bestimmung der Diffusionskonstante vor. Sie deuten nach GRS (2010-4) darauf hin, dass die Diffusionskonstanten etwa in der Größenordnung des Wirtsgesteins angesetzt werden können. In der Summe ist eine integrale Diffusivität über das Bentonitsegment und die Auflockerungszone ermittelbar.

Ergebnis: Das Vertrauen in die Charakterisierbarkeit der Diffusivität des Salzgrusdichtungselementes im Istzustand wird hoch eingeschätzt (Bewertungsstufe 4).

(d) Ist-Zustand: Ermittlung der Sorptionseigenschaften bei Schachtverschlüssen aus Bentonit

Zur Ermittlung der Sorptionseigenschaften des Bentonits stehen verschiedene Methoden zur Verfügung. Meistens werden Batchexperimente, die wenig aufwendig sind, durchgeführt. Sie weisen den Nachteil auf, das hydrochemische Milieu im Porenwasser des Bentonitverschlusses in situ richtig zu erfassen. Zudem sind die als Kd-Wert ausgegebenen Ergebnisse rein statisch, d.h. sie sind nur für die Versuchsbedingungen gültig und erfassen nicht die Art des Sorptionsmechanismus. Dies hat negative Auswirkungen auf die Prognostizierbarkeit der Sorptionskennwerte.

Mittels zusätzlicher Untersuchungen im Zuge der Bestimmung der Diffusivität lässt sich mit höherem Aufwand eine bessere Charakterisierung erreichen. Jedoch gelten die gleichen Ungewissheiten wie bei den Batchversuchen.

Mit Hilfe spektroskopischer Methoden lassen sich die Bindungsmechanismen analysieren (Time Resolved Laser Fluorescence Spectroscopy und X-Ray Adsorption Spectroscopy), wodurch sich die Stärke und Reversibilität der Bindungen (Einbau in Kristallgitter, Oberflächenkomplexierung und Ionenaustausch) bestimmen lassen.

Jedoch weisen alle Versuche nach GRS (2010-4) das Problem auf, dass Probenahme und Versuchsdurchführung im Hinblick auf die Erhaltung der in situ Bedingungen (z.B. Sauerstoffgehalt, Redoxzustand) ebenso wie die Extraktion des Porenwassers schwierig ist. Unter Annahme, dass die oben beschriebenen Versuche im Hinblick auf ihre Auswertung sinnvoll kombiniert werden, wird die Aussagekraft der Methoden zur Ermittlung der Sorptionseigenschaften aufgrund der Unsicherheiten bei der Erhaltung der geochemischen in situ Bedingungen während der Probenahme und im Labor als mittelmäßig eingestuft.

Wenn auch die Charakterisierbarkeit im Hinblick auf die „wahre“ Größe der Sorption als eher weniger gut einzustufen ist, so lassen die Versuche jedoch mit hoher Sicherheit eine Aussage hinsichtlich eines Mindestbeitrags der Sorption zur Radionuklidrückhaltung zu. Man erhält also trotz nur mäßiger Bewertung der Bestimmung der „wahren“ Sorptionswerte eine gute Aussage mit hoher Sicherheit bezüglich des Mindestbeitrags der Sorption.

Ergebnis: Das Vertrauen in die Charakterisierung der Sorptionseigenschaften des Bentonitverschlusses für den Istzustand wird als hoch (Einstufung: 4) eingeschätzt.

D.2.3 Zusammenfassende Bewertung der Charakterisierbarkeit der RSF-Parameter der Schachtverschlüsse im Ist-Zustand

Die folgende Tabelle D-2 zeigt die Ergebnisse der Charakterisierung der RSF-Parameter der Dichtungsmaterialien Salzgrus und Bentonit im Ist-Zustand für die Schachtabdichtung bei End- bzw. Tiefenlager.

Hinsichtlich der Sicherheitsfunktion „Begrenzung/ Verhinderung von Lösungsbewegung und Radionuklidtransport“ ist die gute Charakterisierbarkeit im Ist-Zustand bei der Schachtabdichtung aus Bentonit für End- bzw. Tiefenlager in Tonstein erkennbar (s. Tab. D-3).

Bei Einlagerung in Salz und der Schachtabdichtung aus Salzgrus ist die Charakterisierbarkeit im Ist-Zustand der aggregierten drei RSF-Kriterien nur mäßig (s.Tab.D-3).

Hinsichtlich der RSF „Verzögerung der Radionuklidausbreitung durch Sorption“ wird die Schachtabdichtung aus Salzbeton nicht bewertet. Bei der Schachtabdichtung aus Bentonit bei Lagerung im Tonstein ist die Charakterisierung für den Ist-Zustand mit hoch bewertet worden (s. Tab. D-3).

Komponente Schachtabdichtung	TE + TM in Salz (steil u. flach) Salzgrus	TE + TM in Tonstein Bentonit	Anmerkung
Permeabilität	3	4	Keine Differenzierung zwischen Salz (flach u. steil) möglich;
Porosität	3	4	
Diffusivität	3	4	Keine Differenzierung zwischen End- und Tiefenlager möglich
Sorption	n.b.	4	

Tab. D-2: Charakterisierung der RSF-Parameter im Ist-Zustand für Schachtabdichtungen bei End- bzw. Tiefenlager (TE: Endlager, TM: Tiefenlager mit Maßnahmen zur Rückholbarkeit der Abfälle; Bewertungen: 5 sehr gute Charakterisierbarkeit bis 1 sehr geringe / vernachlässigbare Charakterisierbarkeit; n.b. = nicht bewertet)

Komponente SCHACHTABDICHTUNG		TE + TM in Salz (steil- u. flach)	TE+ TM Tonstein
Sicherheitsfunktion	RSF-Parameter	Salzgrus	Bentonit
Begrenzung/Verhinderung v. Lösungsbewegung u. RN-Transport	Permeabilität	3	4
	Porosität		
	Diffusivität		
Verzögerung der RN- Ausbreitung d. Sorption	Sorption	n.b.	4

Tab. D-3: Aggregierte Ergebnisse für die Bewertung des Vertrauens in die Charakterisierbarkeit der Sicherheitsfunktionen für den Ist-Zustand der Schachtabdichtung (TE: Endlager, TM: Tiefenlager mit Maßnahmen zur Rückholbarkeit der Abfälle; Bewertungen: 5 sehr gute Charakterisierbarkeit bis 1 sehr geringe / vernachlässigbare Charakterisierbarkeit; n.b. = nicht bewertet)

D.3 Vertrauen in die Prognostizierbarkeit der RSF-Parameter der Sicherheitsfunktionen der Schachtverschlüsse im Nachweiszeitraum

In diesem Kapitel geht es um die Ermittlung des Vertrauens in die Prognostizierbarkeit der RSF-Parameter, die den zwei radionuklidrückhaltenden Sicherheitsfunktionen der Komponente Schachtverschluss zugrunde liegen. Dabei ist auch der Grad des Prozessverständnisses bedeutsam, denn es ist wesentliche Grundlage dafür.

Die Auswirkungen möglicher zukünftiger Veränderungen der RSF-Parameter der Komponente Schachtabdichtung sind dabei qualitativ zu berücksichtigen. Eindeutige Veränderungen eines RSF-Parameters hin zu der „sicheren Seite“ der Komponente, d.h. positiver Einfluss auf die Radionuk-

lidausbreitung bzw. die Isolationswirkung, sind positiv zu bewerten. Sie sind ein Hinweis auf eine hohe Robustheit. Bei nur geringen Veränderungen der Parameter bleibt die ursprüngliche Bewertung der RSF-Parameter bestehen.

Die Prognose der möglichen Veränderungen von Parameterwerten in der Zukunft hängt auch von der standortspezifischen Entwicklung des End- bzw. Tiefenlagersystems ab. Diese ist aber nicht sicher bekannt. Hinzu kommt, dass auf der Ebene der Entria-Referenzmodelle standortspezifische Daten nicht vorliegen. Selbst wenn sie bekannt wären, bestünden noch Unsicherheiten, wie sich ein Parameterwert bei bekannten Änderungen äußerer Randbedingungen langfristig ändert. Es kann sogar unklar sein, ob sich ein Parameterwert innerhalb der betrachteten Komponente in positiver oder negativer Richtung ändert. Hieraus ergeben sich naturgemäß Ungewissheiten hinsichtlich der Bewertung der Änderung des Parameterwertes.

In GRS (2010) wird versucht, die skizzierte Problematik durch die Verknüpfung der Unsicherheiten bei der Vorhersage der Entwicklung der End- bzw. Tiefenlagersysteme (Prognoseunsicherheit) mit der Unsicherheit bei der Prognostizierbarkeit bzw. dem Prozessverständnis zu begegnen. Diese Lösung ist bei der Anwendung der Methodik auf die generischen Entria-Referenzmodelle wegen naturgemäß fehlendem Detaillierungsgrad der Referenzmodelle und fehlendem Standortbezug nur sehr begrenzt umsetzbar.

Deshalb werden nach der Bewertung der Prognostizierbarkeit und des Prozessverständnisses der RSF-Parameter (Kap. D.3.1 u. Kap. D.3.2) im Kap. D.4 mit den inneren Systemeinflüssen Gas- und Wärmeentwicklung zwei ausgewählte und zwangsläufig auftretende Aspekte der Systemrobustheit beispielhaft und unabhängig von den Prognoseunsicherheiten behandelt. Die externen Systemeinflüsse (z.B. Eisüberfahung) werden in Anhang E in Zusammenhang mit dem ewG behandelt.

Die hier skizzierte Problematik und ihr Lösungsansatz gelten auch für alle anderen Systemkomponenten und ihre zugehörigen Sicherheitsfunktionen samt RSH-Parametern. Dabei muss zur Vermeidung eventuell verdeckter Mehrfachbewertungen bei der späteren Aggregation von Einzelergebnissen sorgfältig vorgegangen werden.

D.3.1 Vertrauen in die Prognostizierbarkeit des Schachtverschlusses aus Salzgrus bei einem Schacht im Steinsalz

(a, b) Prognostizierbarkeit von Permeabilität und Porosität bei einem Schachtverschlusselement aus vorverdichtetem Salzgrus

Das in Kapitel D.2.1 ermittelte mässige Vertrauen in die Charakterisierbarkeit der Permeabilität und Porosität beim Schachtverschluss aus Salzgrus im Ist-Zustand wird sich auch hinsichtlich der Prognostizierbarkeit nicht verändern. Das wesentliche Problem stellt dabei die Beziehung zwischen Permeabilität und Porosität für kleine Porositäten dar (s. dazu auch Anhang B, Kapitel B.3.1). Zudem besteht Forschungsbedarf bei Stoffmodellen zur Beschreibung des Kompaktionsverhaltens von Salzgrus und bei kleinen Porositäten und deren Implementierung in numerische Codes (GRS 2016).

Da die Kompaktion von Salzgrus eine wesentliche Bedeutung für die Wirksamkeit geotechnischer Barrieren – und damit auch bei Abdichtungen von entsprechenden Schachtverschlüssen – bei der End- bzw. Tiefenlagerung im Salz besitzt, reicht es nicht aus, für den Ist-Zustand zwar zuverlässige Messwerte über Permeabilität und Porosität zu erlangen. Vielmehr müssen auch begründete Aus-

sagen über die zukünftige Entwicklung dieser Parameter und damit auch ein ausreichendes Prozessverständnis gegeben sein.

Da dies derzeit nicht der Fall ist, kann die Bewertung für beide RSF-Parameter nur mäßig lauten.

Ergebnis: Das Vertrauen in die Prognostizierbarkeit und das Prozessverständnis der Parameter integrale Permeabilität und integrale Porosität der Salzgrusdichtung wird wegen derzeit noch offener Fragen als mäßig eingeschätzt (Bewertungsstufe jeweils 3).

(c) Prognostizierbarkeit der Diffusivität bei Schachtverschlüssen aus vorverdichteten Salzgrus

Da die Diffusivität im lösungserfüllten Versatz von der Permeabilität und der Porosität des Versatzes abhängt, deren zukünftige Entwicklung derzeit aber nicht mit genügender Sicherheit bestimmt werden kann (s.o. 1,2), ist die Prognostizierbarkeit und Charakterisierbarkeit der Diffusivität ebenfalls nur mit mäßig zu bewerten. Insbesondere für kleine Porositäten ist noch nicht ausreichend geklärt, mit welchen Diffusionskoeffizienten die hydraulischen Eigenschaften von Salzgrus beschrieben werden können (ESK 2016).

Ergebnis: Das Vertrauen in die Prognostizierbarkeit und das Prozessverständnis der Diffusivität der Salzgrusdichtung wird als mäßig eingeschätzt werden (Bewertungsstufe 3).

(d) Prognostizierbarkeit der Sorptionseigenschaften bei Schachtverschlüssen aus vorverdichteten Salzgrus

Spielt bei Salzgrus keine Rolle. ***Ergebnis: Keine Bewertung***

D.3.2 Vertrauen in die Prognostizierbarkeit des Schachtverschlusses aus Bentonit bei einem Schacht im Tonstein

(a, b) Prognostizierbarkeit von Permeabilität und Porosität bei einem Schachtverschlusselement aus Bentonit bei Lagerung in Tonstein

Die Permeabilität wird durch die mikroskopische Verteilung und die dreidimensionale Vernetzung des Porenraumes bestimmt. Sie resultiert aus dem Zusammenwirken vieler Einflussfaktoren, von denen die Porosität die bedeutendste ist (Müller-Lyda 1999). Da Permeabilität und Porosität also in einem engen funktionalen Zusammenhang stehen, werden sie hier gemeinsam behandelt.

Die Permeabilität von Bentonit ist abhängig vom Quelldruck. Die im Zeitverlauf zunehmende Aufsättigung des aus Bentonit bestehenden Verschlusses führt zu einem Quelldruck. Er beginnt bereits, wenn der Bentonit noch nicht voll gesättigt ist und daher noch kein Porendruck wirkt. Das Quellvermögen des Bentonits ist zu frühen Zeitpunkten, wenn noch kein konvergenzbedingter Gebirgsdruck wirkt, von entscheidender Bedeutung für die Entwicklung der Permeabilität (GRS/DBEtec 2012). Nach Aufsättigung des Bentonitverschlusses wird eine Permeabilität von $< 10^{-20} \text{ m}^2$ vorherrschen (GRS 2010-4).

Im Bentonitelement wird sich über die Dauer des Aufsättigungsprozesses eine Vergleichmäßigung einstellen, die im Wesentlichen auf der Wirkung des Kapillardruckes im ungesättigten Bereich des

Dichtelementes sowie der zunehmenden Länge des gesättigten Abschnittes mit sehr geringen absoluten Lösungspermeabilitäten zurückgeführt wird. Inwiefern der Porendruck im Zeitraum der ungesättigten Bedingungen sowie der verbleibende Quelldruck bei Porenraumsättigung mit Lösung Einfluss auf den wirksamen Druckgradienten über das Dichtelement nimmt, ist nach BA Freiberg/DBEtec (2013) noch nicht geklärt. In jedem Fall ist aber davon auszugehen, dass mit der Aufsättigung des Bentonits auch eine Aufsättigung des umgebenden Wirtsgesteins einsetzt.

Einfluss auf die integrale Permeabilität (und Porosität) hat neben dem Dichtelement auch die Auflockerungszone in der Kontur der Schachtröhre. Diese zeigt wegen ihrer Schädigung eine erhöhte Permeabilität (und Porosität) auf. Um beurteilen zu können, inwieweit sich die schädigungsbedingt erhöhte Permeabilität der Auflockerungszone im Laufe der Zeit verringert, wurden Laborversuche mit dem Ziel durchgeführt, die Verringerung der Permeabilität mit zunehmendem Gebirgsdruck zu bestimmen. Es zeigte sich, dass für Steinsalz eine Reduzierung um 2-3 Größenordnungen im Druckbereich bis 10 MPa möglich ist. Bei den untersuchten Tonsteinproben ist diese Reduzierung der Permeabilität noch etwas größer und wird auch bereits bei einem Druck von 6 MPa erreicht (BA Freiberg/DBEtec 2013).

Durch den Nachschnitt des besonders durchlässigen konturnahen Bereiches der Auflockerungszone sollen die Permeabilität und Porosität im Kontaktbereich zu dem Betondichtelement verringert werden. Allerdings bildet sich an der nachgeschnittenen Kontur ein neuer aufgelockerter Bereich mit einer zeitlich zunehmenden Permeabilität heraus. Die Geschwindigkeit des Permeabilitätswiederanstiegs hängt von vielen Faktoren ab und kann bisher noch nicht zufriedenstellend modelltechnisch berücksichtigt werden. Hier kann allerdings der sich ausbildende Quelldruck des Bentonits signifikant zur Permeabilitätsreduktion der Auflockerungszone beitragen. Dies macht auch deutlich, wie wichtig es ist, die Auflockerungszone im Bereich des Bentonitdichtelementes soweit wie möglich zu entfernen, insbesondere bei solchen Dichtelementen, die in einem geringen Teufen- und damit Druckniveau angeordnet sind (BA Freiberg/DBEtec 2013).

Insgesamt ist die Prognostizierbarkeit wesentlicher die Permeabilität und Porosität betreffender Prozesse trotz einiger offener Fragen als insgesamt gut zu bewerten.

Ergebnis: Das Vertrauen in die Prognostizierbarkeit und das Prozessverständnis der Parameter integrale Permeabilität und integrale Porosität der Bentonitdichtung wird als insgesamt gut eingeschätzt (Bewertungsstufe jeweils 4).

(c) Prognostizierbarkeit der Diffusivität bei einem Schachtverschlusselement aus Bentonit bei Lagerung in Tonstein

Das Bentonitsegment des Schachtverschlusses nimmt nach seiner Aufsättigung Diffusivitäten an, die denen des Wirtsgesteins ähnlich sind. Das für diese Aussage erforderliche Prozessverständnis wird als ausreichend hoch angesehen (GRS 2010-4). Da die Einbautechnik einen relativ homogenen Einbau der Bentonitverschlüsse erwarten lässt, ist die Möglichkeit eines Upscalings auf das gesamte Bauwerk als relativ zuverlässig anzusehen. Insgesamt sind die Prognostizierbarkeit und das Prozessverständnis zur Diffusivität als gut zu bewerten.

Ergebnis: Das Vertrauen in die Prognostizierbarkeit und das Prozessverständnis der Diffusivität ist hoch (Bewertungsstufe 4).

(d) Prognostizierbarkeit der Sorption bei einem Schachtverschlusselement aus Bentonit bei Lagerung in Tonstein

In Kap. D.2.2 Abschnitt (d) wird das Vertrauen in die Charakterisierung der Sorptionseigenschaften der Abdichtungen der Einlagerungsstrecken für den Ist-Zustand insgesamt als hoch (Bewertungsstufe 4) eingeschätzt.

Gleiches gilt für die Prognostizierbarkeit der Sorption im Zeitverlauf. Wenn auch die Charakterisierbarkeit im Hinblick auf die „wahre“ Größe der Sorption als eher weniger gut einzustufen ist, so lassen die Versuche jedoch nach GRS (2010-4) mit hoher Sicherheit eine Prognose hinsichtlich eines Mindestmaßes der künftigen Sorption zu. Das dazu erforderliche Prozessverständnis ist vorhanden.

Ergebnis: Das Vertrauen in die Prognostizierbarkeit und das Prozessverständnis des RSF-Parameter Sorption bei Tonstein ist hoch (Ergebnis: Bewertungsstufe vier).

D.3.3 Zusammenfassende Bewertung des Vertrauens in die Prognostizierbarkeit der RSF-Parameter der Schachtverschlüsse

Die Auswertung (Tab. D-4) zeigt, dass das Vertrauen in die Prognostizierbarkeit der RSF-Parameter des Dichtmaterials Salzgrus über die beiden Wirkzeiträume nur mäßig ist (Bewertungsstufe 3). Die Sorption ist bei Salzbeton ohne Bedeutung.

Das Vertrauen in Bentonit als Dichtmaterial in Tonstein ist hoch (Bewertungsstufe 4) und gilt gleichfalls für beide Wirkzeiträume. Angemerkt sei allerdings, dass der Bentonit einen gewissen Zeitraum (einige hundert Jahre) benötigt, um sein Quellvermögen zu entwickeln und die angestrebten Dichteigenschaften voll zu entfalten. Bezüglich der Sorption ist die Bewertung des Bentonits für alle Wirkzeiträume hoch.

KOMPONENTE Schachtverschluss	TE + TM Salz (steil- u. flachlagernd)		TE + TM Tonstein	
	Dichtmaterial Salzgrus		Dichtmaterial Bentonit	
<i>Wirkzeiträume</i>	<i>t bis 10.000 a</i>	<i>t > 10.000 a</i>	<i>t bis 10.000 a</i>	<i>t > 10.000 a</i>
Permeabilität	3	3	4	4
Porosität	3	3	4	4
Diffusivität	3	3	4	4
Sorption	n.b.	n.b.	4	4

Tab. D-4: Zusammenfassung der Ergebnisse für das Vertrauen in die Prognostizierbarkeit der RSF-Parameter für den Schachtverschluss (TE: Endlager, TM: Tiefenlager mit Maßnahmen zur Rückholbarkeit der Abfälle; Bewertungen: 5 sehr hohes Vertrauen bis 1 sehr geringes / vernachlässigbares Vertrauen; n.b. = nicht bewertet)

Zusammengefasst bedeutet dies (s. Tab. D-5), dass die Sicherheitsfunktion „Begrenzung/Verhinderung v. Lösungsbewegung u. Radionuklidtransport“ für Bentonit ein insgesamt höheres Vertrauen aufweist als für Salzbeton. Zudem kommt bei Bentonit noch zusätzlich die Sicherheitsfunktion „Verzögerung der Radionuklidausbreitung durch Sorption“ mit einer hohen Bewertung zum Tragen.

KOMPONENTE ABDICHTUNG		TE + TM Salz (steil- u. flachlagernd)	TE + TM Ton- stein
Rückhaltende Sicherheitsfunktionen	zugehörige RSF-Parameter	Dichtmaterial Salzbeton	Dichtmaterial Bentonit
Begrenzung/Verhinderung v. Lösungsbewegung u. RN- Transport	Permeabilität	3	4
	Porosität		
	Diffusivität		
Verzögerung der RN- Ausbreitung d. Sorption	Sorption	n.b.	4

Tab. D-5: Aggregierte Bewertungsergebnisse über das Vertrauen in die Prognostizierbarkeit der Sicherheitsfunktionen für das Dichtmaterial der Schachtverschlüsse (TE: Endlager, TM: Tiefenlager mit Maßnahmen zur Rückholbarkeit der Abfälle; Bewertungen: 5 sehr hohes Vertrauen bis 1 sehr geringes / vernachlässigbares Vertrauen; n.b. = nicht bewertet)

D.4 Änderung der Komponente Schachtverschluss gegenüber inneren Einflüssen des End- bzw. Tiefenlagers (Systemrobustheit)

Neben der Prognostizierbarkeit der wesentlichen sicherheitsrelevanten Merkmale ist auch die Bewertung des Verhaltens der Schachtabdichtungen gegenüber inneren Einwirkungen für die Bestimmung der Systemrobustheit wichtig. Solche Einwirkungen sind beispielweise Wärme- und Gasentwicklung oder auch als äußere Einwirkungen die Folgen klimatischer Änderungen. Letztere werden zusammenfassend bei der Behandlung der Sicherheitsfunktionen des ewG für alle betroffenen Sicherheitsfunktionen in Anhang E behandelt.

In den folgenden Unterkapiteln werden mögliche Auswirkungen interner Einflüsse des End- bzw. Tiefenlagersystems auf die RSF-Parameter der radionuklidrückhaltenden Sicherheitsfunktionen der Komponente Abdichtungen/Dambbauten ermittelt. Diese Auswirkungen hängen stark von standort- und konzeptspezifischen Bedingungen ab. Da beim generischen Ansatz von Entria solche spezifischen Bedingungen nicht vorliegen oder aber hilfsweise angenommen werden müssen, gelten die resultierenden qualitativen Aussagen zwangsläufig nur beispielhaft.

Zu diesen internen Einflüssen zählen vor allem die Gas- und Wärmeentwicklung bei Tiefenlagerung, die Veränderungen der RSF-Parameter der Sicherheitsfunktionen der Systemkomponente Abdichtungen mit sich bringen können. Das Ausmaß dieser Veränderungen ist ein Indikator für die jeweilige Systemrobustheit. **Systemrobustheit bedeutet somit die Unempfindlichkeit des Tiefenlagersystems gegenüber veränderten Randbedingungen, die sich aus der inneren und äußeren Standortentwicklung ergeben können** (z.B. Reaktionen auf Gasbildung oder auf Eisüberföhrung).

Zudem beziehen sich die Aussagen für die Gasentwicklung auf den Zeitraum von 10^5 Jahren, für die Wärmeentwicklung nur auf den Zeitraum von 10^4 Jahren, weil nach einigen tausend Jahren das ursprüngliche Temperaturniveau im End- bzw. Tiefenlagerbereich wieder erreicht wird und die wesentliche Gasentwicklung und -ausbreitung im Verlaufe von 10^5 Jahren erlischt. Lux et al. (2017) zeigen an beispielhaften Simulationen der Wärmeausbreitung und der Gasentstehung sowie der Gasausbreitung für Entria-Referenzmodelle, dass die Temperaturerhöhung durch wärmeentwickelnde Abfälle nach 10^4 Jahre wieder abgeklungen ist und Gasentstehung durch Korrosion von Metallen und daraus resultierende Gasausbreitung im Verlauf einiger 10^5 Jahre ablaufen kann.

Die obigen Aussagen zur Systemrobustheit und der mit Wärme und Gasbildung verbundenen Wirkzeiträume gelten in gleicher Weise auch für die anderen Komponenten des End- oder Tiefenlagers (s. Anhänge A, B, C und E).

D.4.1 Auswirkungen von Gas und Wärme auf die Komponente Schachtverschluss aus Salzgrus bei Lagerung in Steinsalz

(a, b) Auswirkungen von Gas und Wärme auf die Permeabilität und Porosität bei Dichtelementen aus Salzgrus bei Lagerung im Salz

Nach Einbau des Salzgrusdichtelementes besitzt sowohl das Dichtelement als auch die Auflockerungszone des die Schachtröhre umgebenden Salzgesteins nicht die erforderliche geringen Permeabilitäten und Porositäten. Diese werden erst im Zeitverlauf erwartet, wenn der Salzgrus sich durch das Auflaufen des Salzgebirges kompaktiert und zugleich die Auflockerungszone verheilt.

Es bestehen derzeit Unsicherheiten, welche Grenzporosität und Permeabilität der Versatz erreichen kann und welcher Zeitbedarf hierfür anzusetzen ist. Das Prozessverständnis hinsichtlich der erreichbaren Endpermeabilität im Salzgrusversatz ist derzeit mäßig. Nach GRS, BGR, DBEtec (2013) ist immer noch ungewiss, mit welchen Kompaktionsraten und Porositäten im Salzversatz langfristig zu rechnen ist. Deshalb ist der Grad der Erfüllung der Anforderungen an die Salzgrusabdichtung und ihre zeitliche Funktion derzeit noch unklar.

Eine Temperaturerhöhung mit anschließendem Temperaturrückgang auf das Niveau vor Einlagerung innerhalb eines Zeitraumes von ca. 10.000 Jahren ist aufgrund der in den eingelagerten Stoffen entstehenden radioaktiven Zerfallswärme begründet. Mit der Abnahme der Zerfallsaktivität reduziert sich auch die Wärmeproduktion, was zu einer Temperaturabnahme führt. Der mögliche Einfluss der Temperatur auf die Sicherheitsfunktionen des Schachtverschlusses ist von der standortabhängigen Anlage der Einlagerungsfelder und ihrer Entfernung von den Schächten abhängig. Berechnungen im Rahmen der VSG (GRS 2013) zeigen, dass die aus den Einlagerungsfeldern stammende Wärme sich positiv auf die Dichtelemente der Schächte auswirken kann, indem sie beispielweise die Konvergenzrate erhöht und dadurch über eine Verringerung von Permeabilität und Porosität zu einer früheren Verheilung der Auflockerungszone sowie zu einer kraftbündigen Verbindung mit dem Dichtelement aus Salzgrus beiträgt. Nach gegenwärtigem Kenntnisstand besitzen sowohl die Temperaturerhöhung als auch der folgende Temperaturrückgang keinen erheblichen Einfluss auf Permeabilität und Porosität des Schachtdichtelements aus Salzgrus.

Mit der Entwicklung eines Gasdruckes im Grubengebäude bzw. an der Unterkante des Dichtsystems ergibt sich eine Änderung des Druckregimes im Dichtsystem. Beim Überschreiten des Porenwasserdruckes kommt es lokal zum Einsetzen einer Gasströmung. Bestimmend für das Einsetzen eines Gasströmungsprozesses durch das Wirtsgestein sind die Porengrößenverteilung und der daraus resultierende Gaseindringdruck. Sollte der Gasdruck den Gaseindringdruck des gesättigten

und kompaktierten Salzgruskörpers und/oder des Wirtsgesteins Salz überschreiten, kommt es in Abhängigkeit von der Kapillardruck-Sättigungsfunktion des Wirtsgesteins und der daraus resultierenden effektiven Gaspermeabilität zu einer Gasströmung über das Wirtsgestein Salz (einschließlich der Auflockerungszone) bzw. über den Salzgruskörper. Dieser Vorgang und seine Auswirkungen auf das Wirtsgestein und die Salzgrusdichtung sind reversibel. Im Steinsalz besteht nach derzeitigen Einschätzungen erst die Gefahr der Bildung neuer Wegsamkeiten, wenn der Gasdruck den lithostatischen Druck überschreitet (BA Freiberg/DBEtec 2013).

Die Auswirkungen der Gasentwicklung auf den Schachtverschluss führen - abgesehen von standortspezifischen Einflüssen - nur zu geringen Veränderung der Gaspermeabilität und -porosität des Salzgrusdichtelementes und seines umgebenden Wirtsgesteins. Dies gilt auch für Lösungen, da der Einfluss des Gasdrucks auf die Permeabilitätsreduktion des Verschlusses als gering einzustufen ist. Das für diese Aussage erforderliche Prozessverständnis wird als ausreichend hoch angesehen.

Ergebnis: Insgesamt bleibt festzustellen, dass sowohl die Wärmeentwicklung als auch die Gasentwicklung nur geringe Auswirkungen auf die Permeabilitäten und Porositäten der Salzgrusdichtung und des umgebenden Salzgesteins haben (Bewertungsstufe jeweils 4).

(c) Auswirkungen von Wärme und Gasentwicklung auf die Diffusivität bei Dichtelementen aus Salzgrus bei Lagerung im Salz

Durch die Auswirkungen von Wärme und Gasdruck auf das Salzgrusdichtelement einschließlich des umgebenden Salzgesteins sind - wie bei der Bewertung der Permeabilität und Porosität - keine nennenswerte Beanspruchung zu besorgen ist. Dies führt zu der Bewertung, dass die Auswirkungen der Systementwicklungen auf die Diffusivität des Schachtverschlusses gering sind.

Ergebnis: Insgesamt bleibt festzustellen, dass sowohl die Wärmeentwicklung als auch die Gasentwicklung nur geringe Auswirkungen auf die Diffusivität der Salzgrusdichtung und des umgebenden Salzgesteins haben (Bewertungsstufe 4).

(d) Auswirkungen von Wärme und Gasentwicklung auf die der Sorptionseigenschaften bei Dichtelementen Salzgrus bei Lagerung im Salz

Spielt bei Salzgrus keine Rolle und wird deshalb nicht bewertet.

D.4.2 Auswirkungen von Gas und Wärme auf die Komponente Schachtverschluss aus Bentonit bei Lagerung in Tonstein

(a, b) Auswirkungen von Gas und Wärme auf die Permeabilität und Porosität bei Dichtelementen aus Bentonit bei Lagerung in Tonstein

Der Einfluss der durch die ins End- bzw. Tiefenlager eingebrachten stark wärmeentwickelnden Abfälle eingebrachten Wärme auf Bentonit ist intensiv untersucht worden für Temperaturbereiche über ca. 80 Grad C (GRS 2016). Dieser Temperaturbereich wird im Bereich der Schächte nicht erreicht, weshalb die bei höheren Temperaturen möglichen Tonmineralumwandlungen hier keine Bedeutung hinsichtlich Permeabilität und Porosität haben. Die Auswirkungen sind vernachlässigbar.

Die Druckentwicklung aufgrund der Gasbildung beeinflusst die Permeabilitäts- und Porositätsentwicklung des Bentonitverschlusses für Gase und Lösungen nur unwesentlich. In Tonstein und Bentonit muss bereits beim Überschreiten des hydrostatischen Druckes, obwohl der in diesem Fall wirksame Druck noch unter dem Gebirgsdruck liegt, mit der Aufweitung von Porenraum gerechnet werden. Dies führt zur Bildung neuer Wegsamkeiten für Gase. Die sich bei der Aufweitung der Poren bildenden Wegsamkeiten sind mikroskopisch klein und werden nicht als Beeinträchtigung für die Integrität der Barriere angesehen (BA Freiberg/DBEtec 2013). Der Gastransport wirkt sich so nicht begünstigend auf die Ausbreitung von kontaminierten Gasen und Lösungen im Wirtsgestein aus. Zudem sind die Vorgänge reversibel, wenn kein Gas mehr nachgeliefert wird.

Nach GRS (2010-4) können Auswirkungen der Gasbildung auf die Lösungs- und die gasverfügbare Permeabilität und Porosität des Bentonits zwar nicht ausgeschlossen werden, sie werden jedoch im Hinblick auf die rückhaltenden Eigenschaften des Verschlusses als gering eingestuft. Grund hierfür sind einerseits die Einspannung und die Auflast auf das Wirtsgestein und andererseits eine Gasentwicklung, die nicht die für eine deutliche Permeabilitätserhöhung erforderliche Druckhöhe aufbringt. Das für diese Aussage erforderliche Prozessverständnis wird als ausreichend hoch angesehen.

Die Auflockerungszone im Wirtsgestein wird im Zeitverlauf durch Konvergenz des Wirtsgesteins und Quellung der Bentonitabdichtung eine Permeabilität in der Größenordnung von $<10^{-19} \text{ m}^2$ erreichen. Auch in der Auflockerungszone bleiben die Auswirkungen des Gasdruckaufbaus auf Permeabilität und Porosität gering. Das für diese Aussage erforderliche Prozessverständnis wird nach (GRS 2010-4) als ausreichend hoch angesehen.

Ergebnis: Insgesamt sind die Auswirkungen von Wärme- und Gasentwicklung auf Permeabilität und Porosität des Dichtelementes aus Bentonit als gering einzustufen (Bewertungsstufe 2).

(c) Auswirkungen von Gas und Wärme auf die Diffusivität bei Dichtelementen aus Bentonit bei Lagerung in Tonstein

Das Bentonitsegment des Schachtverschlusses nimmt nach GRS (2010-4) nach der Aufsättigung Permeabilitäten und Porositäten sowie insbesondere Diffusivitäten an, die denen des Wirtsgesteins ähnlich sind. Das aus der Gasentwicklung resultierende Druckniveau hat keinen wesentlichen Einfluss auf diese Verhältnisse. Das für diese Aussage erforderliche Prozessverständnis wird als ausreichend hoch angesehen. Auch die mäßig erhöhten Temperaturen führen zu keinen qualitativen Änderungen des Bentonitdichtelements. Die Auswirkungen der Systementwicklungen werden deshalb als sehr gering eingestuft.

Ergebnis: Insgesamt sind die Auswirkungen von Wärme- und Gasentwicklung auf die Diffusivität des Dichtelementes aus Bentonit als sehr gering einzustufen (Bewertungsstufe 5).

(d) Auswirkungen von Gas und Wärme auf die Sorption bei Schachtdichteelementen aus Bentonit bei Lagerung in Tonstein

Jobmann et al. (2016) haben ermittelt, dass für Europium, Nickel und eine Gruppe der dreiwertigen Transurane mit einer erhöhten Sorption an Bentonit gerechnet werden kann, wenn sich die Temperatur des umgebenden Tonsteins (und damit auch des Bentonits) erhöht. Allein für Cäsium ist eine Verringerung der Sorptionsfähigkeit zu erwarten. In Summe betrachtet werden die Sorptionsfähigkeit und damit das Rückhaltevermögen mit steigender Temperatur vergrößert. Dies gilt auch für Tonminerale in geotechnischen Barrieren. Insgesamt ist die Datenlage zum Temperatureinfluss auf die Sorptionseigenschaften der Tonminerale aber auf wenige Radionuklide bzw. Radionuklidanaloga sowie Minerale begrenzt und somit weitgehend unvollständig.

Da der Aufbau eines Gasdruckes nur geringen Einfluss auf die Lösungsporosität hat, ist ein Einfluss auf die Größe der reaktiven Mineraloberflächen auszuschließen. Ein Einfluss auf die weiteren Parameter, die die Sorption bestimmen, kann mit großer Sicherheit ausgeschlossen werden. Der Gasdruckaufbau hat folglich keinen Einfluss auf die Sorptionseigenschaften des Bentonitverschlusses. Das für diese Aussage erforderliche Prozessverständnis wird von GRS (2010-4) als ausreichend hoch angesehen. Die Auswirkungen von Wärme- und Gasentwicklung auf die Sorption werden deshalb als sehr gering eingestuft.

Ergebnis: Die Auswirkungen der inneren Einflussgrößen Wärme- und Gasentwicklung auf die Sorption des Schachtdichteelementes aus Bentonit sind als sehr gering zu bewerten (Bewertungsstufe 5).

D.4.3 Zusammenfassende Bewertung der Auswirkungen von Gas und Wärme auf die Schachtverschlüsse

Die Tabelle D-6 zeigt, dass der Einfluss von Wärme und Gas auf die RSF-Parameter des Dichtelementes Salzgrus insgesamt gering ist. Sorption wird bei Salzbeton nicht bewertet. Bei dem Dichtelement Bentonit ist der Einfluss von Wärme und Gas für zwei RSF-Parameter als gering zu bewerten und für die Parameter Diffusivität und Sorption als sehr gering zu bewerten.

Zu beachten ist, dass wegen der gleichen Bewertungsergebnisse für Gas und Wärme jeweils für Salzbeton bzw. Bentonit keine Differenzierung für beide Einflussgrößen in den Tabellen D-6 und D-7 vorgenommen wurde.

KOMPONENTE Schachtverschluss	TE + TM in Salz (steil u. flach)	TE + TM Tonstein	Anmerkung
RSF-Parameter	Salzbeton (Gas u. Wärme)	Bentonit (Gas u. Wärme)	
Permeabilität	4	4	Keine Differenzierung zwischen Salz (flach u. steil) möglich;
Porosität	4	4	
Diffusivität	4	5	Keine Differenzierung zwischen End- und Tiefenlager möglich
Sorption	n.b.	5	

Tab. D-6: Zusammenfassung der Ergebnisse der Auswirkungen der Einflussgrößen Wärme- und Gasentwicklung auf die RSF-Parameter der Dichtelemente Salzbeton und Bentonit bei End- bzw. Tiefenlager in Salz und Tonstein (TE: Endlager, TM: Tiefenlager mit Maßnahmen zur Rückholbarkeit der Abfälle; Bewertungen: 5 sehr geringer Einfluss bis 1 sehr starker Einfluss; n.b. = nicht bewertet)

In Tabelle D-7 werden die RSF-Parameter auf die Sicherheitsfunktionen hin aggregiert dargestellt. Danach ist der Einfluss von Wärme und Gas auf die Sicherheitsfunktion „Begrenzung/Verhinderung von Lösungsbewegung u. Radionuklidtransport“ sowohl für das Dichtelement Salzgrus als auch für das Dichtelement Bentonit gering zu bewerten. Für Sicherheitsfunktion „Verzögerung der Radionuklid-Ausbreitung durch Sorption“ ist der Einfluss von Wärme und Gas ebenfalls nur gering für das Dichtelement Bentonit. Bei Salzbeton ist es ohne Bedeutung und wird nicht bewertet.

KOMPONENTE Schachtverschluss		TE + TM Salz (steil- u. flachla- gernd)	TE + TM Tonstein
Rückhaltende Sicherheits- funktionen	zugehörige RSF-Parameter	Dichtmaterial Salzbeton (Gas u. Wärme)	Dichtmaterial Ben- tonit (Gas u. Wärme)
Begrenzung/Verhinderung v. Lösungsbewegung u. RN- Transport	Permeabilität	3	4
	Porosität		
	Diffusivität		
Verzögerung der RN- Ausbreitung d. Sorption	Sorption	n.b.	4

Tab. D-7: Aggregation der Bewertungsergebnisse über die Auswirkungen der Einflussgrößen Wärme- und Gasentwicklung auf die Sicherheitsfunktionen der Dichtelemente Salzbeton und Bentonit bei End- bzw. Tiefenlager (TE: Endlager, TM: Tiefenlager mit Maßnahmen zur Rückholbarkeit der Abfälle; Bewertungen: 5 sehr geringer Einfluss bis 1 sehr starker Einfluss; n.b. = nicht bewertet)

D.5 Vertrauen in die Erfüllung sicherheitskonzeptioneller Auslegungsanforderungen an die Schachtverschlüsse

In den folgenden Unterkapiteln wird die Erfüllung der Auslegungsanforderungen für die verschiedenen RSF-Parameter für Schachtverschlüsse überprüft und bewertet (getrennt nach Lagerung in Salz und in Tonstein). Dabei werden auch Ergebnisse aus anderen Bewertungsfeldern der Kapitel D.2 bis D.4 mit einbezogen.

Die Bewertungen beziehen sich auf den Zeitraum, in dem Schachtverschlüsse auf Grund des Sicherheitskonzeptes (s. Hauptteil, Kap. 3) voll wirksam sein müssen. Für Schachtverschlüsse ist das der Zeitraum bis 10.000 Jahre, weil ihre Hauptfunktion in einer schnell wirksamen Abdichtung der Einlagerungsbereiche besteht. Für längere Zeiträume kann Schachtverschlüssen eine sicherheitsmäßige Bedeutung zukommen, sie ist aber sicherheitskonzeptuell nicht mehr erforderlich. Dennoch wird sie hier mitbewertet.

D.5.1 Vertrauen in die Erfüllung der Auslegungsanforderungen bei einem Dichtelement aus Salzgrus bei Lagerung in Steinsalz

(a) Vertrauen in die Erfüllung der Auslegungsanforderungen zur Permeabilität bei Schachtverschluss aus Salzgrus und Lagerung in Salz

Die Unterschreitung einer integralen (Gesamt)Permeabilität von 10^{-19} m^2 stellt eine zentrale Anforderung an Schachtabdichtungen dar. Nur dann gelten die Schachtabdichtungen als diffusionsdominierte Systeme, deren advective Komponente beim Lösungstransport vernachlässigbar gering ist, so dass der Einschluss der Radionuklide langfristig gewährleistet werden kann. Diese Anforderung betrifft auch das Schachtverschlusselement aus angefeuchtetem und vorverdichtetem Salzgrus sowie die entsprechende Auflockerungszone nach erfolgter Kompaktion.

Im ersten Arbeitsschritt (Kap. D.3.1) wurde das Vertrauen in die Charakterisierbarkeit der Permeabilität ermittelt und mit mäßig hoch (Bewertungsstufe 3) bewertet. Die gleiche Bewertung wurde in Kap. D.4.1 für die Prognostizierbarkeit des RSF-Parameters vergeben (ebenfalls Bewertungsstufe 3). Der wesentliche Grund dafür ist die bis heute noch herrschende Ungewissheit darüber, welche Permeabilität im Endzustand für den Schachtverschluss einschließlich der Auflockerungszone tatsächlich erreicht wird. Ob die geforderte Permeabilität von 10^{-19} m^2 erfüllt wird, ist derzeit noch offen.

Die Auswirkungen der End- bzw. Tiefenlagerinternen Wirkungen Wärmeproduktion und Gasproduktion auf die Permeabilität stellen sich als gering dar (Bewertungsstufe 4). Es konnten keine Einwirkungen ermittelt werden, die zu starken Auswirkungen auf die Permeabilität führen könnten.

Ergebnis: Unter Berücksichtigung aller Einzelbewertungen wird das Vertrauen in die Erfüllung der Auslegungsanforderungen an die Verschlusspermeabilität für den Zeitraum $< 10.000 \text{ a}$ als mäßig (Bewertungsstufe 3) bewertet. Entscheidend dafür ist die Unklarheit über den Endzustand der Permeabilität am Ende des Kompaktionsvorgangs des Salzgruses. Für den Zeitraum $\geq 10.000 \text{ a}$ wird diese Bewertung unterstellt.

(b) Vertrauen in die Erfüllung der Auslegungsanforderungen zur Porosität bei Schachtverschluss aus Salzgrus bei Lagerung und Salz

Es existieren derzeit keine Auslegungsanforderungen an die Porosität. Porosität und Permeabilität sind jedoch physikalisch gekoppelte Größen und können demnach im Zusammenwirken betrachtet werden. Im Hinblick auf die zentrale Anforderung nach einem diffusionsdominierten Radionuklidtransport gelten für die Porosität hinsichtlich der Erfüllung der Auslegungsanforderung somit sinnentsprechend die gleichen Einschätzungen wie für die Permeabilität.

Im ersten Arbeitsschritt (Kap. D.2.1) wurde das Vertrauen in die Charakterisierbarkeit der Porosität ermittelt und mit mäßig hoch (Bewertungsstufe 3) bewertet. Die gleiche Bewertung wurde in Kap. D.3.1 für die Prognostizierbarkeit des RSF-Parameters vergeben (ebenfalls Bewertungsstufe 3).

Die Auswirkungen der Wärme- und Gasproduktion auf die Porosität sind als gering zu bewerten (Kap. D.4.1). Es konnten keine Einwirkungen mit massiven Auswirkungen auf die Permeabilität ermittelt werden.

Unter Berücksichtigung aller Einzelbewertungen wird das Vertrauen in die Erfüllung der Auslegungsanforderungen an die Verschlussporosität für den Zeitraum < 10.000 a lediglich als mäßig (Bewertungsstufe 3) bewertet. Entscheidend dafür ist die Unklarheit über den Endzustand der Porosität am Ende des Kompaktionsvorgangs des Salzgruses. Für den Zeitraum ≥ 10.000 a wird diese Bewertung unterstellt.

(c) Vertrauen in die Erfüllung der Auslegungsanforderungen zur Diffusivität bei Schachtverschluss aus Salzgrus und Lagerung in Salz

Die generelle Anforderung an das Verschlussmaterial bezüglich der Diffusivität ist ein möglichst geringer Porendiffusionskoeffizient. Nach GRS (2010-4) wird deshalb an das Verschlussmaterial eine Auslegungsgröße der Diffusionskonstante von $D_p < 5 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ gefordert. Sie entspricht etwa derjenigen des Wirtsgesteins und entspricht der Forderung nach einem diffusionsdominierten Radionuklidtransport.

Im ersten Arbeitsschritt wurde in Kap. D.2.1 das Vertrauen in die Charakterisierbarkeit der Diffusivität im Ist-Zustand ermittelt und mit hoch (Bewertungsstufe 4) bewertet. Das Vertrauen in die Prognostizierbarkeit des Parameters wurde mit mäßig bewertet (Bewertungsstufe 3, vgl. Kap. D.3.1). Zudem sind die Auswirkungen der Wärme- und Gasproduktion auf die Diffusivität als gering zu bewerten (s. Kap. D.4.1), und es konnten keine Einwirkungen mit massiven Auswirkungen auf den Parameter ermittelt werden.

Ergebnis: Unter Berücksichtigung aller Einzelbewertungen wird das Vertrauen in die Erfüllung der Auslegungsanforderungen an die Diffusivität für den Zeitraum < 10.000 a als mäßig (Bewertungsstufe 4) bewertet. Für den Zeitraum ≥ 10.000 a wird diese Bewertung unterstellt.

(d) Vertrauen in die Erfüllung der Auslegungsanforderungen zur Sorption bei Schachtverschluss aus Salzgrus und Lagerung in Salz

Spielt bei Salzgrus keine Rolle. ***Ergebnis: nicht bewertet.***

D.5.2 Vertrauen in die Erfüllung der Auslegungsanforderungen bei einem Dichtelement aus Bentonit bei Lagerung in Tonstein

(a) Vertrauen in die Erfüllung der Auslegungsanforderungen zur Permeabilität bei Schachtverschluss aus Bentonit und Lagerung in Tonstein

Die Auslegungsanforderung an die integrale Permeabilität des Schachtverschlusses aus Bentonit in Verbund mit dem umgebenden Tonstein erfordert die Unterschreitung des Parameterwertes 10^{-19} m^2 . Bei Erfüllung dieser Anforderung kann man davon ausgehen, dass ein diffusionsdominiertes System für gelöste Radionuklide dominiert und die advektive Komponente vernachlässigbar ist. In diesem Falle kann der Schachtverschluss den Einschluss der Radionuklide gewährleisten.

Nach heutigem Kenntnisstand wird der Bentonitverschluss nach seiner Aufsättigung und Quellung eine Permeabilität von $<10^{-20} \text{ m}^2$ aufweisen. Die Auflockerungszone erreicht Permeabilitätsbereiche von $<10^{-19} \text{ m}^2$, so dass die Auslegungsanforderung für den Zeitraum bis ca. 10.000 a erfüllt sein wird.

Die Bewertung in das Vertrauen der Charakterisierung der Permeabilität des Verschlusses für den Ist-Zustand (Kap. D.2.2) wurde insgesamt als hoch eingeschätzt (Einstufung 4). Die gleiche Bewertung wurde in Kap. D.3.2 für die Prognostizierbarkeit des RSF-Parameters vergeben (ebenfalls Bewertungsstufe 4). Zudem stellen sich die Auswirkungen der Wärme- und Gasproduktion auf die Permeabilität als gering dar (Bewertungsstufe 4, vgl. Kap. D.4.2).

Ergebnis: Insgesamt führen diese Bewertungen zu einem hohen Vertrauen, dass die Auslegungsanforderungen an die integrale Verschlusspermeabilität der Bentonitverschlusses für den Zeitraum $t < 10.000 \text{ a}$ eingehalten werden (Bewertungsstufe 4). Für den Zeitraum $\geq 10.000 \text{ a}$ wird diese Bewertung unterstellt.

(b) Vertrauen in die Erfüllung der Auslegungsanforderungen zur Porosität bei Schachtverschluss aus Bentonit bei Lagerung und Tonstein

Es existieren derzeit keine Auslegungsanforderungen an die Porosität. Porosität und Permeabilität sind jedoch physikalisch gekoppelte Größen und können demnach im Zusammenwirken betrachtet werden. Im Hinblick auf die zentrale Anforderung nach einem diffusionsdominierten Radionuklidtransport gelten für die Porosität hinsichtlich der Erfüllung der Auslegungsanforderung analog die gleichen Einschätzungen wie für die Permeabilität.

Im ersten Arbeitsschritt (Kap. D.2.2) wurde das Vertrauen in die Charakterisierbarkeit der Porosität ermittelt und mit hoch (Bewertungsstufe 4) bewertet. Die gleiche Bewertung wurde in Kap. D.3.2 für die Prognostizierbarkeit des Parameters vergeben (ebenfalls Bewertungsstufe 4).

Die Auswirkungen der Wärme- und Gasproduktion auf die Porosität sind nach Kap. D.4.2 als gering zu bewerten. Es konnten keine Einwirkungen mit massiven Auswirkungen auf die Permeabilität ermittelt werden.

Ergebnis: Unter Berücksichtigung aller Einzelbewertungen wird das Vertrauen in die Erfüllung der Auslegungsanforderungen an die Porosität des Bentonitverschlusses für den Zeitraum $< 10.000 \text{ a}$ als hoch (Bewertungsstufe 4) bewertet. Für den Zeitraum $\geq 10.000 \text{ a}$ wird diese Bewertung unterstellt.

(c) Vertrauen in die Erfüllung der Auslegungsanforderungen zur Diffusivität bei Schachtverschluss aus Bentonit und Lagerung in Tonstein

Die generelle Anforderung an das Verschlussmaterial bezüglich der Diffusivität ist ein möglichst geringer Porendiffusionskoeffizient. Nach GRS (2010-4) wird nach Aufsättigung des Bentonits eine Auslegungsgröße der Diffusionskonstante von $D_p < 5 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ gefordert. Sie entspricht etwa derjenigen des unverritzten Tonsteins und entspricht der Forderung nach einem diffusionsdominierten Radionuklidtransport. Es bestehen nach GRS (2010-4) allerdings geringe Restunsicherheiten, ob der Verschluss sich homogen aufsättigt und in welchem Maße die Selbstabdichtung der Auflockerungszone durch Konvergenz und Quelldruck erfolgte.

Im ersten Arbeitsschritt wurde in Kap. D.2.2. das Vertrauen in die Charakterisierbarkeit der Diffusivität ermittelt und mit hoch (Bewertungsstufe 4) bewertet. Die gleiche Bewertung wurde in Kap. D.3.2 für die Prognostizierbarkeit des Parameters vergeben (ebenfalls Bewertungsstufe 4). Zudem sind nach Kap. D.4.2. die Auswirkungen der Wärme- und Gasproduktion auf die Diffusivität als gering zu bewerten und es konnten keine Einwirkungen mit massiven Auswirkungen auf den Parameter ermittelt werden.

Ergebnis: Unter Berücksichtigung aller Einzelbewertungen wird das Vertrauen in die Erfüllung der Auslegungsanforderungen an die Diffusivität des Bentonitverschlusses für den Zeitraum < 10.000 a als hoch (Bewertungsstufe 4) bewertet. Für den Zeitraum ≥ 10.000 a wird diese Bewertung unterstellt.

(d) Vertrauen in die Erfüllung der Auslegungsanforderungen zur Sorption bei Schachtverschluss aus Bentonit und Lagerung in Tonstein

Es bestehen keine expliziten nuklidspezifischen quantitativen Anforderungen an die Sorptionseigenschaften des Bentonitverschlusses. Es gilt allerdings die Forderung, dass die Bentonitabdichtung Sorptionseigenschaften aufweist, die ähnlich denen von Tonstein im Bereich des ewG sind. Folglich muss der Bentonitverschluss gegenüber kationischen Radionukliden, die in den radioaktiven Abfällen enthalten sind, hohe Sorptionskapazitäten aufweisen. Je stärker diese Wirkung, umso günstiger ist die Rückhaltung im Verschluss.

Nach GRS (2010-4) wird eine nahezu vollständige sorptionsbedingte Rückhaltung für kationische Radionuklide bei K_d -Werten $> 0,005 \text{ m}^3/\text{kg}$ bewirkt. GRS (2010-4) hat entsprechende K_d -Werte ermittelt und festgestellt, dass für die kationischen Radionuklide eine praktisch vollständige sorptionsbedingte Rückhaltung am Tonstein des ewG besteht. Bei dem Verschluss aus Bentonit werden ähnliche K_d -Werte vorliegen. Damit wird die Auslegungsanforderung mit hoher Sicherheit eingehalten.

Ergebnis: Dies führt zu einem hohen Vertrauen in die Erfüllung der Auslegungsanforderungen an die Sorption des Bentonitverschlusses für den Zeitraum < 10.000 a als hoch (Bewertungsstufe 4). Für den Zeitraum ≥ 10.000 a bis 100.000 a wird diese Bewertung unterstellt.

D.5.3 Zusammenfassende Bewertung des Vertrauens in die Erfüllung sicherheitskonzeptioneller Anforderungen an die Schachtverschlüsse

Die Tabelle D-8 zeigt, dass das Vertrauen in die Erfüllung sicherheitskonzeptioneller Anforderungen an die RSF-Parameter des Dichteelementes Salzbeton insgesamt mäßig ist (abgesehen von hohem Vertrauen bei Diffusivität). Sorption wird bei Salzbeton nicht bewertet. Bei dem Dichteelement Bentonit ist das Vertrauen in die Erfüllung sicherheitskonzeptioneller Anforderungen an die RSF-Parameter durchweg als hoch zu bewerten.

In Tabelle D-9 werden die RSF-Parameter auf die Sicherheitsfunktionen hin aggregiert dargestellt. Danach ist das Vertrauen in die Erfüllung sicherheitskonzeptioneller Anforderungen für die Sicherheitsfunktion „Begrenzung/Verhinderung von Lösungsbewegung u. Radionuklidtransport“ für das Schachtverschlusselement Salzbeton als mäßig zu bewerten und für Bentonit hoch zu bewerten. Für Sicherheitsfunktion „Verzögerung der Radionuklidausbreitung durch Sorption“ ist das Vertrauen in die Erfüllung sicherheitskonzeptioneller Anforderungen für das Schachtverschlusselement Bentonit hoch zu bewerten. Bei Salzbeton ist dieser Aspekt ohne Bedeutung.

KOMPONENTE SCHACHTVERSCHLUSS	TE + TM in Salz (steil u. flach)	TE + TM Tonstein	Anmerkung
RSF-Parameter	Salzbeton	Bentonit	
<i>Wirkzeitraum</i>	<i>$t < 10.000 a$</i>	<i>$t \geq 10.000 a$ bis $100.000 a$</i>	
Permeabilität	3	4	Keine Differenzierung zwischen Salz (flach u. steil) möglich; Keine Differenzierung zwischen End- und Tiefenlager möglich
Porosität	3	4	
Diffusivität	4	4	
Sorption	n.b.	4	

Tab. D-8: Vertrauen in die Erfüllung sicherheitskonzeptioneller Anforderungen der RSF-Parameter der Schachtverschlusselemente Salzbeton und Bentonit bei End- bzw. Tiefenlager in Salz und Tonstein (TE: Endlager, TM: Tiefenlager mit Maßnahmen zur Rückholbarkeit der Abfälle; Bewertungen: 5 sehr hohes Vertrauen bis 1 sehr geringes Vertrauen; n.b. = nicht bewertet)

KOMPONENTE SCHACHTVERSCHLUSS		TE + TM Salz (steil- u. flachlagernd)	TE + TM Ton- stein
Rückhaltende Sicher- heitsfunktionen	zugehörige RSF-Parameter	Dichtmaterial Salzbeton	Dichtmaterial Bentonit
Begrenzung/Verhinderung v. Lösungsbewegung u. RN-Transport	Permeabilität	3	4
	Porosität		
	Diffusivität		
Verzögerung der RN- Ausbreitung d. Sorption	Sorption	n.b.	4

Tab. D-9: Bewertungsergebnisse über das Vertrauen in die Erfüllung sicherheitskonzeptioneller Anforderungen an die Schachtverschlusselemente Salzbeton und Bentonit für die zugehörigen Sicherheitsfunktionen von End- bzw. Tiefenlagern (TE: Endlager, TM: Tiefenlager mit Maßnahmen zur Rückholbarkeit der Abfälle; Bewertungen: 5 sehr hohes Vertrauen bis 1 sehr geringes Vertrauen; n.b. = nicht bewertet)

D.6 Aggregation der Einzelbewertungen zur Ermittlung der Robustheit der radionuklidrückhaltenden Sicherheitsfunktionen für die Komponente Schachtverschluss

In diesem letzten Arbeitsschritt werden die Robustheiten der radionuklidrückhaltenden Sicherheitsfunktionen der Systemkomponente Schachtverschluss für die verschiedenen Wirkzeiträume durch Aggregation der RSF-Parameter über alle Bewertungsfelder ermittelt (s. Tab D-10). Die Robustheit lässt sich ausdrücken als Vertrauen in die Wirksamkeit der rückhaltenden Sicherheitsfunktionen der Komponente Schachtverschluss für End- bzw. Tiefenlager in Salz und Tonstein über die zu betrachtenden Wirkzeiträume (t bis 10.000 Jahre und $t > 10.000$ Jahre bis 100.000 Jahre).

Dabei ist zu beachten, dass für Schachtverschlüsse bei End- oder Tiefenlagerung in Steinsalz und Tonstein sicherheitskonzeptionell nur eine Funktionsfähigkeit der abdichtenden Elemente von rund 10.000 Jahre erforderlich ist. Für Zeitraum $t \geq 10^4$ Jahre werden die Bewertungsergebnisse für $t < 10.000$ Jahre unterstellt. Dies beruht auf der Annahme, dass der Abdichtungen wahrscheinlich auch für Zeiträume ≥ 10.000 Jahre noch eine Rückhalteleistung mit im Einzelnen unbekannter Wirkstärke aufweisen. Für Zeiträume > 100.000 Jahre muss in Gegenden mit möglicher zukünftiger Eisüberfahung und/oder tiefer Rinnenbildung vom Versagen der Schachtabdichtungen ausgegangen werden (s. auch Anhang E).

Aufgrund der engen Verflechtung von Abhängigkeiten ist eine Kompensation besserer oder schlechterer Bewertungen von Parametern nicht möglich, entscheidend für die Gesamtbewertung ist jeweils der Parameter, zu dem das geringste Vertrauen in die Erfüllung der Auslegungsanforderungen besteht.

Robustheit der Systemkomponente Schachtverschluss				
Radionuklidrückhaltende Sicherheitsfunktionen	Salz (steile u. flache Lagerung) Dichtelement Salzgrus EL + TL		Tonstein Dichtelement Bentonit EL + TL	
Wirkzeiträume	<i>t bis 10.000 a</i>	<i>t >10⁴ a bis 100.000 a</i>	<i>T bis 10.000 a</i>	<i>t >10⁴ a bis 100.000 a</i>
Begrenzung/Verhinderung von Lösungsbewegung und Radionuklidtransport	Ro3	Ro3	Ro4	Ro4
Verzögerte RN-Ausbreitung durch Sorption	n.b.	n.b.	Ro4	Ro4

Tab D-10: Bewertung der Robustheit (Ro) der radionuklidrückhaltenden Sicherheitsfunktionen für die Systemkomponente Schachtverschluss für unterschiedliche Wirkzeiträume (TE: Endlager, TM: Tiefenlager mit Maßnahmen zur Rückholbarkeit der Abfälle; Bewertungen: 5 sehr hohe Robustheit bis 1 sehr geringe / vernachlässigbare Robustheit; n.b. = nicht bewertet)

Eine weitere Aggregation der Ergebnisse über die Ebene der Sicherheitsfunktionen hinaus ist nicht sinnvoll, weil dadurch keine weiteren Informationen gewonnen werden können, sondern vielmehr der Detailblick auf die Sicherheitsfunktionen verloren geht.

Tabelle D-10 zeigt, dass die Robustheit der Sicherheitsfunktion „**Begrenzung/Verhinderung von Lösungsbewegung und Radionuklidtransport**“ für die Komponente Abdichtung/Dammelement für End- bzw. Tiefenlagerung in Steinsalz mit dem Dichtelement Salzbeton eine mäßige Robustheit aufweist (Bewertungsstufe Ro3). Die Sicherheitsfunktion „**Sorption**“ ist in Salz ohne Bedeutung.

Die Robustheit der beiden Sicherheitsfunktionen für End- bzw. Tiefenlagerung in Tonstein mit dem Dichtelement Bentonit wird für jede der beiden Sicherheitsfunktionen mit hoch bewertet (Ro 4).

Hinweise zur Ermittlung der Robustheit der beiden radionuklidrückhaltenden Sicherheitsfunktionen:

Lagerung in Salz: Schachtabdichtelement Salzbeton

Sicherheitsfunktion: Begrenzung/Verhinderung von Lösungsbewegung und Radionuklidtransport

Die aggregierten Gesamtrobustheiten der einzelnen RSF-Parameter ergeben eine mäßige Robustheit (Ro3) für diese Sicherheitsfunktion im relevanten Zeitraum bis 10.000 Jahren. Wesentliche Argumente für die nur mäßige Robustheit der Sicherheitsfunktion sind derzeit immer noch offene Fragen und das derzeit nicht ausreichende Prozessverständnis hinsichtlich der unter Kompaktion

erreichbaren Endpermeabilität und -porosität, der Korrosion von Salzbeton unter bestimmten chemischen Bedingungen, der Probleme der thermisch bedingten Rissbildung bei Abkühlung des Salzbetons und des upscalings von Ergebnissen aus Laborversuchen auf benötigte Größenverhältnisse.

Für den Zeitraum ≥ 10.000 a bis 100.000 a wird eine mäßige Robustheit (Ro3) der Sicherheitsfunktion angenommen, wobei diese Bewertung ungewiss ist. Da aber die Relevanz der Sicherheitsfunktion für diesen Zeitraum nur sehr gering ist, ist der Aspekt ohne größere Bedeutung. Für darüber hinausgehende Zeiträume muss vom Versagen der Schachtverschlüsse ausgegangen werden.

Sicherheitsfunktion: Verzögerung der Radionuklidausbreitung durch Sorption

Nicht bewertet, ohne Bedeutung bei Salzbeton.

Lagerung in Tonstein: Schachtabdichtelement Bentonit

Sicherheitsfunktion: Begrenzung/Verhinderung von Lösungsbewegung und Radionuklidtransport

Die aggregierten Gesamtrobustheiten der einzelnen RSF-Parameter ergeben eine hohe Robustheit (Ro4) für diese Sicherheitsfunktion für den gesamten Nachweiszeitraum. Zu dieser Bewertung beigetragen haben die bisher schon vorliegenden Kenntnisse und das Prozessverständnis über die Eigenschaften von Bentonit als Dichtmaterial. Insbesondere nach Aufsättigung und Quellung des Bentonits werden Permeabilitäten und Porositäten erreicht, bei denen Diffusion gegenüber Advektion vorherrscht. Allerdings ist zu beachten, dass die Aufsättigung eine gewisse Zeit benötigt und ihre homogene Verteilung innerhalb des Dichtelements gewährleistet ist. Diese Zeitspanne ist sicherheitskonzeptionell jedoch durch die Komponente Abfallbehälter abgedeckt (s. Anhang A).

Sicherheitsfunktion: Verzögerung der Radionuklidausbreitung durch Sorption

Die Bewertung der Sicherheitsfunktion „Verzögerung der Radionuklidausbreitung durch Sorption“ ergibt eine hohe Robustheit (Ro4) für die betrachteten Wirkzeiträume. Gründe dafür sind u.a. die Erkenntnis, dass Bentonit eine nahezu vollständige sorptionsbedingte Rückhaltung für kationische Radionuklide aufweist und dass eine Abschätzung der minimalen Sorption einigermaßen möglich ist.

D.7 Quellen zu Anhang D

- BA Freiberg/DBEtec (2013): Schachtverschlüsse für Endlager für hochradioaktive Abfälle – ELSA Teil 1–.-Projektleitung: W. Kudla (Bergakademie Freiberg) & M. Jobmann (DBEtec); Zuwendungsgeber/ Auftraggeber: Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, Förderkennzeichen Förderkennzeichen 02E10921 / 02E10931; Freiberg/Peine, 30.04.2013.
- DBEtec (2008): EUGENIA - Entwicklung und Umsetzung von technischen Konzepten für geologische Endlager in allen Wirtsgesteinen.- AP 7 - Verfüll- und Verschlusskonzepte, Autor: Lommerzheim, A., Dezember 2008, Peine.
- ENTRIA-AB-03 (2015): Entria Arbeitsbericht-03 „Generische Tiefenlagermodelle mit Option zur Rückholung der radioaktiven Reststoffe: Geologische und Geotechnische Aspekte für die Auslegung“.- Bearbeiter: Stahlmann, J., Leon-Vargas, R., Mintzlaff, V.; Braunschweig, 2015.
- ESK (2016): Stellungnahme der Entsorgungskommission zur Endlagerforschung in Deutschland: Anmerkungen zu Forschungsinhalten und Forschungssteuerung.- Entsorgungskommission, 12.05.2016.
- GRS/DBEtec (2012): Integrität geotechnischer Barrieren, Teil 2, Vertiefte Nachweisführung.- Bericht zum Arbeitspaket 9.2 der vorläufigen Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben (VSG).- Autoren: Nina Müller-Hoeppe (DBEtec), Micheal Breustedt (DBEtec), Johanna Wolf (DBEtec), Oliver Czaikowski (GRS), Klaus Wieczorek (GRS).- Bericht GRS – 288, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit, Köln, Oktober 2012.
- GRS, BGR, DBEtec (2017): ANSICHT - Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein.- Autoren: M. Jobmann (Koordinator), V. Burlaka, P. Herold, E. Kuate Simo, J. Maßmann, A. Meleshyn, A. Rübel & G. Zieffle; Berichtsnummer: TEC-29-2016-AB, Peine, Februar 2017.
- GRS, BGR, DBEtec (2013): Status of the safety concept and safety demonstration for an HLW repository in salt - Summary report,- Bearbeiter: W. Bollingerfehr, D. Buhmann, W. Filbert, S. Keller, J. Krone, A. Lommerzheim, J. R. Weber, J. Wolf,. Report TEC-15-2013-AB, Peine, Dezember 2013.
- GRS - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH (2016): Wärmeentwicklung / Gesteinverträglichkeit – Bericht der GRS im Auftrag der AG 3 der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe K-Mat 64.- Autoren: A. Meleshyn T. Weyand G. Bracke H. Kull K. Wieczorek; Mai 2016
- GRS - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH (2013): Synthesebericht für die vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben.- Bericht zum Arbeitspaket 13, Autoren: Klaus Fischer- Appelt, Bruno Baltes, Dieter Buhmann, Jürgen Larue, Jörg Mönig.- Bericht GRS-290, März 2013.
- GRS - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH (2011): Verschlussysteme in Endlagern für wärmeentwickelnde Abfälle in Salzformationen - Workshop der GRS in Zusammenarbeit mit dem Projektträger Karlsruhe PTKA-WTE, Braunschweig, 24. – 25. August 2010, Zusammenge stellt von: Tilmann Rothfuchs,- GRS-Bericht 267, Januar 2011, Köln.
- GRS – Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH (2010): Abwägungsmethodik für den Vergleich von Endlagersystemen in unterschiedlichen Wirtsgesteinsformationen. Anleitung

zur Anwendung der Abwägungsmethodik.- Abschlussbericht zum Vorhaben 3607R02589 „Evaluierung der Vorgehensweise“; Bericht GRS – A – 3536; Autoren: Fischer-Appelt, K. & Baltes, B., Dezember 2010, Köln.

GRS – Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH (2010-4): Abwägungsmethodik für den Vergleich von Endlagersystemen in unterschiedlichen Wirtsgesteinsformationen - Bewertung der charakteristischen Parameter rückhaltenden Sicherheitsfunktionen der Verschlüsse (Bewertung der charakteristischen Parameter der rückhaltenden Sicherheitsfunktionen der Schachtverschlüsse - im Fall Gorleben zusätzlich: Streckenabdichtungen zum Infrastrukturbereich), 55 S.- Begleitbericht zum Vorhaben 3607R02589 VerSi „Evaluierung der Vorgehensweise“, Bericht GRS A 3536, Köln.

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

Müller-Lyda, Ingo (1999): Permeabilität von aufgelockertem Steinsalz. Ableitung einer Permeabilitäts-Druck-Relation für Langzeitsicherheitsanalysen. Köln; Garching b. München; Berlin, Braunschweig: GRS.

Nagra (2002): Projekt Opalinuston - Konzept für die Anlage und den Betrieb eines geologischen Tiefenlagers. Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle.- Technischer Bericht 02-02, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen/Schweiz, Dezember 2002.

Anhang E Bestimmung der Robustheit der rückhaltenden Sicherheitsfunktionen des einschlusswirksamer Gebirgsbereichs (ewG)

<u>Inhaltsverzeichnis</u>	Seite
E.1 Einleitung	4
E.2 Vertrauen in die Charakterisierung der RSF-Parameter des ewG im Ist-Zustand	5
E.2.1 Vertrauen in die Charakterisierung der RSF-Parameter des ewG bei Lagerung in Steinsalz	6
E.2.2 Vertrauen in die Charakterisierung der RSF-Parameter des ewG bei Lagerung in Tonstein	9
E.2.3 Zusammenfassende Darstellung des Vertrauens in die Charakterisierung der RSF-Parameter des ewG im Ist-Zustand	11
E.3 Auswirkungen systembedingter interner sowie klimabedingter externer Einflüsse auf die RSF-Parameter des ewG	14
E.3.1 Auswirkungen systembedingter interner sowie klimabedingter externer Einflüsse auf die RSF-Parameter des ewG bei Lagerung in Salz	15
E.3.1.1 Interne Auswirkungen auf die RSF-Parameter des ewG in Salz für $t < 10.000$ Jahre	15
E.3.1.2 Externe Auswirkungen auf die RSF-Parameter des ewG in Salz für $t \geq 10.000$ Jahre	18
E.3.2 Auswirkungen systembedingter interner sowie klimabedingter externer Einflüsse auf die RSF-Parameter des ewG bei Lagerung in Tonstein	28
E.3.2.1 Interne Auswirkungen auf die RSF-Parameter des ewG in Tonstein für $t < 10.000$ Jahre	28
E.3.2.2 Externe Auswirkungen auf die RSF-Parameter des ewG in Tonstein für $t \geq 10.000$ Jahre	31
E.3.3 Zusammenfassende Bewertung systembedingter interner und klimabedingter externer Einflüsse auf die RSF-Parameter des ewG	35
E.4 Ermittlung des Vertrauens in die Erfüllung sicherheitskonzeptioneller Auslegungsanforderungen an die RSF-Parameter des ewG	36
E.4.1 Vertrauen in die Erfüllung der Auslegungsanforderungen an die RSF-Parameter des ewG bei Lagerung in Steinsalz	36

	Seite
E.4.1.1 Vertrauen in die Erfüllung der Auslegungsanforderungen der RSF-Parameter des ewG für $t < 10.000$ Jahre bei Lagerung in Steinsalz	36
E.4.1.2 Vertrauen in die Erfüllung der Auslegungsanforderungen der RSF-Parameter des ewG für $t \geq 10.000$ Jahre bei Lagerung in Steinsalz	39
E.4.2 Vertrauen in die Erfüllung der Auslegungsanforderungen der RSF-Parameter des ewG bei Lagerung in Tonstein	42
E.4.2.1 Vertrauen in die Erfüllung der Auslegungsanforderungen der RSF-Parameter des ewG für $t < 10.000$ Jahre bei Lagerung in Tonstein	42
E.4.2.2 Vertrauen in die Erfüllung der Auslegungsanforderungen der RSF-Parameter des ewG für $t \geq 10.000$ Jahre bei Lagerung in Tonstein	44
E.5 Zusammenführung der Einzelbewertungen zur Robustheit der radionuklidrückhaltenden Sicherheitsfunktionen des ewG	48
E.6 Quellen zu Anhang E	50

Verzeichnis der Abbildungen

Abb. E-1: Untersuchungswürdige Wirtsgesteinsformationen Salzgesteine/Tonsteine unter Berücksichtigung von Kriterien des Akend (Quelle: BGR 2007)	20
Abb. E-2: Verbreitungsgrenzen salinarer Formationen in Deutschland nach BGR 2011, ergänzt durch Angaben zu Erdbebenzonen und Vulkanregionen mit Gefährdungspotenzial (Quelle: Schreiber, U., Ewert, T., Jentzsch, G. (2015)	21
Abb. E-3: Glaziale Rinnenbildungen und Eisrandlagen in Norddeutschland. (Quelle: Stakebrandt et al. 2001)	22

Verzeichnis der Tabellen

Tab. E-1: Radionuklidrückhaltende Sicherheitsfunktionen und zugeordnete RSF-Parameter für die Komponente ewG bei Tiefenlagerung in Salz und Tonstein	5
Tab. E-2: Darstellung des Vertrauens in die Charakterisierung des Ist-Zustandes der RSF-Parameter des ewG	13
Tab. E-3: Aggregation des Vertrauens in die Charakterisierung des Ist-Zustandes des ewG auf der Ebene der Sicherheitsfunktionen	13

	Seite
Tab. E-4: Bewertung der internen Auswirkungen von Gasdruck und Wärme auf die RSF-Parameter des ewG bei Lagerung in Salz (steil u. flach) für $t < 10.000$ Jahre	18
Tab. E-5: Bewertung der externen Einwirkungen auf die RSF-Parameter des ewG für Lagerung in Salz (steil u. flach) für $t \geq 10.000$ Jahre	27
Tab. E-6: Interne Einwirkungen der Systemauswirkungen Gas und Wärme auf die RSF-Parameter des ewG für Lagerung in Tonstein für $t < 10.000$ Jahre	31
Tab. E-7: Externe Auswirkungen der Eisüberfahung mit tiefer Rinnenbildung auf RSF-Parameter des ewG bei Lagerung in Tonstein für $t \geq 10.000$ Jahren	35
Tab. E-8: Vertrauen in die Erfüllung der Auslegungsanforderungen für die RSF-Parameter des ewG bei Lagerung im Salz für den Wirkzeitraum $t < 10.000$ Jahre	38
Tab. E-9: Vertrauen in die Erfüllung der Auslegungsanforderungen für die RSF-Parameter bei Lagerung im Salz für den Wirkzeitraum $t \geq 10.000$ Jahre	41
Tab. E-10: Vertrauen in die Erfüllung der Auslegungsanforderungen für die RSF-Parameter bei Lagerung in Tonstein für den Wirkzeitraum $t < 10.000$ Jahre	44
Tab. E-11: Vertrauen in die Erfüllung der Auslegungsanforderungen für die RSF-Parameter bei Lagerung im Tonstein für den Wirkzeitraum $t \geq 10.000$ Jahre mit Eisüberfahung und tiefer Rinnenbildung	47
Tab. E-12: Zusammenfassende Bewertung der Robustheit der rückhaltenden Sicherheitsfunktionen für die Systemkomponente für ewG für unterschiedliche Wirkzeiträume	48

E.1 Einleitung

In Anhang E wird die Robustheit der radionuklidrückhaltenden Sicherheitsfunktionen der Komponente einschlusswirksamer Gebirgsbereich (ewG) als qualitative Größe bestimmt (s. Bericht, Kap. 6.2.4). Sie dient im Zusammenspiel mit der Relevanz der entsprechenden Sicherheitsfunktionen der Identifizierung von Robustheitsdefiziten der Sicherheitsfunktionen (vgl. Bericht, Kap. 6.2.5).

Die Bestimmung der Robustheit der rückhaltenden Sicherheitsfunktionen (RSF) der Komponente ewG beruht auf verschiedenen Parametern (RSF-Parametern), denen wiederum bestimmte Eigenschaften und Prozesse zugrunde liegen. In Tab. E-1 sind die radionuklidrückhaltenden Sicherheitsfunktionen und die ihnen zugeordneten RSF-Parameter zusammengestellt. Die einzelnen Eigenschaften und Prozesse werden in den jeweiligen Unterkapiteln behandelt. Sie können auch dem Bericht (Tab. 1) entnommen werden.

Bei der Behandlung des ewG wird besonderes Gewicht auf die langfristigen Einwirkungen von außen auf die Sicherheitsfunktionen (bzw. die diesen unterliegenden RSF-Parametern) des ewG gelegt (s. Tab. E-1). Dabei handelt sich insbesondere um Auswirkungen einer wahrscheinlichen zukünftigen kaltzeitlichen Klimaphase. Außerdem werden die Auswirkungen interner Entwicklungen (Wärme- und Gasentwicklung) auf den ewG betrachtet.

Auf den Zeitraum ≥ 10.000 Jahre wird auch deshalb besonderer Wert gelegt, weil die sicherheitliche Funktion des ewG für diesen Zeitraum entscheidend ist. Denn die Elemente Behälter, Abdichtung/Dämme und Schachtabdichtungen haben zu diesem Zeitpunkt sehr wahrscheinlich ihre isolierende Wirksamkeit gegen die Radionuklid Ausbreitung ganz oder teilweise verloren. Der ewG muss dann im Verbund mit dem Versatz der Grubenhohlräume die geforderte langfristige (passive) Sicherheit gewährleisten.

Es gilt auch für Anhang E – wie bei der Behandlung der anderen Komponenten/Sicherheitsfunktionen – die Einschränkung zu beachten, dass der generische Ansatz bei Entria es nicht ermöglicht, standortspezifische Aspekte und spezielle Konzepte zur Anlage des End- bzw. Tiefenlagers zu berücksichtigen. Zu ersteren liegen keine und zu letzteren nur einige wenige Angaben vor (ENTRIA-AB-03 (2015)).

Das Ergebnis kann also nicht in einer umfassenden und alle Aspekte berücksichtigenden Beurteilung der Robustheit und der Robustheitsdefizite von radionuklidrückhaltenden Sicherheitsfunktionen des ewG bestehen. Es können aber einige wesentliche Aspekte beispielhaft herausgearbeitet werden, die für die Beurteilung von End- bzw. Tiefenlagern bedeutsam sein können.

Die Bestimmung der Robustheit der Abdichtungen/Dämme geschieht für die **radionuklidrückhaltenden Sicherheitsfunktionen (RSF)** mit Hilfe der sie kennzeichnenden beiden RSF-Parameter (s. Bericht, Kap. 4.2 und Tab. 1):

- Begrenzung/Verhinderung von Lösungsbewegung und Radionuklidtransport (mit den RSF-Parametern Permeabilität, Porosität, Diffusivität);
- Verzögerte Radionuklid Ausbreitung durch Sorption (mit dem RSF-Parameter Sorption).

Dabei wird jede der zwei Sicherheitsfunktionen mit ihren RSF-Parametern in drei **Bewertungsfeldern** beurteilt:

- Das Vertrauen in die Charakterisierung des Ist-Zustandes der RSF-Parameter;
- Die Bewertung der Auswirkungen interner und externer Systementwicklungen auf die RSF-Parameter (Systemrobustheit);
- Das Vertrauen in die Erfüllung sicherheitskonzeptioneller Auslegungsanforderungen durch die RSF-Parameter.

Das bei den Anhängen A bis D zusätzlich benutzte Bewertungsfeld „Prognostizierbarkeit der RSF-Parameter“ wird hier gemeinsam im Bewertungsfeld „Vertrauen in die Erfüllung sicherheitskonzeptioneller Auslegungsanforderungen“ behandelt.

Abschließend werden die Einzelergebnisse verbalargumentativ aggregiert, so dass sich für jede der radionuklidrückhaltenden Sicherheitsfunktionen eine Aussage über ihre Robustheit ergibt. Soweit möglich und sinnvoll, werden die Robustheitsaussagen zeitlich differenziert für die **Wirkzeiträume** (t bis 10.000 Jahre und $t \geq 10.000$ Jahre bis 1 Mio. Jahre) abgeleitet.

Im Übrigen wird vorausgesetzt, dass bei einem zukünftigen End- bzw. Tiefenlager ein dem Stand von Wissenschaft und Technik entsprechendes Auswahlverfahren stattgefunden hat. Nur so sind die Voraussetzungen für die Festlegung eines Standortes mit hoher potenzieller Eignung gegeben.

Komponente ewG	Rückhaltende Sicherheitsfunktion	TE + TM in Salz RSF-Parameter für Salz	TE + TM in Salz RSF-Parameter für Tonstein
Einschlusswirksamer Gebirgsbereich	Begrenzung/ Verhinderung von Lösungsbewegung und Radionuklidtransport	Permeabilität, Porosität, Diffusivität, Ausdehnung ewG/Wirtsgestein	Permeabilität, Porosität, Diffusivität, Ausdehnung ewG/Wirtsgestein
	Verzögerung der Radionuklidausbreitung durch Sorption	Nicht relevant	Sorption

Tab. E-1: Radionuklidrückhaltende Sicherheitsfunktionen und zugeordnete RSF-Parameter für die Komponente ewG bei Tiefenlagerung in Salz und Tonstein (TE = Endlager, TM = Tiefenlager mit Monitoring und Möglichkeit der Rückholbarkeit)

E.2 Vertrauen in die Charakterisierung der RSF-Parameter des ewG im Ist-Zustand

In den folgenden Unterkapiteln E.2.1 und E.2.2 wird jeweils in vier Teilschritten (a) bis (d) die Charakterisierung und das Upscaling der RSF-Parameter für Lagerung in Salz und Tonstein ermittelt und bewertet. Es wird untersucht, wie gut der jeweilige RSF-Parameter aufgrund der Aussagekraft der gewählten Untersuchungsmethoden bestimmt werden kann und wie groß das Vertrauen in die Übertragbarkeit der RSF-Parameter in nicht untersuchte Bereiche des ewG ist (Upscaling). Die GRS (2010, 2010-5) hat dieses Vorgehen am Beispiel zweier Standorte (Salz, Tonstein) exemplarisch umgesetzt. Dieser Vorgehensweise wird hier weitgehend gefolgt, allerdings mit dem Unterschied, dass anstelle der fehlenden standortspezifischen Angaben nur allgemeine Kenntnisse zu den Parametern und Gesteinen benutzt werden können.

E.2.1 Vertrauen in die Charakterisierung der RSF-Parameter des ewG bei Lagerung im Steinsalz

(a) Charakterisierbarkeit der Parametergröße in Abhängigkeit von der Untersuchungsmethode

(a-1): Permeabilität des ewG in Salz

Es existieren verschiedenste Methoden, die Permeabilität von Salz im Labor und in situ (Gebirgspermeabilität) zu bestimmen. GRS (2010-5) kommt zu dem Ergebnis, dass zur Charakterisierung der Parametergröße Permeabilität des ewG ausgereifte Untersuchungsmethoden zur Anwendung kommen, die insbesondere im Hinblick auf die Bestimmung der Mindestpermeabilität zur Feststellung der hydraulischen Dichtheit des Steinsalzes gute Ergebnisse liefern, deren Aussagekraft als sehr hoch eingestuft wird.

Ergebnis: Das Vertrauen in die Bestimmung der Gebirgspermeabilität des ewG für Salz in steiler und flacher Lagerung ist als sehr hoch zu bewerten (Bewertungsstufe 5).

(a-2): Porosität des ewG in Salz

Zur Ermittlung der Porosität im Salz stehen verschiedene langjährig erprobte Methoden zur Verfügung, deren Ergebnisse als gut bezeichnet werden müssen.

Ergebnis: Das Vertrauen in die Bestimmung der Porosität des ewG für Salz in steiler und flacher Lagerung ist hoch zu bewerten (Bewertungsstufe 4).

(a-3) Diffusivität des ewG in Salz

Messungen der Gaspermeabilität in Steinsalz liefern nach GRS (2010-5) extrem geringe Werte für die Diffusionskonstante $< 10^{-21} \text{ m}^2/\text{s}$. Die Zuverlässigkeit der Ermittlung der Diffusionskonstanten im ewG kann als hoch angesehen werden.

Ergebnis: Das Vertrauen in die Bestimmung der Diffusivität des ewG für Salz in steiler und flacher Lagerung ist hoch zu bewerten (Bewertungsstufe 4).

(a-4) Ausdehnung des Wirtsgesteins Salz um das Endlagerbergwerk, für die charakteristischen Eigenschaften der Sicherheitsfunktion des ewG gelten

Durch eine intensive über- und untertägige Erkundung des Salzstandortes mittels verschiedenster Untersuchungsmethoden ist der Wirtsgesteinskörper des Salzstockes bzw. des flachlagernden Salzes, der den ewG enthält und schützt, gut charakterisiert.

Ergebnis: Das Vertrauen in den Wirtsgesteinskörper, der den ewG enthält, ist für Salz in steiler und flacher Lagerung als hoch zu bewerten (Bewertungsstufe 4).

(b) Möglichkeit des Upscalings aufgrund der Standortverhältnisse bei Salz (strukturelle und materielle Homogenität)

(b-1) Gebirgspermeabilität des ewG im Steinsalz

Bei Lagerung im Salz werden homogene, zusammenhängende Steinsalzvorkommen vor allem in der Staßfurt-Folge (Hauptsalz) gesucht. Die intensive untertägige Erkundung (z.B. geologische Kartierung, Bohrungen, EMR-Messungen) zeigen für das Hauptsalz des Salzkörpers eine räumlich homogene Situation an. Dennoch verbleibt speziell für Lagerung in Salzstöcken eine gewisse Ungewissheit hinsichtlich des komplexen Interngefüges mit Vorhandensein verschiedener Gesteinsarten (z.B. Anhydrit) oder sonstigen Inhomogenitäten mit höherer Permeabilität. Bei flachlagernden Salzen verringern sich diese Ungewissheiten deutlich.

Deshalb kann bei Salzstöcken von einer guten Charakterisierbarkeit der Gebirgspermeabilität im Hinblick auf das upscaling der gemessenen Eigenschaften, speziell der Permeabilität, auf das den ewG umgebende Wirtsgestein ausgegangen werden. Bei flachlagernden Salzvorkommen ist die Charakterisierbarkeit der Gebirgspermeabilität als sehr gut zu bewerten.

Ergebnis: Das Vertrauen in die Charakterisierbarkeit der Gebirgspermeabilität mit Blick auf den gesamten ewG und das darüber hinausgehende Wirtsgestein wird für Salzstöcke als hoch bewertet (Bewertungsstufe 4), für flachlagernde Salzvorkommen als sehr hoch (Bewertungsstufe 5).

(b-2) Porosität des ewG im Steinsalz

Aufgrund der untertägigen Erkundungsergebnisse kann für das Hauptsalz im Hinblick auf die geforderten Eigenschaften des Salzkörpers für die Einlagerung radioaktiver Abfälle von einer räumlich homogenen Situation ausgegangen werden. Daher kann von einer guten Charakterisierbarkeit der Gesamtporosität und der effektiven Porosität im Hinblick auf das upscaling der gemessenen Eigenschaften auf das den ewG bildenden (und umgebenden) Hauptsalzvorkommen (Wirtsgestein) ausgegangen werden. Dennoch verbleibt speziell für Lagerung in Salzstöcken eine gewisse Ungewissheit hinsichtlich des Vorhandenseins von Inhomogenitäten mit höherer Porosität oder Klüftigkeit. Bei flachlagernden Salzen fallen diese Ungewissheiten weitgehend weg.

Ergebnis: Das Vertrauen in die Charakterisierbarkeit der Porosität mit Blick auf den gesamten ewG und das darüber hinausgehende Wirtsgestein wird für Salzstöcke als hoch bewertet (Bewertungsstufe 4), für flachlagernde Salzvorkommen als sehr hoch (Bewertungsstufe 5).

(b-3) Diffusivität des ewG in Steinsalz

Aufgrund der untertägigen Erkundungsergebnisse kann für das Hauptsalz im Hinblick auf die geforderten Eigenschaften des Salzkörpers für die Einlagerung radioaktiver Abfälle im ewG von einer räumlich homogenen Situation ausgegangen werden. Dennoch verbleibt speziell für Lagerung in Salzstöcken eine gewisse Ungewissheit hinsichtlich des Vorhandenseins von Klüften oder Inhomogenitäten, die sich auf die Charakterisierbarkeit der Diffusivität auswirken können. Bei flachlagernden Salzen fallen diese Ungewissheiten weitgehend weg.

Daher kann bei Salzstöcken von einer guten Charakterisierbarkeit der Diffusivität im Hinblick auf das upscaling der gemessenen Eigenschaften auf das das Erkundungsbergwerk umgebenden Hauptsalzvorkommen ausgegangen werden, bei flachlagernden Salz von einer sehr guten Charakterisierung.

Ergebnis: Das Vertrauen in die Charakterisierbarkeit der Diffusivität mit Blick auf den gesamten ewG und das darüber hinausgehende Wirtsgestein wird für Salzstöcke als hoch bewertet (Bewertungsstufe 4), für flachlagernde Salzvorkommen als sehr hoch (Bewertungsstufe 5).

(b-4) Ausdehnung des Wirtsgesteins um das Endlagerbergwerk im Salz, für die charakteristische Eigenschaften der Sicherheitsfunktion des ewG gelten

Durch die intensive Untertageerkundung des ausgewählten Standortes mittels Auffahrungen, Umfahrung des Einlagerungsbereiches sowie zahlreicher Bohrungen von Untertage kann der ewG gut erkundet werden. Die Wirtsgesteinskonturen sind durch Salzspiegelbohrungen, Tiefbohrungen, Schachtvorbohrungen und Schachtbau sowie geophysikalische Messungen von Übertage gut zu beschreiben. Der Wirtsgesteinskörper, der den ewG enthält und schützt, ist deshalb gut charakterisiert

Ergebnis: Das Vertrauen in das Upscaling mit Blick auf den gesamten ewG und den Teilbereich des Wirtsgesteins, der darüber hinausgeht, wird für Salz als hoch bewertet (Bewertungsstufe 4).

(c) Vertrauen in die Charakterisierung des Ist-Zustandes der RSF-Parameter für den ewG bei Salz (Aggregation der Bewertungen zu den Schritten a) und b))

(c-1) Gebirgspermeabilität des ewG bei Salz

Das aggregierte Gesamtergebnis der für den Parameter Gebirgspermeabilität des ewG eines Salzstandortes unter Berücksichtigung der oben beschriebenen Bewertungsergebnisse (a) und (b) lautet:

Das Vertrauen in die Charakterisierung der Permeabilität für den Ist-Zustand des ewG in Salz wird als sehr hoch bei flachlagernden Salzvorkommen (Bewertungsstufe 5) und hoch bei Salzstöcken (Bewertungsstufe 4) eingeschätzt.

(c-2) Porosität des ewG bei Salz

Das aggregierte Gesamtergebnis der beispielhaft für den Parameter Porosität des ewG eines ausgewählten Salzstandortes unter Berücksichtigung der oben unter (a) und (b) durchgeführten Bewertung lautet:

Das Vertrauen in die Charakterisierung der Porosität für den Ist-Zustand des ewG in Salz wird als sehr hoch bei flachlagernden Salzvorkommen (Bewertungsstufe 5) und hoch bei Salzstöcken (Bewertungsstufe 4) eingeschätzt.

(c-3) Diffusivität des ewG bei Salz

Das aggregierte Gesamtergebnis der beispielhaft für den Parameter Diffusivität des ewG eines ausgewählten Salzstandorts unter Berücksichtigung der oben unter (a) und (b) durchgeführten Bewertung lautet:

Das Vertrauen in die Charakterisierung der Diffusivität für den Ist-Zustand des ewG in Salz wird als sehr hoch bei flachlagernden Salzvorkommen (Bewertungsstufe 5) und hoch bei Salzstöcken (Bewertungsstufe 4) eingeschätzt.

(c-4) Ausdehnung des Wirtsgesteins um das Endlagerbergwerk, für das die charakteristischen Eigenschaften der Sicherheitsfunktion des ewG gelten

Das aggregierte Gesamtergebnis der für den Parameter Ausdehnung des Wirtsgesteins um das ausgewählte End- bzw. Tiefenlagerbergwerk in Tonstein, für den die charakteristischen Eigenschaften der Sicherheitsfunktionen des ewG gelten, unter Berücksichtigung der oben unter (a) und (b) durchgeführten Bewertung lautet:

Das Vertrauen in die Ermittlung der Ausdehnung des Wirtsgesteins um das End- bzw. Tiefenlagerbergwerk, für den die charakteristischen Eigenschaften der Sicherheitsfunktion des ewG in Salz gelten, wird für den Ist-Zustand kann als hoch eingeschätzt werden (Bewertungsstufe 4).

E.2.2 Vertrauen in die Charakterisierung der RSF-Parameter des ewG bei Lagerung im Tonstein

(a) Charakterisierbarkeit der Parametergröße in Abhängigkeit von der Untersuchungsmethode bei Tonstein

(a-1): Permeabilität des ewG in Tonstein

Mit Hilfe von Packertests in Bohrlöchern lässt sich die Gebirgspermeabilität des intakten Gesteinsverbandes des ewG bestimmen. Nachteile der Druckpackertests sind neben etwaigen Umläufigkeiten nahe der Packermanschetten Porenaufweitungen aufgrund von hohen Packerdrücken, die deutlich über den hydrostatischen in situ Drücken liegen. Beide Messunsicherheiten führen jedoch zu gegenüber der Realität erhöhten Permeabilitätswerten und spiegeln daher die Obergrenze der Spannweite der realen Permeabilitäten wider. Deshalb wird die Charakterisierbarkeit der Parametergröße Gebirgspermeabilität des ewG durch die Untersuchungsmethode Packertests als sehr hoch angesehen.

Ergebnis: Das Vertrauen in die Bestimmung der Gebirgspermeabilität des ewG in Tonstein ist als sehr hoch zu bewerten (Bewertungsstufe 5).

(a-2): Porosität des ewG in Tonstein

An Kernproben von Bohrungen können mittels verschiedener Methoden Porositätsbestimmungen durchgeführt werden. Gleiches gilt für die Bestimmung der Porenstruktur sowie des Bindungszustands der Porenwässer, der Porenradienverteilung sowie der Zugänglichkeit für gelöste Stoffe. Durch Kombination der Methoden zur Ermittlung der Gesamtporosität und der effektiven Porosität wird ihre Aussagekraft als sehr hoch eingeschätzt.

Ergebnis: Das Vertrauen in die Bestimmung der Porosität des ewG in Tonstein ist als sehr hoch zu bewerten (Bewertungsstufe 5).

(a-3) Diffusivität des ewG in Tonstein

Die vorhandenen Untersuchungsmethoden (Laboruntersuchungen) sowie Profiluntersuchungen des Diffusionsverhaltens natürlicher Analogelemente lassen bei entsprechendem Aufwand eine gute Charakterisierbarkeit der Diffusionskonstanten zu. Dies gilt, wenn die Ergebnisse der Laborversuche an Kernproben wenigstens größenordnungsmäßig mit dem Diffusionsverhalten natürlicher Analogelemente übereinstimmen. Deshalb wird die Charakterisierbarkeit der Parametergröße

ße Diffusivität des ewG im Hinblick auf die Aussagekraft der gewählten Untersuchungsmethoden als hoch angesehen.

Ergebnis: Das Vertrauen in die Bestimmung der Diffusivität des ewG in Tonstein ist hoch zu bewerten (Bewertungsstufe 4).

(a-4) Ausdehnung des Wirtsgesteins Tonstein um das Endlagerbergwerk, für den die charakteristischen Eigenschaften der Sicherheitsfunktion des ewG gelten

Bei der Standortauswahl und Standortcharakterisierung werden die Abmessungen des Wirtsgesteinskörpers (Mächtigkeit, Tiefenlage, räumliche Erstreckung) mittels geophysikalischer (z.B. 3-D-Seismik) Methoden und Bohrungen ermittelt. Durch diese Untersuchungsmethoden kann der Wirtsgesteinskörper hinsichtlich seiner Barrierenmächtigkeit, dem Grad der Umschließung des ewG, der flächenhaften Ausdehnung des Wirtsgesteins sowie seine Teufe gut charakterisiert werden.

Ergebnis: Das Vertrauen in den Wirtsgesteinskörper, der den ewG enthält, ist als hoch zu bewerten (Bewertungsstufe 4).

(a-5) Ermittlung der Sorptionseigenschaften des ewG im Tonstein

Die Sorptionseigenschaften des ewG lassen sich mittels verschiedener Methoden (z.B. Batchexperimente) ermitteln. Ein Problem, das allen Versuchen zu Grunde liegt ist, dass Probenahme und Versuchsdurchführung im Hinblick auf die Erhaltung der in situ Bedingungen (Sauerstoffgehalt, Redoxzustand usw.) ebenso wie die Extraktion des Porenwassers schwierig sind. Unter der Annahme, dass die oben beschriebenen Versuche im Hinblick auf ihre Auswertung sinnvoll kombiniert werden, wird die Aussagekraft der Methoden zur Ermittlung der Sorptionseigenschaften aufgrund der Unsicherheiten bei der Erhaltung der geochemischen in situ Bedingungen während der Probenahme und im Labor als mittelmäßig eingestuft.

Ergebnis: Das Vertrauen in die Bestimmung der Sorptionseigenschaften des ewG in Tonstein ist mittel zu bewerten (Bewertungsstufe 3).

(b) Möglichkeit des Upscalings aufgrund der Standortverhältnisse bei Tonstein (strukturelle und materielle Homogenität)

(b-1) Gebirgspерmeabilität des ewG in Tonstein

Das Wirtsgestein eines Tonsteinstandortes und damit auch der ewG sollten gekennzeichnet sein durch eine vollmarine, landferne Beckenfazies ohne Einlagerung von Deltaschüttungen, geringe Sedimentationsraten und geringe Mächtigkeitsschwankung des Wirtsgesteins. Es sollten keine Hinweise auf übermäßige tektonische oder thermale Beanspruchung vorliegen. Ein hoher Smektitanteil fördert die Verheilung von etwaigen ehemaligen Trennflächensystemen. Diese (und eventuell weitere) Eigenschaften führen beim Tonsteinstandort zu der Einschätzung einer sehr guten Charakterisierbarkeit der Gebirgspерmeabilität im Hinblick auf die Standortverhältnisse.

Ergebnis: Das Vertrauen in die Charakterisierbarkeit der Gebirgspерmeabilität mit Blick auf den gesamten ewG und das darüber hinausgehende Wirtsgestein wird für Tonstein als sehr hoch bewertet (Bewertungsstufe 5).

(b-2) Porosität des ewG in Tonstein

Die oben unter (b-1) genannten Eigenschaften des Tonsteinstandortes führen zu der Einschätzung einer sehr guten Charakterisierbarkeit der Gesamtporosität und der effektiven Porosität im ewG.

Ergebnis: Das Vertrauen in die Charakterisierbarkeit der Porosität mit Blick auf den gesamten ewG und das darüber hinausgehende Wirtsgestein wird für Tonstein als sehr hoch bewertet (Bewertungsstufe 5).

(b-3) Diffusivität des ewG in Tonstein

Die unter (b-1) skizzierten Eigenschaften eines guten Tonsteinstandortes ermöglichen die Einschätzung einer sehr guten Charakterisierbarkeit im Hinblick auf das Upscaling der gemessenen Diffusionskoeffizienten. Beispielweise zeigen die Ergebnisse der Nagra (2002) überdies nur geringe Schwankungen der Porendiffusionskoeffizienten selbst bei unterschiedlichen Tonsteininformationen. Diese Eigenschaften führen beim Tonsteinstandort zu der Einschätzung sehr guter Charakterisierbarkeit der Diffusivität im Hinblick auf die Standortverhältnisse.

Ergebnis: Das Vertrauen in die Charakterisierbarkeit der Diffusivität mit Blick auf den gesamten ewG und das darüber hinausgehende Wirtsgestein wird für Tonstein als sehr hoch bewertet (Bewertungsstufe 5).

(b-4) Ausdehnung des Wirtsgesteins Tonstein um das Endlagerbergwerk, für den die charakteristischen Eigenschaften der Sicherheitsfunktion des ewG gelten

Die oben unter (b-1) skizzierten Eigenschaften eines guten Tonsteinstandortes lassen darauf schließen, dass durch die Versuchsergebnisse ein vergleichsweise großer Bereich des Wirtsgesteins mit einheitlichen Merkmalen repräsentiert werden kann (upscaling). Insbesondere ist ein upscaling für den Teilbereich des ewG, der das Endlagerbergwerk umschließt, gut möglich. Insofern kann der Wirtsgesteinskörper hinsichtlich seiner Barrierenmächtigkeit, seiner flächenhaften Verbreitung und Teufe gut charakterisiert werden.

Ergebnis: Das Vertrauen in das upscaling mit Blick auf den gesamten ewG und den Teilbereich, der das Bergwerk enthält, wird für Tonstein als hoch bewertet (Bewertungsstufe 4).

(b-5) Sorptionseigenschaften des ewG in Tonstein

Die oben unter (b-1) skizzierten Eigenschaften eines guten Tonsteinstandortes lassen darauf schließen, dass von einer nur geringen Schwankung der Tonmineralzusammensetzung ausgegangen werden darf. Dies führt beim Tonsteinstandort zu der Einschätzung einer sehr guten Charakterisierbarkeit der Sorptionseigenschaften im ewG und im weiteren Wirtsgestein.

Ergebnis: Das Vertrauen in die Charakterisierbarkeit der Sorption mit Blick auf den gesamten ewG und das darüber hinausgehende Wirtsgestein wird für Tonstein als hoch bewertet (Bewertungsstufe 5).

E.2.3 Zusammenfassende Darstellung des Vertrauens in die Charakterisierung der RSF-Parameter des ewG im Ist-Zustand

In Tabelle E-2 sind die Ergebnisse der Kapitel E.2.1 und E.2.2 auf der Ebene der RSF-Parameter dargestellt. Insgesamt zeigt sich, dass das Vertrauen in die Charakterisierung des Ist-Zustandes der

RSF-Parameter Gebirgspermeabilität, Porosität, Diffusivität und deren Ausdehnung im ewG bei steil- und flachlagerndem Salz insgesamt als hoch angesehen werden muss. Deutliche Unterschiede zeigen sich beim Upscaling. Hier sind flachlagernde Salze wegen ihrer weniger komplexen Internstruktur besser zu charakterisieren als steil lagernde Salzvorkommen. Hinsichtlich der RSF-Parameter, die die Sicherheitsfunktion „Begrenzung/Verhinderung von Lösungsbewegung und Radionuklidtransport“ beschreiben, ist wegen des besseren upscalings ein Vorteil für flach lagernde Salze feststellbar.

Bei Tonstein ist die Bewertung bei einfachen Lagerungsverhältnissen hinsichtlich des Upscalings als sehr gut und für die Charakterisierbarkeit als gut zu bezeichnen. Außerdem ist die Sicherheitsfunktion „Verzögerung der Radionuklidausbreitung durch Sorption“ hinsichtlich ihrer Charakterisierbarkeit mit mäßig zu bewerten und hinsichtlich des Upscalings mit gut. Die mäßige Bewertung beruht auf den Unsicherheiten bei der Erhaltung der geochemischen in situ Bedingungen während der Probenahme und im Labor.

Aggregiert man die Ergebnisse von Tab. 2 auf von den RSF-Parametern die Ebene der Sicherheitsfunktionen und führt dabei auch noch die Charakterisierbarkeit und des upscalings zusammen, dann erhält man in Tab. 3 Aussagen über die Charakterisierung der Sicherheitsfunktionen im Ist-Zustand. Maßgeblich für die Aggregation sind immer die schlechteren Bewertungen.

Ihrer hinsichtlich der **Sicherheitsfunktion „Begrenzung/Verhinderung von Lösungsbewegung und Radionuklidtransport“** für steillagerndes Salz (Salzstöcke) insgesamt als hoch einzuschätzen ist, und für flachlagerndes Salz als sehr hoch. Für Tonstein ergibt sich für diese Sicherheitsfunktion ein hohes Vertrauen.

Hinsichtlich der Sicherheitsfunktion **„Verzögerung der Radionuklidausbreitung durch Sorption“** kann für Tonstein nur ein mittleres Vertrauen bei der Charakterisierung im Ist-Zustand festgestellt werden, da die Bestimmung von Kd-Werten mit Fehlerquellen behaftet ist. Für Salz wurde diese Sicherheitsfunktion nicht bewertet.

Komponente ewG RSF-Parameter	Lagerung in Salz TE + TM				Lagerung in Tonstein TE + TM	
	Charakterisierbarkeit		Upscaling		Charakterisierbarkeit	Upscaling
	steil	flach	steil	flach		
Ermittlung der Gebirgspermeabilität des ewG	5	5	4	5	5	5
Ermittlung der Porosität des ewG	4	4	4	5	5	5
Ermittlung der Diffusivität des ewG	4	4	4	5	5	5
Ermittlung der Ausdehnung des Wirtsgesteins um das Endlagerbergwerk, für die die charakteristischen Eigenschaften der Sicherheitsfunktion gelten	4	4	4	4	4	5
Ermittlung der Sorptionseigenschaften des ewG	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	3	5

Tab. E-2: Darstellung des Vertrauens in die Charakterisierung des Ist-Zustandes der RSF-Parameter des ewG (Bewertungsstufen von 5 sehr hohes bis 1 sehr geringes/vernachlässigbares Vertrauen; n.b. = nicht bewertet)

Vertrauen in die Bewertung der Charakterisierbarkeit des ewG für den Ist-Zustand				
Komponente ewG	RSF-Parameter	Salz		Tonstein
Sicherheitsfunktionen		Steile Lagerung	Flache Lagerung	
Begrenzung/Verhinderung von Lösungsbewegungen und Radionuklidtransport	Ermittlung der Gebirgspermeabilität des ewG	4	5	5
	Ermittlung der Porosität des ewG			
	Ermittlung der Diffusivität des ewG			
	Ermittlung der Ausdehnung des Wirtsgesteins um das Endlagerbergwerk, für die die charakteristischen Eigenschaften der Sicherheitsfunktion gelten	4	4	5
Verzögerung des Radionuklidtransportes durch Sorption	Ermittlung der Sorptionseigenschaften des ewG	n.b.	n.b.	3

Tab. E-3: Aggregation des Vertrauens in die Charakterisierung des Ist-Zustandes des ewG auf der Ebene der Sicherheitsfunktionen (Bewertung: 5: sehr hohes Vertrauen bis 1 sehr geringes/vernachlässigbares Vertrauen; n.b. = nicht bewertet)

E.3 Auswirkungen systembedingter interner und klimabedingter externer Einflüsse auf die RSF-Parameter des ewG

In diesem Kapitel geht es vorrangig um die Systemrobustheit, d.h. die Unempfindlichkeit des Endlagersystems gegenüber veränderten Randbedingungen, die sich aus der Standortentwicklung ergeben können. Veränderte Randbedingungen können dazu führen, dass sich sicherheitsrelevante (RSF-)Parameterwerte verändern. Eine hohe Systemrobustheit ist dann gegeben, wenn die Änderung des Parameterwertes gering ist oder zur „sicheren Seite“ hin erfolgt, d.h. wenn sich die Änderung des Parameterwertes auf die Radionuklidrückhaltung innerhalb der betrachteten Endlagerkomponente positiv auswirkt. Umgekehrte Änderungen der RSF-Parameter sprechen für eine geringe Systemrobustheit.

Zu diesen internen Einflüssen zählen vor allem die Gas- und Wärmeentwicklung bei End- bzw. Tiefenlagerung, die Veränderungen der RSF-Parameter der Sicherheitsfunktionen der Systemkomponente Behälter mit sich bringen können. Das Ausmaß dieser Veränderungen ist ein Indikator für die jeweilige Systemrobustheit. **Systemrobustheit bedeutet somit die Unempfindlichkeit des Endlagersystems gegenüber veränderten Randbedingungen, die sich aus der inneren und äußeren Standortentwicklung ergeben können** (z.B. Reaktionen auf Gasbildung oder auf Eisüberföhrung).

Dabei wird die Systemrobustheit reziprok, d.h. als Ausmaß der einwirkungsbedingten Veränderung des Parameterwertes, bewertet. Eine hohe Systemrobustheit ist dann gegeben, wenn die Änderung des Parameterwertes gering ist oder zur „sicheren Seite“ hin erfolgt, d.h. die Änderung des Parameterwertes sich auf die Radionuklidrückhaltung innerhalb der betrachteten Endlagerkomponente „Versatz“ positiv auswirkt. Umgekehrt gilt das Gleiche. Entsprechend ist eine hohe bzw. sehr hohe Systemrobustheit gegeben, wenn die einwirkungsbedingten Veränderungen des Parameterwertes klein (Bewertungsstufe 2) oder sehr klein/vernachlässigbar (Bewertungsstufe 1) sind.

Es werden für Lagerung in Salz bzw. Tonstein zwei Zeiträume betrachtet: $t < 10.000$ Jahre und $t \geq 10.000$ Jahre. Für den Zeitraum < 10.000 a werden die systeminternen Einflüsse von Wärme und Gasbildung betrachtet, für $t \geq 10.000$ a werden die Auswirkungen externer kaltzeitlicher Einflüsse (v.a. glaziale Rinnenbildung) auf die RSF-Parameter bzw. die diesen übergeordneten Sicherheitsfunktionen bewertet. Dabei liegt auf der Hand, dass massive kaltzeitliche Wirkungen sehr wahrscheinlich erst im Verlaufe von 10^5 Jahren erfolgen.

Soweit sich sinnvolle Aussagen zur Robustheit für steilstehendes Salz (Salzstöcke) und/ oder flachlagerndes Salz ableiten lassen, wird dies geschehen. Gleiches gilt für Tiefenlagerung (einsöhliges Endlager) und Tiefenlagerung (zweisöhliges Endlager mit Monitoringstrecken und Rückholbarkeit).

E.3.1 Auswirkungen systembedingter interner und klimabedingter externer Einflüsse auf die RSF-Parameter des ewG bei Lagerung in Salz

E.3.1.1 Interne Auswirkungen auf die RSF-Parameter des ewG in Salz für $t < 10.000$ Jahre

Betrachtet wird der Einfluss der durch die Abfälle hervorgerufene Wärmeentwicklung sowie der durch Metallkorrosion bedingten Gasentwicklung innerhalb des ewG bzw. des Wirtsgesteinskörpers für den Zeitraum bis 10.000 Jahre für die RSF-Parameter. Da der genaue Ablauf des Vorganges endlager- und standortspezifisch ist, kann er wegen des generischen Ansatzes bei Entria nur auf einer allgemeinen Ebene abgehandelt werden.

Durch die Gasbildung kommt es zu einer Druckerhöhung im Porenraum des ewG (auch im Versatz) durch Fluide (Gas, Fluide). Dadurch werden die Konvergenzraten des ewG reduziert und es kann bei genügend Druckerhöhung zur Ausbildung von Sekundärpermeabilitäten kommen. Nach GRS (2010-5) muss Hydrofrac nicht unterstellt werden, und selbst bei Hydrofrac käme es zu keiner Erhöhung des Lösungstransportes.

Die in den folgenden Abschnitten abgeleiteten Aussagen und Bewertungen sind naturgemäß unter der Bedingung zu betrachten, dass sie von standortspezifischen und konzeptspezifischen Einflüssen und Bedingungen abhängen. Lux et al. (2017) haben auf Grundlage der Referenzmodelle von Entria beispielhaft quantitative TH2M-basierte Simulationen für End- und Tiefenlager in Salz- und Tonstein durchgeführt, an denen die Komplexität der zusammenwirkenden Einflussgrößen auf die fluiddynamischen Prozesse erkennbar werden.

(a) Auswirkungen von Gas und Wärme auf die Gebirgspermeabilität des ewG bei Lagerung im Salz

Bei der Endlagerung liegt nach ENTRIA-AB-03 (2015) die Einlagerungssohle bei steiler Lagerung 800 m unter GOK, und die Salzmächtigkeit bis zum Hutgestein soll mindestens 200 m betragen. Damit verbleiben maximal 600 m Decksgebirgsmächtigkeit. Bei flacher Lagerung liegt die Einlagerungssohle 600 m unter GOK, und oberhalb der Einlagerungssohle soll noch mindestens 100 m Wirtsgestein vorhanden sein. Es verbleibt also eine maximale Deckgebirgsmächtigkeit von 450 m. Bei der Variante Tiefenlagerung mit Monitoring und Möglichkeit der Rückholbarkeit liegt die zusätzliche Monitoringsohle rund 40 m oberhalb der Einlagerungssohle.

Der **Gasdruck** im Endlager hängt einerseits von der Gasmenge der eingeschlossenen Luft und der durch Metallkorrosion produzierten Gase und andererseits von dem zur Verfügung stehenden Hohlraum ab, der durch Konvergenz verringert wird. Überschreitet der Fluid- bzw. der Gasdruck bei kleinen Druckanstiegsraten den Gebirgsdruck, dann kommt es nach (GRS 2012) zur Erhöhung der lokalen Permeabilität, jedoch nicht zu einer Rissbildung. Dies ist bedingt durch die elastische Aufweitung der Korngrenzen, d. h. der Vergrößerung des Porenvolumens ohne Zerstörung bzw. Schädigung der Kristallstruktur (Popp et al. 2007). Hierdurch kann Fluid in das Gestein eindringen. Die Permeabilität des Salzgesteins erhöht sich so lange, bis ein Gleichgewicht zwischen dem Druckanstieg und dem Infiltrationsprozess hergestellt ist. Sinkt der Fluid- bzw. Gasdruck anschließend wieder unterhalb des Gebirgsdruckes bzw. der minimalen Hauptspannung, kommt es zu einem Selbstverheilungsmechanismus und die ursprüngliche Permeabilität des ungestörten Salzgesteins kann wiederhergestellt werden (GRS 2012). Insgesamt ist der Einfluss der Gasproduktion auf die Permeabilität als gering zu bezeichnen. Das für diese Aussage erforderliche Prozessverständnis wird als ausreichend hoch angesehen.

Die mit der Einbringung wärmeentwickelnder Abfälle in ein Endlager verbundene **Temperaturerhöhung** des ewG beziehungsweise des Wirtsgesteins kann komplexe und nach Art, Intensität und Reichweite positive (z.B. beschleunigte Konvergenz mit rascherem Einschluss der Abfälle) und negative Auswirkungen (z.B. thermisch induzierte Sekundärpermeabilitäten) aufweisen.

Die temperaturbedingte Ausbildung eines Porennetzwerkes im Salzgestein innerhalb der Einlagerungsfelder kann deshalb nach GRS (2016) nicht grundsätzlich für ein Zweiphasensystem Salzlösung / Halit ausgeschlossen werden, wenn - unter Berücksichtigung der bekannter Unsicherheiten und der Aussagen zur Gültigkeit für natürliches Steinsalz - sowohl Druck als auch Temperatur im Übergangsbereich liegen und ausreichend Salzlösung vorhanden ist. Sobald eine Temperatur von 120 °C im umgebenden Salzgestein unterschritten wird, ist eine temperatur- oder druckbedingte Ausbildung eines Porennetzwerkes nicht zu erwarten.

Die zuletzt genannte mögliche Folge der Temperaturerhöhung hängt stark vom spezifischen Endlagerkonzept ab. Die damit zusammenhängenden kritischen Aspekte sind bekannt und werden diskutiert. Deshalb werden die Auswirkungen des Wärmeeintrags auf die Permeabilität des ewG hier nur unter dem Vorbehalt als gering bewertet, dass Ausbildung eines temperatur- und druckbedingten Porennetzwerkes durch statische Perkolation ausgeschlossen wird.

Berücksichtigt man die Anforderung Sicherheitsanforderungen des BMU (2010), die temperaturinduzierte Veränderungen im Nahfeld der Endlagerbehälter mit Auswirkungen auf den ewG ausschließen, so dass die Barrierewirkung des ewG nicht unzulässig beeinflusst werden darf, dann ist eine Bewertung der Wärmeeintrags auf den ewG als gering zu bewerten.

Ergebnis: Die Auswirkungen der Gasentwicklung auf die Gebirgspermeabilität des ewG in Steinsalz werden als gering bewertet (Bewertungsstufe 2). Denkbare Auswirkungen des Wärmeeintrags werden bei Erfüllung der genannten Anforderung ebenfalls als gering bewertet (Bewertungsstufe 2).

(b) Auswirkungen von Gas und Wärme auf die Porosität des ewG bei Lagerung im Salz

Permeabilität und Porosität stehen in einem engen funktionalen Zusammenhang. Betrachtet man vor diesem Hintergrund die potenziell möglichen Gasmengen, die durch Metallkorrosion zusätzlich entstehen, dann sind nach GRS (2010-5) alleine schon wegen des geringen Lösungsangebotes die Gasmengen begrenzt. Deshalb führt die Gasdruckentwicklung nicht zu einer dauerhaften Vergrößerung der Porosität des ewG (s. dazu auch oben Punkt (a) Permeabilität). Das für diese Aussage erforderliche Prozessverständnis wird als ausreichend hoch angesehen.

Der Einfluss der Wärmeproduktion in den Einlagerungsfeldern auf die Porosität des ewG wird bei Einhaltung der Anforderungen (BMU 2010) als gering bewertet.

Ergebnis: Die Auswirkungen der Gasentwicklung auf die Porosität des ewG in Steinsalz werden als sehr gering bewertet (Bewertungsstufe 1). Denkbare Auswirkungen des Wärmeeintrags werden als gering bewertet (Bewertungsstufe 2).

(c) Auswirkungen von Gas und Wärme auf die Diffusivität des ewG bei Lagerung im Salz

Nach GRS (2010-5) sind die potenziell möglichen Gasmengen aufgrund des geringen Lösungsangebotes so klein, dass die Gasdruckentwicklung keinen Einfluss auf die Diffusivität des ewG ausübt. Das für diese Aussage erforderliche Prozessverständnis wird als ausreichend hoch angesehen.

Ergebnis: Die Auswirkungen der Gasentwicklung auf die Diffusivität des ewG werden als sehr gering bewertet (Bewertungsstufe 5). Denkbare Auswirkungen des Wärmeeintrages werden gleichfalls als sehr gering bewertet (Bewertungsstufe 1).

(d) Räumliche Erstreckung des Wirtsgesteins um das End- bzw. Tiefenlagerbergwerk, für das die charakteristischen Eigenschaften der Sicherheitsfunktionen des ewG gelten

Die Gasdruckentwicklung und die Wärmeproduktion haben keinen Einfluss auf die Ausdehnung des Wirtsgesteins um das Endlagerbergwerk, für die die charakteristischen Eigenschaften der Sicherheitsfunktionen gelten. Das für diese Aussage erforderliche Prozessverständnis wird als ausreichend hoch angesehen. Die Auswirkungen der Systementwicklungen werden als sehr gering eingestuft.

Ergebnis: Gasdruckentwicklung und Wärmeproduktion beeinflussen nicht den Wirtsgesteinsbereich um das Bergwerk, für den die charakteristischen Eigenschaften des ewG gelten sollen. Die Auswirkungen werden als sehr gering bewertet (Bewertungsstufe 1).

FAZIT:

Insgesamt werden die Auswirkungen der Systementwicklungen Gas und Wärme auf die RSF-Parameter des ewG bei Lagerung in Steinsalz für den Zeitraum < 10.000 Jahre als gering bzw. sehr gering bewertet. Daraus ergibt sich eine hohe Systemrobustheit. Diese Bewertung steht unter der Voraussetzung, dass die standort- und konzeptspezifischen Merkmale optimal aufeinander abgestimmt sind und die entsprechenden Anforderungen in BMU (2010) erfüllt werden.

Die Bewertungen der Auswirkungen gelten sowohl für Salz in steiler Lagerung als auch für flachlagernde Salzvorkommen. Eine Differenzierung nach Tiefenlagerung mit sofortigem Verschluss (Endlagerung) und Tiefenlagerung mit Vorkehrung zu Monitoring und Rückholung der Abfälle ist nicht möglich.

In der folgenden Tab. E-4 werden die Auswirkungen der internen Systemeinträge Gas und Wärme auf die RSF-Parameter von Salz für den Zeitraum $t < 10.000$ Jahre zusammenfassend bewertet.

KOMPONENTE ewG	Salz (steilstehend und flachlagernd) TE + TM Für Wirkzeiträum t < 10.000 a	
RSF-Parameter	interne Systemauswirkung	Bewertung
Gebirgspermeabilität	Gasdruck	2
	Wärme	2
Porosität	Gasdruck	1
	Wärme	2
Diffusivität	Gasdruck	1
	Wärme	1
Ermittlung der Ausdehnung des Wirtsgesteins um das Endlager- bergwerk, für die die charakteristi- schen Eigenschaften der Sicherheits- funktion gelten	Gasdruck	1
	Wärme	1
Sorption		n.b.

Tab. E-4: Bewertung der internen Auswirkungen von Gasdruck und Wärme auf die RSF-Parameter des ewG bei Lagerung in Salz (steil u. flach) für t < 10.000 Jahre (TE: Endlager, TM: Tiefenlager mit Monitoring und Möglichkeit der Rückholbarkeit; Bewertung: 5: sehr hohe Auswirkungen bis 1 sehr geringe/vernachlässigbare Auswirkungen; n.b. = nicht bewertet).

E.3.1.2 Externe Auswirkungen auf die RSF-Parameter des ewG in Salz für t ≥ 10.000 Jahre

Für den gesamten Nachweiszeitraum von 10.000 Jahren bis 1 Mio. Jahre sind verschiedenste Systementwicklungen denkbar. Viele davon werden durch ein gutes Standortauswahlverfahren mit hoher Wahrscheinlichkeit vermieden (z.B. aktive Störungszonen, starke Erdbeben, große Hebungsraten). Was bei der geographischen Lage Deutschlands nicht vermieden werden kann sind Klimaänderungen, in deren Folge erhebliche Auswirkungen auf End- bzw. Tiefenlager möglich sind.

Nach heutigem Kenntnisstand kommt dabei Kaltzeiten die größte Bedeutung zu, wobei speziell Eisüberfahrungen mit zugehörigen Begleiterscheinungen (z.B. tiefe Rinnenbildung) von besonderem Interesse sind.

Die denkbaren End- bzw. Tiefenlagerstandorte in Deutschland liegen überwiegend in Norddeutschland (Salzstöcke und flachlagerndes Salz, Tonstein, s. Abb. E-1 u. E-2). Hinzu kommt ein begrenztes Vorkommen von Opalinuston in Süddeutschland (s. Abb. E-1). Für diese Gebiete sind die potenziellen Auswirkungen einer massiven Kaltzeit flächen- und gesteinspezifisch aus der Literatur zusammengetragen worden (Arbeitsbericht C 2016). Im Ergebnis zeigt sich:

- In Norddeutschland führt eine **kaltzeitliche tiefe Rinnenbildung mit Eisüberfahung** nach heutigem Kenntnisstand zu den stärksten Auswirkungen auf End- bzw. Tiefenlager in **Salzstöcken** und **Tonsteinformationen des mittleren Doggers und der Unterkreide**.
- Für die Tiefenlagerung in Frage kommenden **flachlagernden Salzformationen in Norddeutschland** ist eine **Eisüberfahung** mit zugehörigen Begleiterscheinungen sowie eine kryogene Rissbildung nicht auszuschließen. Da eine tiefe Rinnenbildung in den entsprechenden Gebieten nicht stattgefunden hat, ist eine **zukünftige Rinnenbildung dort mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit auszuschließen**.
- Für den **Opalinuston in Süddeutschland** kann eine randliche Eisüberfahung mit zugehörigen Begleiterscheinungen (v.a. übertiefte Tröge) nicht mit letzter Sicherheit ausgeschlossen werden.

Die stärksten potenziellen Auswirkungen betreffen diejenigen Wirtsgesteinsformationen in Norddeutschland (Salzstöcke des Zechsteins, flachlagernde Tonsteinformationen), die in Gebieten liegen, die in der Vergangenheit eine tiefgehende Rinnenbildung erfahren haben (s. Abb. E-3). Bei diesen muss davon ausgegangen werden, dass sie zukünftig von einer tiefen Rinnenbildung betroffen werden können.

Die flachlagernden Salzformationen in Norddeutschland (Zechstein und oberer Malm) und die Tonsteinformation (Opalinuston) in Süddeutschland sind in der Vergangenheit nicht von tiefer quartärzeitlicher Rinnenbildung betroffen worden. Deshalb wird davon ausgegangen, dass dies auch bei der nächsten Kaltzeit nicht der Fall sein wird.

Beispielhaft ausgewählt werden deshalb zur Ermittlung eventueller Robustheitsdefizite ein fiktiver Salzstandort (Salzstock) und ein fiktiver Tonsteinstandort in Norddeutschland. Beide Standorte liegen im Gebiet mit tiefer Rinnenbildung. Die Einwirkungen einer zukünftigen tiefen Rinnenbildung auf End- bzw. Tiefenlager führen mit großer Wahrscheinlichkeit zu den stärksten Auswirkungen auf die Lagersysteme.

Bei den in Norddeutschland verbreiteten Rinnen handelt es sich um tief ins Deckgebirge eingeschnittene Erosionsstrukturen, die nach Sedimentausträumung häufig mit überwiegend sandig-kiesigen Sedimenten gefüllt werden. Die Rinnen stellen heute oft ergiebige Grundwasserleiter dar. Der Prozess der Rinnenbildung hat seine Ursache darin, dass unter hohem Druck stehende Schmelzwässer durch Spalten im Eis an die Sohle des Gletschers gelangen und dort abfließen, wobei sie tiefe rinnenartige Erosionsstrukturen im Untergrund erzeugen. Die Ausmaße der in der Elstereiszeit entstandenen Rinnen im Norddeutschen Raum schwanken in ihrer Breite von wenigen Metern bis einigen Kilometern. Ihre Längserstreckung kann viele zehner Kilometer betragen, und sie verlaufen überwiegend SSW-NNE bis SW-NE. Sie können nachweislich eine Tiefe von 500 m und mehr (bisher bekannte maximale Tiefe 584 m) in Norddeutschland erreichen (nähere Einzelheiten s. Arbeitsbericht C 2016).

Lage, Verlauf und Tiefe zukünftiger Rinnen können nicht vorhergesagt werden. Deswegen werden im Folgenden zwei Fälle angenommen, die Grundlage für die Ermittlung der Auswirkungen der Rinnenbildung auf die RSF-Parameter bzw. rückhaltenden Sicherheitsfunktionen des ewG sind:

- (A) Rinnentiefe 350 m,
- (B) Rinnentiefe 450 m.
- Zudem wird im Bereich der Rinnenbildung eine Eismächtigkeit von rund 700 m angenommen.

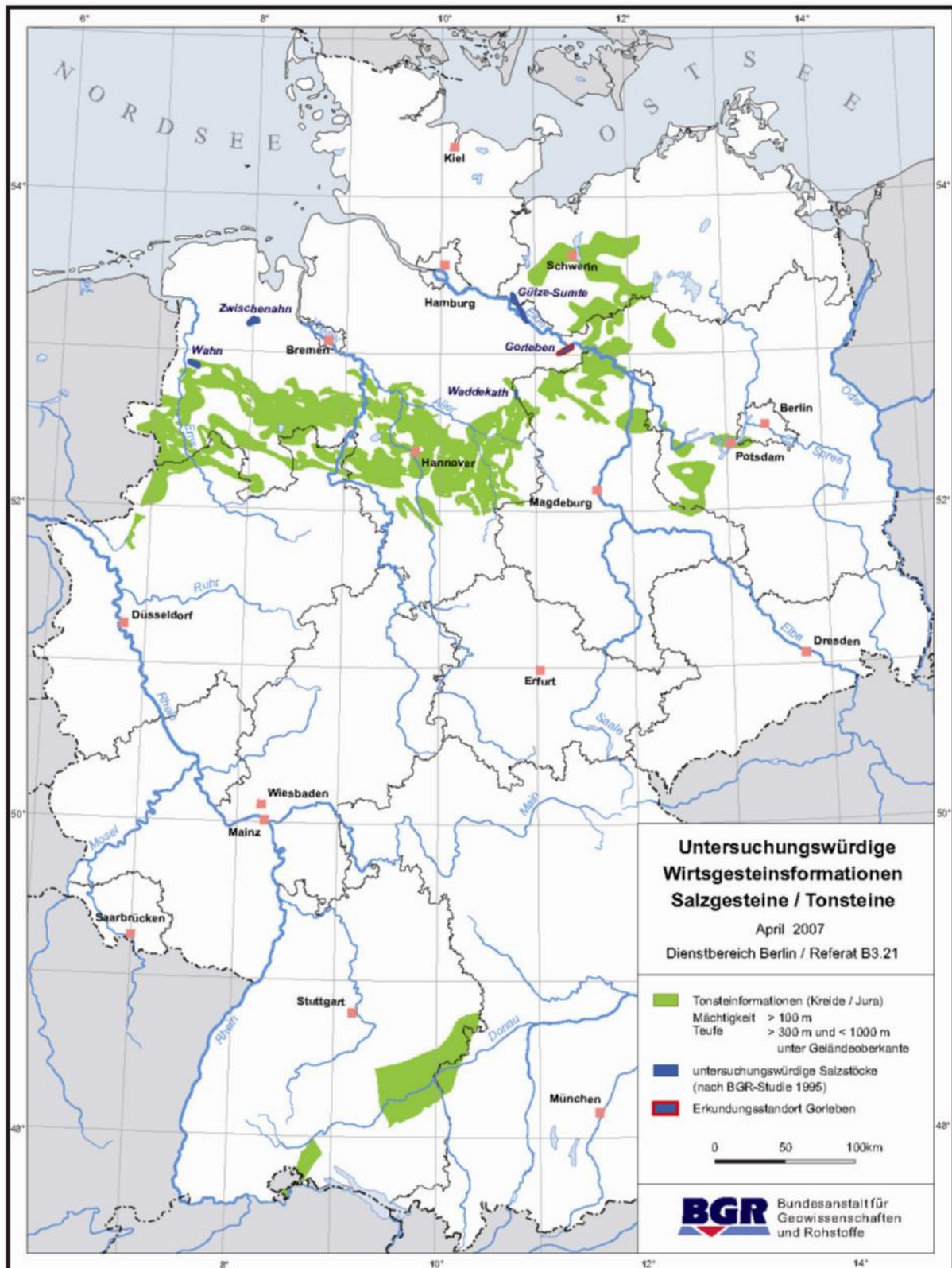


Abb. E-1: Untersuchungswürdige Wirtsgesteinsinformationen Salzgesteine/Tonsteine unter Berücksichtigung von Kriterien des Akend (Quelle: BGR 2007)

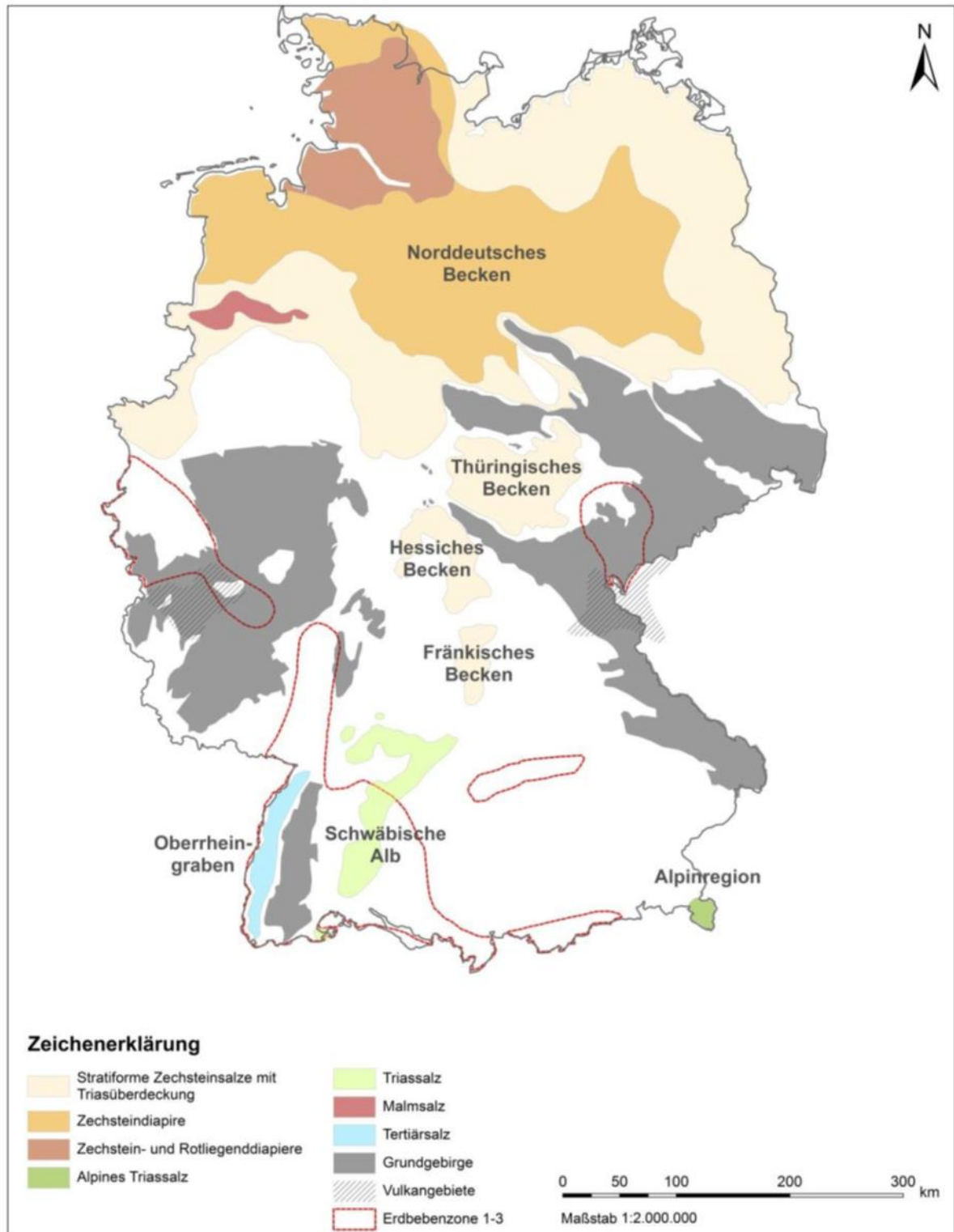


Abb. E-2: Verbreitungsgrenzen salinarer Formationen in Deutschland nach BGR 2011, ergänzt durch Angaben zu Erdbebenzonen und Vulkanregionen mit Gefährdungspotenzial (Quelle: Schreiber, U., Ewert, T., Jentzsch, G. (2015))

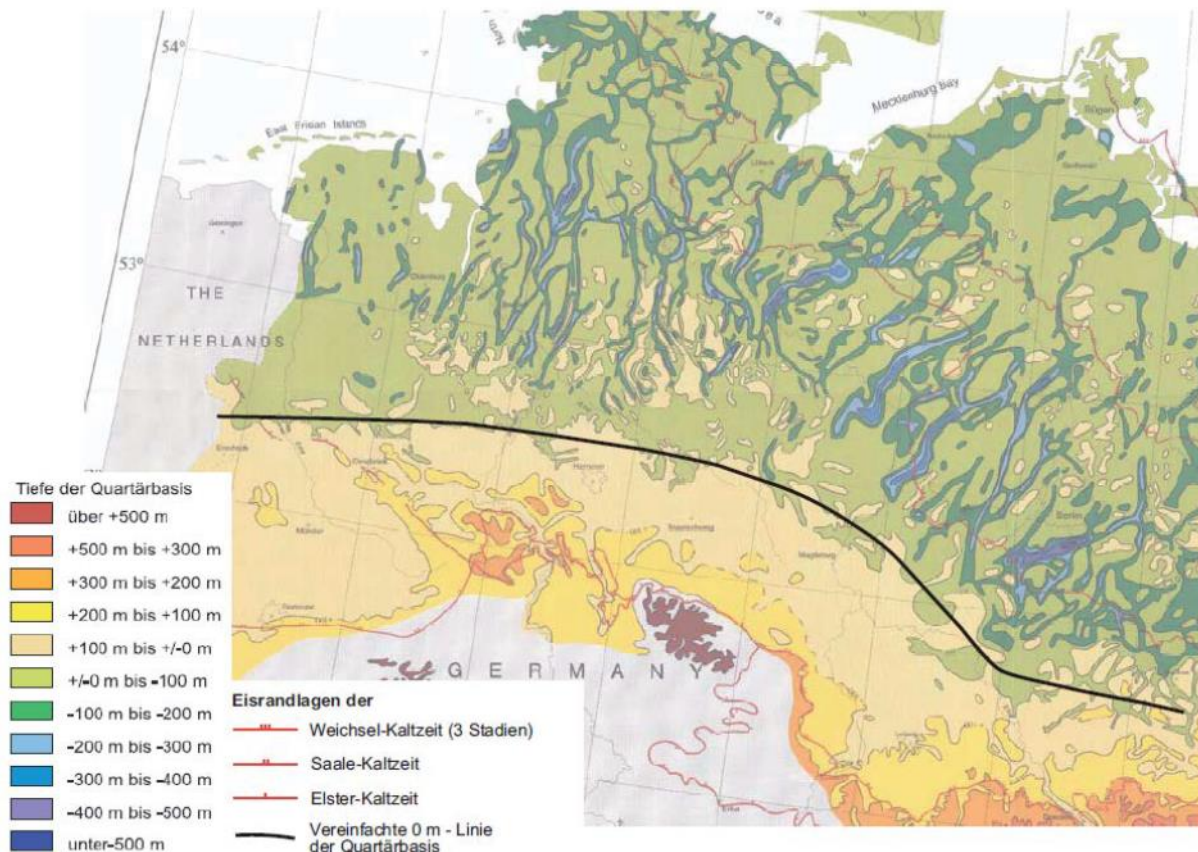


Abb. E-3: Glaziale Rinnenbildungen und Eisrandlagen in Norddeutschland. Die 0 m – Linie grenzt ungefähr den Senkungsbereich (300 – 1.000 m) des gesamten Gebietes nördlich der Linie und denhebungsbereich (300 m) des Gebietes südlich der Linie während der letzten ca. 30 Mio Jahren ab (Quelle: Stakebrandt et al. 2001)

Weitere Randbedingungen sind nach ENTRIA-AB-03 (2015):

- Lage der Einlagerungssohle bei **Salz in steiler Lagerung** 800 m unter GOK, und die Salz-mächtigkeit bis zum Hutgestein soll mindestens 200 m betragen. Damit verbleiben maximal 600 m Decksgebirgsmächtigkeit,
- Lage der Einlagerungssohle bei **Salz in flacher Lagerung** 600 m unter GOK, und die Salz-mächtigkeit über der Einlagerungssohle soll mindestens 100 m betragen. Damit verbleiben maximal 500 m Decksgebirgsmächtigkeit,
- Lage der Einlagerungssohle bei **Tonstein** 600 m unter GOK, wobei mindestens 50 m Tonsteinüberdeckung über dem Einlagerungsbereich gewährleistet wird,
- Bei der Option Tiefenlagerung mit Monitoring und Möglichkeit der Rückholbarkeit liegt die zusätzliche Monitoringsohle jeweils rund 40 m oberhalb der Einlagerungssohle.

Diese Randbedingungen werden den folgenden Überlegungen zugrunde gelegt.

Salz in steiler Lage - 350 m tiefe Rinnebildung

(a-1) Steile Lagerung in Salz: Auswirkungen der Rinnenbildung auf die Gebirgspermeabilität des ewG bei Lagerung im Salz

Oberhalb des ewG liegen 700 m Deckgebirge einschließlich mindestens 100 m nicht zum ewG gehörendes Wirtsgestein. Selbst bei Annahme einer Erosion von 350 m verbleiben noch weiter 250 m Deckgebirge plus 100 m nicht zum ewG gehörendes Wirtsgestein.

Setzt man ein nur ca. 350 m mächtiges Deckgebirge an, wie es häufig in Norddeutschland anzutreffen ist, dann verbleiben nach Erosion des Deckgebirges noch rund 350 m Wirtsgestein oberhalb des ewG. Unter Einbeziehung des ewG sind es sogar 450 m verbleibende Gesteinssäule.

Diese Gesteinsschichten können einen großen Teil der (zusätzlichen) Auflast von 700 m Inlandeis auf den ewG durch die Kompression ihres Korngerüstes aufnehmen. Als Folge der Änderung der als Auflast auf das Endlager einwirkenden Spannungssäule resultiert ein veränderter, kompressiver Spannungszustand, der zu mechanischen Verformungen im Wirtsgestein führen kann. Dieser Prozess hängt vor allem von der Be- und Entlastungsrate sowie dem aus der Änderung der Auflast resultierenden Spannungsdeviator ab. Es ist nicht zu erwarten, dass aus diesen Spannungsänderungen Einwirkungen auf den ewG resultieren (Goulder & IfG 2011). Hinsichtlich verbleibender Lastauswirkungen auf den ewG wird von GRS (2010-5) davon ausgegangen, dass infolge der plastischen Eigenschaften des Steinsalzes keine Änderungen des Porenraums im Bereich des ewG hervorgerufen werden.

Ähnliches gilt bei der Erosion des Deckgebirges. In diesem Fall wird zwar das Gestein unterhalb der Gletschersohle bzw. Gletscherfront erodiert, gleichzeitig kompensiert die Eisauflast zumindest teilweise die fehlende Auflast des erodierten Gesteins. Oftmals wird das erodierte Gestein zumindest teilweise durch anderes Gestein zeitnah ersetzt.

Die Ereignisse haben somit keinen entscheidenden Einfluss auf die Gebirgspermeabilität des ewG. Das für diese Aussage erforderliche Prozessverständnis wird als ausreichend hoch angesehen.

Ergebnis: Die Auswirkungen der Rinnenbildung auf die Gebirgspermeabilität des ewG werden als sehr gering eingestuft (Bewertungsstufe 1).

(b-1) Steile Lagerung im Salz: Auswirkungen der Rinnenbildung auf die Porosität des ewG bei Lagerung im Salz

Die Aussagen zu den Auswirkungen auf die Gebirgspermeabilität des ewG (s. (a)) gelten analog für die Porosität. Auch hier wird die Schutzwirkung des weiteren Wirtsgesteins oberhalb des ewG und im Deckgebirge als sehr hoch angesehen.

Ergebnis: Die Auswirkungen der Rinnenbildung auf die Porosität des ewG werden als sehr gering eingestuft (Bewertungsstufe 1).

(c-1) Steile Lagerung im Salz: Auswirkungen der Rinnenbildung auf die Diffusivität des ewG bei Lagerung im Salz

Da das Ereignis keinen Einfluss auf die Lösungsporosität ausübt (s. (b)), wird ein Einfluss auf die Diffusivität (Porendiffusionskoeffizienten) des ewG sicher ausgeschlossen.

Ergebnis: Die Auswirkungen der Rinnenbildung auf die Diffusivität des ewG werden als sehr gering eingestuft (Bewertungsstufe 1).

(d-1) Steile Lagerung im Salz: Auswirkungen auf die räumliche Erstreckung des Wirtsgesteins um das End- bzw. Tiefenlagerbergwerk, für die die charakteristischen Eigenschaften der Sicherheitsfunktionen des ewG gelten

Eisüberföhrung und insbesondere eine Rinnenbildung von 350 m Tiefe haben keinen Einfluss auf die räumliche Ausdehnung des Wirtsgesteins um das Endlagerbergwerk, für die die charakteristischen Eigenschaften der Sicherheitsfunktion gelten. Es verbleiben noch weiter 250 m Deckgebirge plus 100 m nicht zum ewG gehörendes Wirtsgestein sowie 100 m eigentlicher ewG.

Ergebnis: Die Auswirkungen der Rinnenbildung auf die charakteristischen Eigenschaften der Sicherheitsfunktionen des ewG über die räumliche Erstreckung des Wirtsgesteins um das End- bzw. Tiefenlagerbergwerk hinaus werden als sehr gering eingestuft (Bewertungsstufe 1).

Salz in steiler Lage - 450 m tiefe Rinne:

(a-2) Steile Lagerung in Salz: Auswirkungen der Rinnenbildung auf die Gebirgspermeabilität des ewG bei Lagerung im Salz

Auch bei dieser Rinnentiefe gelten die oben unter (a-1, Fall Rinnentiefe 350 m) gemachten Aussagen analog. Es verbleiben vom Deckgebirge noch 150 m plus 100 m restliches Wirtsgestein plus 100 m ewG, also insgesamt eine Gesteinssäule von rechnerisch 350 m. Eine Erosion des Wirtsgesteins findet nicht statt.

Selbst bei Ansatz eines nur ca.350 m mächtigen Deckgebirges verbleiben nach Erosion des Deckgebirges noch rund 250 m Wirtsgestein oberhalb des ewG. Unter Einbeziehung der Mächtigkeit des ewG sind es sogar 350 m. Da hier die oberen 100 m des Wirtsgesteins erodiert worden sind, stellt sich die Frage, inwieweit sich die Subrosion, speziell die vorausseilende Subrosion bestimmter leichter löslicherer Kalisalze hier bemerkbar machen kann. Die Beantwortung dieser Frage ist jedoch nur standortspezifisch möglich. Sie wird hier durch eine etwas stärkere Bewertung der Auswirkung berücksichtigt.

Die weiteren Aussagen zur Aufnahme mechanischer Belastungen durch mächtige Gletscher können (a-1, Fall Rinnentiefe 350 m) entnommen werden; sie gelten auch in diesem Fall.

Ergebnis: Die Auswirkungen der Rinnenbildung auf die Gebirgspermeabilität des ewG werden als gering eingestuft (Bewertungsstufe 2).

(b-2) Steile Lagerung im Salz: Auswirkungen der Rinnenbildung auf die Porosität des ewG bei Lagerung im Salz

Es gelten die Aussagen in (b-1, Fall Rinnentiefe 350 m) analog.

Ergebnis: Die Auswirkungen der Rinnenbildung auf die Porosität des ewG werden als gering eingestuft (Bewertungsstufe 2).

(c-2) Steile Lagerung im Salz: Auswirkungen der Rinnenbildung auf die Diffusivität des ewG bei Lagerung im Salz

Es gelten die Aussagen in (c-1), Fall Rinnentiefe 350 m) analog.

Ergebnis: Die Auswirkungen der Rinnenbildung auf die Diffusivität des ewG werden als gering eingestuft (Bewertungsstufe 2).

(d-2) Auswirkungen auf die räumliche Erstreckung des Wirtsgesteins um das End- bzw. Tiefenlagerbergwerk, für die die charakteristischen Eigenschaften der Sicherheitsfunktionen des ewG gelten

Eisüberfahung und insbesondere eine Rinnenbildung von 450 m Tiefe haben nur einen geringen Einfluss auf die räumliche Ausdehnung des Wirtsgesteins um das Endlagerbergwerk, für die die charakteristischen Eigenschaften der Sicherheitsfunktion gelten. Es verbleiben noch weiter 150 m Deckgebirge plus 100 m nicht zum ewG gehörendes Wirtsgestein sowie 100 m eigentlicher ewG.

Ergebnis: Die Auswirkungen der Rinnenbildung auf die charakteristischen Eigenschaften der Sicherheitsfunktionen des ewG über die räumliche Erstreckung des Wirtsgesteins um das End- bzw. Tiefenlagerbergwerk hinaus werden als sehr gering eingestuft (Bewertungsstufe 1).

Salz in flacher Lagerung

Die nach BGR (2014) in Deutschland für die End- bzw. Tiefenlagerung potenziell in Frage kommenden Salzvorkommen in flacher Lagerung beschränken sich auf einzelne Bereiche (z.B. Zechsteinsalz im Werra-Fulda-Becken, im Thüringischen Becken oder im Niederrhein-Gebiet sowie - nachgeordnet - flachlagerndes Salz des Oberen Jura(Malm) im westlichen Niedersachsen). Alle Bereiche sind gekennzeichnet durch **Elster- und/oder saalezeitliche Eisüberfahrungen** und das **Fehlen tiefer Rinnenbildungen**.

Sonstige zu betrachtende glaziale Einflüsse (z.B. kryogen bzw. hydraulisch induzierte Rissbildung, Änderungen im Grundwasserregime, Auswirkungen tiefen Permafrosts) können nur auf standort-spezifischer Basis sinnvoll bewertet werden, und die Genese kryogener Rissbildungen sind auf Basis bisher vorliegender Erkenntnisse nicht eindeutig erklärbar (Goulder & IfG 2011).

Vor diesem Hintergrund wird nur die Eisüberfahung betrachtet, da auch zukünftig mit hoher Wahrscheinlichkeit von einer tiefen Rinnenbildung in Bereichen flacher Salzlagerung nicht auszugehen ist. Es wird wie bei Salz in steiler Lagerung angenommen, dass das Eis eine Mächtigkeit von 700 m aufweist. Dabei gelten die Randbedingungen nach ENTRIA-AB-03 (2015); vgl. in Kap. E.3.1.2.

(a-3) Flache Lagerung in Salz: Auswirkungen der Eisüberfahung auf die Gebirgspermeabilität des ewG

Bei einer Einlagerungssohle 600 m unter GOK, die mindestens von 100 m mächtigem Steinsalz plus 500 m mächtigen Deckgebirge überlagert wird, ergibt sich eine Situation, wie sie in (a-1) für die steile Lagerung beschrieben worden ist.

Die Gesteinsschichten des Deckgebirges können einen großen Teil der (zusätzlichen) Auflast von 700 m Inlandeis auf den ewG durch die Kompression ihres Korngerüstes aufnehmen. Als Folge der

Änderung der als Auflast auf das Endlager einwirkenden Spannungssäule resultiert ein veränderter, kompressiver Spannungszustand, der zu mechanischen Verformungen im Wirtsgestein führen kann. Dieser Prozess hängt vor allem von der Be- und Entlastungsrate sowie dem aus der Änderung der Auflast resultierenden Spannungsdeviator ab. Es ist nicht zu erwarten, dass aus diesen Spannungsänderungen Einwirkungen auf den ewG resultieren (Goulder & IfG 2011).

Generell stellt nach (Goulder & IfG 2011) eine mechanische Belastung infolge einer sich entwickelnden Eisauflast gegenüber einer Entlastung durch Gletscherrückzug den weniger kritischen Zustand dar, weil mit Erhöhung der mittleren Grundspannung das Potenzial für eine Rissbildung geringer wird, vorausgesetzt, die Einlagerungshohlräume eines Endlagers sind hinreichend stand-sicher dimensioniert bzw. verfüllt.

Hinsichtlich verbleibender Lastauswirkungen auf den ewG wird in GRS (2015-5) davon ausgegangen, dass infolge der plastischen Eigenschaften des Steinsalzes keine Änderungen des Porenraums im Bereich des ewG hervorgerufen werden.

Im Ergebnis ist damit zu rechnen, dass die Auswirkungen der Eisüberfahung auf die Gebirgspermeabilität sehr gering sein werden.

Ergebnis: Die Auswirkungen der Eisüberfahung auf die Gebirgspermeabilität des ewG werden bei flacher Salzlagerung als sehr gering eingestuft (Bewertungsstufe 1).

(b-3) Flache Lagerung in Salz: Auswirkungen der Eisüberfahung auf die Porosität des ewG

Es gelten die Aussagen in (b-2) analog.

Ergebnis: Die Auswirkungen der Eisüberfahung auf die Porosität des ewG werden als sehr gering eingestuft (Bewertungsstufe 1).

(c-3) Flache Lagerung im Salz: Auswirkungen der Eisüberfahung auf die Diffusivität des ewG

Es gelten die Aussagen in (c-2) analog.

Ergebnis: Die Auswirkungen der Eisüberfahung auf die Diffusivität des ewG werden als sehr gering eingestuft (Bewertungsstufe 1).

(d-3) Flache Lagerung im Salz: Auswirkungen auf die räumliche Erstreckung des Wirtsgesteins um das End- bzw. Tiefenlagerbergwerk, für die die charakteristischen Eigenschaften der Sicherheitsfunktionen des ewG gelten

Die Eisüberfahung hat nur einen sehr geringen Einfluss auf die Ausdehnung des Wirtsgesteins um das Endlagerbergwerk, für die die charakteristischen Eigenschaften der Sicherheitsfunktionen gelten. Es verbleiben noch weiter 500 m Deckgebirge plus ca. 100 m Wirtsgestein oberhalb der Einlagerungssohle (ein Teil des Wirtsgesteins gehört zum ewG).

Ergebnis: Die Auswirkungen der Eisüberfahung auf die charakteristischen Eigenschaften der Sicherheitsfunktionen des ewG über die räumliche Erstreckung des Wirtsgesteins

um das End- bzw. Tiefenlagerbergwerk hinaus werden bei flacher Salzlagerung als sehr gering eingestuft (Bewertungsstufe 1).

In der folgenden Tab. E-5 werden die Einwirkungen der externen Systemauswirkungen Eisüberfahung und tiefe Rinnenbildung auf die RSF-Parameter von Salz sowie ihre Bewertungen für den Zeitraum $t \geq 10.000$ Jahre zusammenfassend dargestellt.

KOMPONENTE ewG	Salz Steil stehend und flachlagernd TE + TM			
	Externe Systemauswirkung für $t \geq 10.000$ a Tiefe Rinnenbildung für Salzstock und reine Eis- überfahung für Salz flachlagernd Bewertung			
RSF-Parameter		Rinne 350 m tief	Rinne 450 m tief	Nur Eis- überfah- rung
Gebirgspermeabilität	Salzstock	1	2	
	Salz flachlagernd			1
Porosität	Salzstock	1	2	
	Salz flachlagernd			1
Diffusivität	Salzstock	1	2	
	Salz flachlagernd			1
Ermittlung der Ausdehnung des Wirtsgesteins um das Endlager- bergwerk, für die die charakteristi- schen Eigenschaften der Sicherheits- funktion gelten	Salzstock	1	2	
	Salz flachlagernd			1
Sorption		n.b.	n.b.	n.b.

Tab. E-5: Bewertung der externen Einwirkungen auf die RSF-Parameter des ewG für Lagerung in Salz (steil u. flach) für $t \geq 10.000$ Jahre (TE = Endlager, TM = Tiefenlager mit Monitoring u. Möglichkeit der Rückholbarkeit; Bewertung: 5 = sehr starke Einwirkung bis 1 = sehr geringe bis keine Einwirkung; n.b.: nicht bewertet).

E.3.2 Auswirkungen systembedingter interner sowie klimabedingter externer Einflüsse auf die RSF-Parameter des ewG bei Lagerung in Tonstein

E.3.2.1 Interne Auswirkungen auf die RSF-Parameter des ewG in Tonstein für $t < 10.000$ Jahre

Betrachtet wird der Einfluss der durch die Abfälle hervorgerufene Wärmeentwicklung sowie der durch Metallkorrosion (Abfallbehälter, ggf. Ausbaumaßnahmen) bedingten Gasentwicklung innerhalb des ewG bzw. des Wirtsgesteinskörpers für den Zeitraum bis 10.000 Jahre für die RSF-Parameter. Da der genaue Ablauf des Vorganges standort- und endlagerspezifisch ist, kann er wegen des generischen Ansatzes bei Entria nur auf einer allgemeinen Ebene abgehandelt werden.

Durch die Gasbildung kommt es zu einer Druckerhöhung im Porenraum des ewG durch Fluide (Gas, Fluide). Dadurch werden die Konvergenzraten des ewG reduziert und es kann bei genügend Druckerhöhung zur Ausbildung von Sekundärpermeabilitäten kommen. Nach GRS (2010-5) muss Hydrofrac nicht unterstellt werden, und selbst bei Hydrofrac käme es zu keiner Erhöhung des Lösungstransportes.

(a) Auswirkungen von Gas und Wärme auf die Gebirgspermeabilität des ewG bei Lagerung im Tonstein

Die durch die Gasbildung hervorgerufene Druckerhöhung ist so gering, dass keine nennenswerten Transportbewegungen zu unterstellen sind. Bei Überschreiten des Gaseindringdruckes wird Porenwasser verdrängt. Dabei findet der Gastransport und Gasfluss unter 2-Phasenbedingungen statt. Sollte ein kritischer Druck überschritten werden, bilden sich Sekundärpermeabilitäten aus. Sie ermöglichen den Gastransport auf Mikroklüften und tragen so zum Druckabbau bei.

Nach GRS (2010-5) kann ein Druckniveau ausgeschlossen werden, bei dem es zu einem Frac-Riss durch das Wirtsgestein kommt und eine singuläre hohe Permeabilität für Lösungen unterstellt werden muss.

Insgesamt ist davon auszugehen, dass die **Gasdruckentwicklung** keinen erkennbaren Einfluss auf die Lösungspermeabilität im ewG ausübt. Auswirkungen der Gasdruckentwicklung auf die Gaspermeabilität können nach GRS (2010-5) jedoch nicht ausgeschlossen werden. Sie werden jedoch im Hinblick auf die rückhaltenden Eigenschaften des ewG als gering eingestuft. Das für diese Aussage erforderliche Prozessverständnis wird als ausreichend hoch angesehen.

Nach GRS (2016) führt die **Erwärmung** eines gesättigten Tonsteins zu einer Erhöhung des Porendruckes durch die thermische Ausdehnung des Porenfluides. Durch die Erhöhung des Porendruckes im Wirtsgestein erhöht sich auch der Widerstand gegen das Eindringen von Gas.

Weiterhin zeigt ein Versuch mit natürlichen Tonproben bei Temperaturen von bis zu 150 °C für von 20 °C bis auf 80 °C steigende Temperaturen eine geringfügige Zunahme der Wasserpermeabilität (Faulkner et al. 2003). Bei weiterem Temperaturanstieg über 80 °C hinaus nahm jedoch die Wasserpermeabilität stetig ab. Aus Versuchen im Untertagelabors Mt. Terri wird geschlossen, dass weder die Erwärmung noch die anschließende Abkühlung eine thermisch induzierte Rissbildung im Tonstein verursachte (GRS 2007, Kull 2007). Eine Auswertung von Druckabfallkurven ergab zudem für den erhitzten Tonstein Wasserpermeabilitätswerte von 10^{-20} bis 10^{-19} m^2 , die denen des intakten Tonsteins entsprechen.

Insgesamt bleibt festzustellen, dass die Temperaturerhöhung von Tonstein nur einen geringen Einfluss auf seine Permeabilität aufweist.

Ergebnis: Die Auswirkungen der Gasentwicklung auf die Gebirgspermeabilität des ewG in Tonstein werden als gering bewertet (Bewertungsstufen 2). Die Auswirkungen des Wärmeeintrages werden gleichfalls als gering bewertet (Bewertungsstufe 2).

(b) Auswirkungen von Gas und Wärme auf die Porosität des ewG bei Lagerung im Tonstein

Im Kern gelten für die Porosität die für die Permeabilität festgestellten Aussagen. Es erfolgt ein Druckaufbau im Porenraum des Versatzes und an den Konturen des Endlagerbergwerks zum ewG, der bei Überschreitung von Grenzwerten zur Ausbildung von Sekundärpermeabilitäten führt. Aufgrund der Gasbildung wird keine Druckerhöhung erwartet, die zu einer deutlichen Erhöhung der Porosität für Lösung und 2-Phasenfluss führt. Gleiches gilt für die Bildung von Frac-Rissen. Sollte ein Druckniveau erreicht werden, bei dem 2-Phasenströmung einsetzt, wird wegen der geringen Permeabilitäten bzw. Porositäten keine nennenswerte Transportbewegung stattfinden. Sollte der Gaseindringdruck überschritten werden, dann bilden sich sekundäre für gasverfügbare Porositäten aus, die den Gastransport auf Mikroklüften ermöglichen und so zum Druckabbau beitragen.

Das besteht ein hohes Prozessverständnis hinsichtlich der Einwirkung der Gasdruckentwicklung auf Fluid- und Gasporosität. Die Auswirkungen der Gasdruckentwicklung auf die Lösungsporosität sind gering. Auswirkungen der Gasdruckentwicklung auf die gasverfügbare Porosität können nicht ausgeschlossen werden. Sie werden jedoch ebenfalls als gering eingestuft.

Zum Temperatureinfluss auf die Porosität haben Küll et al. (2007) beim In-situ-Versuch in Mt. Terri im Opalinuston beobachtet, dass sich ein maximaler Porenwasserdruck von 4 MPa beim Erhitzen von 15 °C auf 50 °C einstellt. Sollte dabei die minimale Hauptspannung und die Zugfestigkeit des Gesteins durch den Porenwasserdruck überschritten werden, könnte dies zum hydraulischen Aufreißen bzw. zum Bruch im Wirtsgestein führen. Jedoch wurde dies bisher weder in Laborversuchen mit Bohrkernen noch in In-situ-Versuchen in einem Tonstein beobachtet (GRS 2016). Bei höheren Temperaturen dominiert dann generell die Tonkompaktion, die zu einer Porositätsabnahme und infolgedessen zu einer Permeabilitätsabnahme führt.

Der Einfluss der Temperatur auf die Porosität des ewG ist insgesamt als gering zu bewerten.

Ergebnis: Die Auswirkungen der Gasentwicklung auf die Porosität des ewG in Tonstein werden als gering bewertet (Bewertungsstufen 2). Die Auswirkungen des Wärmeeintrages werden ebenfalls als gering bewertet (Bewertungsstufe 2).

(c) Auswirkungen von Gas und Wärme auf die Diffusivität des ewG bei Lagerung im Tonstein

Die Entwicklung von Gasdruck und Temperatur auf die Lösungsporosität ist so gering, dass Einflüsse auf die Diffusivität vernachlässigt werden können. Das Prozessverständnis dafür ist ausreichend hoch.

Ergebnis: Die Auswirkungen der Gasentwicklung und Temperaturänderung auf die Diffusivität des ewG in Tonstein werden als sehr gering bewertet (Bewertungsstufen 1).

(d) Ausdehnung des Wirtsgesteins Tonstein um das Endlagerbergwerk, für den die charakteristischen Eigenschaften der Sicherheitsfunktion des ewG gelten

Gasdruckentwicklung und Temperaturänderung haben keinen Einfluss auf die Abmessungen des Wirtsgesteins und des ewG.

Ergebnis: Die Auswirkungen der Gasentwicklung und Temperaturänderung auf die Ausdehnung des Wirtsgesteins und ewG in Tonstein werden als jeweils sehr gering bewertet (Bewertungsstufen 1).

(e) Auswirkungen von Gas und Wärme auf die Sorption des ewG bei Lagerung im Tonstein

Nach GRS (2010-5) hat die Gasdruckentwicklung prozessbedingt keinen Einfluss auf die Lösungsporosität. Deshalb ist ein Einfluss auf die Größe der reaktiven Mineraloberflächen auszuschließen. Ein Einfluss auf weitere Sorptionsparameter kann ebenfalls ausgeschlossen werden. Die Gasdruckentwicklung hat folglich keinen Einfluss auf die Sorptionseigenschaften des ewG.

Über den Einfluss von Temperaturänderungen auf die Sorption gibt nach GRS (2016) eine Untersuchung Aufschluss, die deutlich macht, dass zumindest für Europium, Nickel und die Gruppe der dreiwertigen Transurane mit einer erhöhten Sorption gerechnet werden kann, wenn sich die Temperatur des Tonsteins erhöht. Allein für Cäsium ist eine Verringerung der Sorptionsfähigkeit zu erwarten. In Summe betrachtet, werden die Sorptionsfähigkeit und damit das Rückhaltevermögen mit steigender Temperatur vergrößert. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Sorptionkoeffizienten sehr stark von standortspezifischen Bedingungen bestimmt sind. Nach Aussagen in ANSICHT (2017) besteht höchste Priorität zur Verbesserung der Datenlage in Bezug auf die Bestimmung standortspezifischer Diffusionskoeffizienten und Sorptionskoeffizienten für die betrachteten Wirtsgesteine.

Ergebnis: Die Auswirkungen der Gasdruckentwicklung und von Temperaturänderung auf die Sorption des ewG in Tonstein werden als sehr gering bewertet (Bewertungsstufen 1).

In der folgenden Tab. E-6 werden die internen Einwirkungen der Systemauswirkungen Gas und Wärme auf die RSF-Parameter für Tonstein sowie ihre Bewertungen für den Zeitraum $t < 10.000$ Jahre zusammenfassend dargestellt. Es zeigt sich, dass die Auswirkungen von Gasdruck und Wärmeentwicklung auf den ewG in Tonstein für die RSF-Parameter gering bzw. sehr gering/vernachlässigbar sind.

KOMPONENTE ewG	Tonstein TE + TM Für Wirkzeitraum t < 10.000 a	
RSF-Parameter	Systemauswirkung	Interne Auswirkungen auf RFS-Parameter Bewertung
Gebirgspermeabilität	Gasdruck	2
	Wärme	2
Porosität	Gasdruck	1
	Wärme	2
Diffusivität	Gasdruck	1
	Wärme	1
Ermittlung der Ausdehnung des Wirtsgesteins um das Endlager- bergwerk, für die die charakteristi- schen Eigenschaften der Sicherheits- funktion gelten	Gasdruck	1
	Wärme	1
Sorption	Gasdruck	1
	Wärme	1

Tab. E-6: Interne Einwirkungen der Systemauswirkungen Gas und Wärme auf die RSF-Parameter des ewG für Lagerung in Tonstein für t < 10.000 Jahre. (TE = Endlager, TM = Tiefenlager mit Monitoring u. Möglichkeit der Rückholbarkeit; Bewertung: 5 = sehr starke Einwirkung bis 1 = sehr geringe bis keine Einwirkung; n.b.: nicht bewertet).

E.3.2.2 Externe Auswirkungen auf die RSF-Parameter des ewG in Tonstein für t ≥ 10.000 Jahre

Wie bereits in Kap. E.3.1.2 dargestellt, sind für die End- bzw. Tiefenlagerung interessante flachlagernde Tonsteinvorkommen in größerer Ausdehnung in Norddeutschland (Tonsteine des unteren und mittleren Doggers sowie der Unterkreide) und in geringer Ausdehnung in Süddeutschland (Mittlerer Dogger – Opalinuston) verbreitet. Die BGR (2007) hat die entsprechenden Tonsteinvorkommen unter Berücksichtigung grundlegender Kriterien (z.B. Mächtigkeit des Tonsteinvorkommens > 100 m, Tiefenlage zwischen 300 m bis 1.000 m unter GOK) auf Grundlage vorhandener Daten identifiziert (s. Abb. E-1).

In ENTRIA-AB-03 (2015) wird festgelegt, dass die Einlagerungssohle bei 600 m unter GOK liegt, wobei die Tonsteinmächtigkeit oberhalb der Einlagerungssohle 50 m beträgt (vgl. Kap. E.3.1.2). Daraus folgt, dass die Gesamtmächtigkeit des Deckgebirges bei 500 m bis 550 m liegt. Diese Angaben gelten für End- bzw. Tiefenlagerung, wobei bei letzterer noch eine zusätzliche Monitoringsohle ca. 40 m oberhalb der Einlagerungssohle aufgeföhren wird.

Wie schon in Kap. E.3.1.2 und in Arbeitsbericht C (2016) dargestellt, ist als externes Szenario eine Eisüberföhren mit tiefer Rinnenbildung zu betrachten. Es hätte die größten (potentiellen) Auswirkungen auf das End- bzw. Tiefenlager.

Lage, Verlauf und Tiefe zukünftiger Rinnen können nicht vorhergesagt werden. Im Folgenden wird ein Fall angenommen, der Grundlage für die Ermittlung der Auswirkungen der Rinnenbildung auf die RSF-Parameter des ewG sind:

- Rinnentiefe 400 m,
- im Bereich der Rinnenbildung eine Eismächtigkeit von rund 700 m angenommen.

Tonstein in flacher Lagerung - 400 m tiefe Rinnenbildung

(a) Auswirkungen der Rinnenbildung auf die Gebirgspermeabilität des ewG in Tonstein

Die Rinnenbildung erfolgt bevorzugt in den randlichen Bereichen des Gletschers, wobei Schmelzwässer unter hohem Druck an der Sohle des Gletschers abfließen und die rinnenartigen Strukturen im Untergrund erzeugen. Die detaillierten Vorgänge beispielsweise zwischen Erosion und nachfolgender (Teil-)Verfüllung der Rinne sind allerdings nicht bekannt.

Ein großer Teil der (zusätzlichen) Auflast von 700 m Inlandeis auf den ewG kann durch die Kompression des Korngerüstes des Deckgebirges aufgenommen werden. Als Folge der Änderung der als Auflast auf das Endlager einwirkenden Spannungssäule resultiert ein veränderter, kompressiver Spannungszustand, der zu mechanischen Verformungen im Wirtsgestein führen kann. Dieser Prozess hängt vor allem von der Be- und Entlastungsrate sowie dem aus der Änderung der Auflast resultierenden Spannungsdeviator ab. Es ist nicht zu erwarten, dass aus diesen Spannungsänderungen Einwirkungen auf den ewG resultieren (Goulder & IfG 2011). Insofern sind Auswirkungen der Eisauflast nur von nachgeordneter Bedeutung.

Die Bildung der Rinne durch Erosion führt zur Beseitigung großer Teile der Mächtigkeit des Deckgebirges der Tonsteinformation. Oberhalb des ewG verbleiben vor Rinnenbildung noch 500 m Deckgebirge sowie einige zehner Meter Wirtsgestein. Bei Annahme einer 400 m tiefen Rinne verbleiben davon noch 100 m Deckgebirge plus einige zehner Meter zum ewG gehörendes Wirtsgestein. Dies würde zu erheblichen Entlastungsprozessen führen, v.a. Dinge dann, wenn der Gletscherrand schon außerhalb der Rinne liegt und keine zusätzliche Auflast bietet. Generell stellt eine mechanische Entlastung durch Gletscherrückzug insbesondere im Verbund mit erosiven Ereignissen einen weitaus kritischeren Zustand dar als eine mechanische Belastung durch Eisauflast (Goulder & IfG 2011).

Die Auswirkungen glazial-mechanischer Effekte während zukünftiger Kaltzeiten können für einen generischen End- bzw. Tiefenlagerstandort in Deutschland nur unter Zuhilfenahme von Annahmen prognostiziert werden. Sie können damit hinsichtlich ihrer Intensität nicht beispielhaft bewertet werden. Die Effizienz dieser Prozesse wird von den Materialeigenschaften des Untergrundes und auch des Gletschereises (z. B. Festigkeit), der Dynamik des Gletscherflusses selbst, der durch den Gletscher mitgeführten Gesteinsfracht, der Topographie des Geländes u. a. bestimmt.

Im morphologisch überwiegend flachen Norddeutschland mit leicht erodierbarem Lockermaterial im Deckgebirge potenzieller Endlagerformationen muss vor allem mit abrasiven Vorgängen gerechnet werden. Angaben zur Tiefenwirkung von solchen erosiven Vorgängen in Zusammenhang mit unter hohem Druck stehenden Schmelzwässern sind aufgrund der Komplexität der lokalen Bedingungen, deren Kenntnis für eine Abschätzung erforderlich wäre, nicht möglich. Hinzu kommen Faktoren wie beispielsweise die Permafrostsituation des Untergrundes. Permafrostböden besitzen im Vergleich zu Lockersedimenten eine relativ hohe mechanische Festigkeit gegenüber Scher-

deformationen. Wo im Betrachtungsgebiet während zukünftiger Kaltzeiten mit Permafrost zu rechnen ist, ist jedoch kaum vorhersagbar.

Bei einer Situation, bei der rund zwei Drittel des Deckgebirges erodiert werden, muss davon ausgegangen werden, dass Parameter wie die Permeabilität und Porosität innerhalb des ewG bzw. des gesamten Wirtsgesteins durch Druckentlastung hervorgerufene Auflockerungserscheinungen betroffen sein können. Deshalb wird von einem mittelstarken negativen Einfluss auf die Permeabilität, Porosität und Diffusivität ausgegangen.

Ergebnis: Die Auswirkungen von Gletscherüberfahung mit tiefer Rinnenbildung auf die Permeabilität im Tonstein werden als mäßig bewertet (Bewertungsstufe 3).

(b) Auswirkungen der Rinnenbildung auf die Porosität des ewG in Tonstein

Hinsichtlich der Porosität gilt die gleiche Argumentation wie unter (b) zu Permeabilität. Wahrscheinlich führt die Entlastung durch die (zeitweise) Beseitigung großer Anteile des Deckgebirges zu negativen Auswirkungen im Sinne einer zumindest zeitweiligen Porositäts-erhöhung.

Ergebnis: Die Auswirkungen von Gletscherüberfahung mit tiefer Rinnenbildung auf die Porosität im Tonstein werden als mäßig bewertet (Bewertungsstufe 3).

(c) Auswirkungen der Rinnenbildung auf die Diffusivität des ewG in Tonstein

Die Entlastung des ewG kann zu einer (vorübergehenden) Vergrößerung des Porenraums führen. Hierdurch könnten gegebenenfalls die Porendiffusionskoeffizienten vergrößert werden, wodurch mit einer geringen Wahrscheinlichkeit eine Verschlechterung der rückhaltenden Eigenschaften des Wirtsgesteins bewirkt werden kann. Die Bedeutung dieses negativen Einflusses ist schwierig zu bewerten. Wir bewerten den Einfluss auf die Diffusivität als mäßig.

Ergebnis: Die Auswirkungen von Gletscherüberfahung mit tiefer Rinnenbildung auf die Diffusivität des Tonsteins werden als mäßig bewertet (Bewertungsstufe 3).

(d) Auswirkungen der Rinnenbildung auf die Sorptionseigenschaften des ewG in Tonstein

Die Eisüberfahung mit Rinnenbildung kann über die höheren Porendiffusionskoeffizienten einen negativen Einfluss auf die Sorptionseigenschaften des Wirtsgesteins haben. Die Wahrscheinlichkeit dafür wird als gering angesehen. Das für diese Aussage erforderliche Prozessverständnis ist hoch (GRS 2010-5). Die Auswirkungen der Systementwicklungen auf die Sorption werden als gering eingestuft.

Ergebnis: Die Auswirkungen von Gletscherüberfahung mit tiefer Rinnenbildung auf die Sorption des Tonsteins werden als gering bewertet (Bewertungsstufe 2).

(e) Ausdehnung des Wirtsgesteins um das Endlagerbergwerk, für das die charakteristischen Eigenschaften der Sicherheitsfunktion des ewG gelten

Bei einer Rinnentiefe von 400 m wird der ewG in seiner räumlichen Erstreckung rechnerisch nicht direkt betroffen. Allerdings können die unter (a) bis (d) beeinflussten RSF-Parameter des ewG

insgesamt indirekt negativ betroffen werden. Da hier aber nur die **direkte** Betroffenheit bewertet wird (z.B. im Sinne von Mächtigkeitsreduktion des ewG), sind die Auswirkungen für den ewG und das umgebende Wirtsgestein nur als sehr gering zu bewerten. Eine Bewertung indirekter Aspekte verbietet sich, weil dann eine Doppelbewertung entsprechender RSF-Parameter stattfände.

Ergebnis: Die Auswirkungen der Eisüberfahung und der Rinnenbildung auf die charakteristischen Eigenschaften der Sicherheitsfunktionen des ewG über die räumliche Erstreckung des Wirtsgesteins um das End- bzw. Tiefenlagerbergwerk hinaus werden als sehr gering eingestuft (Bewertungsstufe 1).

FAZIT:

Bei einer Rinnentiefe von 400 m muss man davon ausgehen, dass ein zumindest mäßiger Einfluss auf das End- bzw. Tiefenlager stattfindet (s. Tab. 7). Dabei ist vorrangig (zumindest zeitweise) von Entlastungserscheinungen und daraus resultierenden erhöhten Durchlässigkeiten für Fluide auszugehen. Bei einer größeren Rinnentiefe kann sich der Effekt so weit verstärken, dass ein direkter Eingriff in das Wirtsgestein nicht auszuschließen ist.

Insgesamt sind mäßige Auswirkungen auf diejenigen RSF-Parameter zu verzeichnen, die großen Einfluss auf die Art der Bewegung von Lösungen haben. Es ist nicht auszuschließen, dass sich der gewünschte diffusive Anteil an der Lösungsbewegung zu Gunsten eines erhöhten advektiven Anteils verringert. Die RSF-Parameter Sorption und Ausdehnung des Wirtsgesteins um den ewG des Tonsteins sind von der Rinnenbildung nur gering bzw. sehr gering betroffen.

Hinweis: Nimmt man eine Mindestmächtigkeit der Tonsteinformation von 100 m an (ENTRIA-AB-03 2015) und eine Tonsteinmächtigkeit von 50 m oberhalb der Einlagerungsohle an, dann verbliebe im Falle des Tiefenlagers mit zusätzlicher Monitoringsohle 40 m oberhalb der Einlagerungsohle nur noch ein rechnerischer ewG von 10 m Tonstein. Es darf bezweifelt werden, ob damit die Anforderungen an die Mächtigkeit des ewG in Tonstein sicher erfüllt werden können. Dieses Problem stellt bei mächtigen Unterkreideformationen ein geringeres Problem dar.

KOMPONENTE ewG	Tonstein TE + TM Für Wirkzeitraum $t \geq 10.000$ a Eisüberfahung mit tiefer Rinnenbildung (400 m)
RSF-Parameter	Externe Auswirkungen auf RSF-Parameter Bewertung
Gebirgsspermeabilität	3
Porosität	3
Diffusivität	3
Ermittlung der Ausdehnung des Wirtsgesteins um das Endlager-bergwerk, für das die charakteristischen Eigenschaften der Sicherheitsfunktion gelten	1
Sorption	2

Tab. E-7: Externe Auswirkungen der Eisüberfahung mit tiefer Rinnenbildung auf RSF-Parameter des ewG bei Lagerung in Tonstein für $t \geq 10.000$ Jahren (TE – Endlager, TM = Tiefenlager; Bewertung: 1 = sehr gering/vernachlässigbare Auswirkungen bis 5 sehr hohe Auswirkungen)

E.3.3 Zusammenfassende Bewertung systembedingter interner und klimabedingter externer Einflüsse auf die RSF-Parameter des ewG

Insgesamt werde die Auswirkungen der Systementwicklungen Gas und Wärme auf die RSF-Parameter des ewG in Salz für den Zeitraum < 10.000 Jahre als gering bzw. sehr gering bewertet (s. Tab. E-4), und das entsprechend ist die Systemrobustheit hoch. Diese Bewertung steht unter der Voraussetzung dass die standort- und konzeptspezifischen Merkmale optimal aufeinander abgestimmt sind und die entsprechenden Anforderungen in BMU (2010) erfüllt werden.

Die Bewertungen der Auswirkungen gelten sowohl für Salz in steiler Lagerung als auch für flachlagernde Salzvorkommen. Eine Differenzierung nach Tiefenlagerung mit sofortigem Verschluss (Endlagerung) und Tiefenlagerung mit Vorkehrung zu Monitoring und Rückholung der Abfälle ist nicht möglich.

Für den Zeitraum ≥ 10.000 Jahre wird für steillagerndes Salz zweier tiefer Rinnen angenommen (350 u. 450 m). Die Auswirkungen dieser externen Einflüsse auf die RSF-Parameter sind für die 350 m-Rinne sehr gering und für die 450 m-Rinne gering. Die Auswirkungen einer 700 m mächtigen Eisüberfahung (ohne Rinnenbildung) bei Salz in flacher Lagerung sind ebenfalls sehr gering (s. Tab. E-5). Daraus ist eine hohe Systemrobustheit für die Lagerung in Salz abzuleiten.

Beim Tonstein wird für den Wirkzeitraum $t < 10.000$ Jahre sind die Auswirkungen der Systementwicklungen Gasdruck und Wärme auf die RSF-Parameter des ewG als gering bzw. sehr gering zu bewerten (s. Tab. E-6). Für den Wirkzeitraum ≥ 10.000 Jahre ist durch die externe Einwirkung „Eisüberfahung mit tiefer Rinnenbildung“ allerdings eine mäßig hohe Auswirkung auf die die

Diffusion bestimmenden RSF-Parameter des ewG festzustellen (s. Tab E-7). Hier ist nur eine mittlere Systemrobustheit gegeben. Für Lagerung in Tonstein kann demnach die tiefe Rinnenbildung ein problematischer Vorgang sein, der den ewG beeinträchtigen kann.

E.4 Ermittlung des Vertrauens in die Erfüllung sicherheitskonzeptioneller Auslegungsanforderungen an die RSF-Parameter des ewG

In diesem Schritt wird geprüft, in welchem Verhältnis die RSF-Parameter zu den auslegungsbedingten Mindestanforderungen stehen. Als Ergebnis ergibt sich die Bewertung des Vertrauens in die Erfüllung der Auslegungsanforderungen an den RSF-Parameter über die Wirkzeiträume $t < 10.000$ a und $t \geq 10.000$ Jahre.

Dabei wird auch auf bereits vorliegenden Ergebnisse (Vertrauen in die Charakterisierung im Ist-Zustand und Prognostizierbarkeit der RSF-Parameter für Zeiträume von $t < 10.000$ a und $t \geq 10.000$ a) zurückgegriffen. Damit ist ein wichtiger Teilschritt zur Gesamtbewertung der Robustheit der Sicherheitsfunktionen des ewG bearbeitet.

E.4.1 Vertrauen in die Erfüllung der Auslegungsanforderungen an die RSF-Parameter des ewG bei Lagerung in Steinsalz

E.4.1.1 Vertrauen in die Erfüllung der Auslegungsanforderungen der RSF-Parameter des ewG für $t < 10.000$ Jahre bei Lagerung in Steinsalz

(a) Gebirgspermeabilität des ewG (Salz - steile und flache Lagerung)

Die zentrale Anforderung an die Gebirgspermeabilität ist die Unterschreitung des Parameterwertes 10^{-19} m^2 . Nur so kann der ewG als ein diffusionsdominiertes System angesehen werden, das den Einschluss der Radionuklide gewährleisten kann, und bei dem die advective Komponente des Lösungstransportes vernachlässigbar gering ist. Dieser Parameterwert wird für Steinsalz in steiler und flacher Lagerung häufig um ein oder zwei Größenordnungen unterschritten, so dass – eine gute Standortauswahl vorausgesetzt – die zentrale Anforderung erfüllt werden kann.

Berücksichtigt man außerdem das hohe bzw. sehr hohe Vertrauen in die Charakterisierung der Permeabilität im Ist-Zustand und die gleichermaßen nur geringen Auswirkungen von Gasdruck und Wärme auf die Permeabilität, dann ergibt sich daraus insgesamt eine hohe bis sehr hohe Aus-sagesicherheit.

Ergebnis: Es besteht ein hohes Vertrauen darin, dass die Auslegungsanforderungen an die Gebirgspermeabilität für den Zeitraum $t < 10.000$ Jahre erfüllt werden. Daraus folgt die Einstufung der Bewertung des RSF-Parameters für $t < 10.000$ Jahre als hoch (Bewertungsstufe 4) für steil- und flachlagerndes Salz.

(b) Porosität des ewG (Salz - steile und flache Lagerung)

Für die Porosität besteht keine konkrete Auslegungsanforderung. Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass Porosität und Permeabilität physikalisch gekoppelte Größen darstellen, müssen für die Porosität ähnlich geringe Werte bestehen wie bei der Permeabilität, denn nur so ist die zent-

rale Anforderung nach einem diffusiongesteuerten System zu erfüllen. Deswegen wird hier von der plausiblen Annahme der GRS (2010-5) ausgegangen, dass wegen der unter der Mindestanforderung liegenden Permeabilitätswerte auch die Porositäten entsprechend geringe Werte besitzen. Die entsprechende indirekte Auslegungsanforderung an die Porosität wird also mit großer Sicherheit ebenfalls erfüllt.

Zieht man außerdem die Ergebnisse der Charakterisierung der Porositätswerte im Ist-Zustand heran (hohes bzw. sehr hohes Vertrauen) und die geringe bzw. sehr geringen Auswirkungen von Gasdruck und Wärme auf die Porosität, dann ergibt sich insgesamt eine hohe Aussagesicherheit.

Ergebnis: Es besteht ein hohes bis sehr hohes Vertrauen darin, dass die Auslegungsanforderungen an die Porosität für den Zeitraum $t < 10.000$ Jahre erfüllt werden. Daraus folgt die Einstufung der Bewertung des RSF-Parameters für $t < 10.000$ Jahre als hoch (Bewertungsstufe 4) für steil- und flachlagerndes Salz.

(c) Diffusivität des ewG (Salz - steile und flache Lagerung)

Die Diffusivität ist für die Ausdehnung des ewG eine extrem sensitive Größe. Deshalb ist als allgemeine Anforderung an die Diffusivität des ewG ein möglichst geringer Porendiffusionskoeffizient wünschenswert. Die gemessenen Diffusionskoeffizienten für alle Radionuklide in Salz sind mit Werten um $10^{-21} \text{ m}^2/\text{s}$ derart klein, dass es rechnerisch für die praktisch vollständige Radionuklidrückhaltung nur eine Ausdehnung des ewG von wenigen 10er m unverritzten Steinsalzes bedarf (GRS 2010-5). Aufgrund dieser extrem geringen Diffusionskoeffizienten wird eingeschätzt, dass die Auslegungsanforderung an die Diffusivität mit hoher Sicherheit eingehalten wird. Daher fallen die relativ geringen Unsicherheiten bei der Charakterisierung für die Gesamtbewertung nicht mehr ins Gewicht.

Berücksichtigt man außerdem das hohe bzw. sehr hohe Vertrauen in die Charakterisierung der Diffusivität im Ist-Zustand und die gleichermaßen nur sehr geringen Auswirkungen von Gasdruck und Wärme auf die Diffusivität, dann ergibt sich daraus insgesamt eine hohe Aussagesicherheit.

Ergebnis: Es besteht ein sehr hohes Vertrauen darin, dass die Auslegungsanforderungen an die Diffusivität für den Zeitraum $t < 10.000$ Jahre erfüllt werden. Daraus folgt die Einstufung der Bewertung des RSF-Parameters für $t < 10.000$ Jahre als hoch (Bewertungsstufe 4) für steil- und flachlagerndes Salz.

(d) Ausdehnung des Wirtsgesteins um das Endlagerbergwerk, für die charakteristischen Eigenschaften der Sicherheitsfunktion des ewG gelten (Salz - steile und flache Lagerung)

Auslegungsanforderung an den Parameter ist, dass bei den gegebenen rückhaltenden Eigenschaften der anderen Parameter (v.a. Gebirgspermeabilität, Porendiffusionskoeffizienten) eine Mindestmächtigkeit des ewG um das Endlagerbergwerks gegeben ist, so dass an dessen Rande das Kriterium der Null-Emission (vollständiger Einschluss) oder das der Geringfügigkeit der Freisetzung (sicherer Einschluss) erfüllt ist. Diese Bedingungen können im Salz erfüllt werden, weil nur wenige 10er m unverritzten Steinsalzes dies gewährleisten. Hinzu kommt noch die Sicherheit, dass bei Salzstöcken die Mächtigkeit des reinen Steinsalzes mehrere hundert Meter betragen kann, und bei flachlagernden Zechsteinsalzen gemeinhin mehrere zehner bis über hundert Meter reinen Steinsalzes vorliegen, in speziellen Beckensituationen auch ein Mehrfaches davon betragen können (BGR 2014).

Die Charakterisierung der RSF-Parameter des ewG für den über den ewG hinausgehenden Steinsalzbereich sehr gut (flach lagerndes Salz) bzw. gut (steile Lagerung). Die steile Lagerung besitzt wegen der höheren Komplexität der Schichten nur eine gute Bewertung (Lage von Anhydrit, Salzton usw. nicht immer zweifelsfrei erkennbar). Die Auswirkungen von Gasdruck und Wärme auf entsprechende Steinsalzpartien hingegen sind nur als gering bis sehr gering zu bewerten.

Insgesamt führt die aggregierte Bewertung zu der Aussage, dass ein hohes bis sehr hohes Vertrauen bezüglich der Erfüllung der Auslegungsanforderung in den den ewG umgebenden Salzvorkommen gegeben ist.

Ergebnis: *Es besteht ein hohes bis sehr hohes Vertrauen darin, dass die Auslegungsanforderungen an die Ausdehnung des Wirtsgesteins, für die die charakteristischen Eigenschaften der RSF-Parameter des ewG gelten, für den Zeitraum $t < 10.000$ Jahre erfüllt werden. Daraus folgt die Einstufung der RSF-Parameters für $t < 10.000$ Jahre als hoch (Bewertungsstufe 4) für steilstehendes Salz bzw. hoch (Bewertungsstufe 5) für flach lagerndes Salz).*

Fazit:

Insgesamt ist das Vertrauen in die Erfüllung der Auslegungsanforderungen der RSF-Parameter des ewG bei Lagerung im Salz für den Zeitraum $t < 10.000$ Jahre hoch (s. Tab. E-8). Hinsichtlich des RSF-Parameters „Ausdehnung des Wirtsgesteins um...“ ist das Vertrauen für den ewG bei Lagerung im flachlagerndes Salz sogar als sehr hoch zu bewerten.

KOMPONENTE ewG	Vertrauen in die Erfüllung der Auslegungsanforderungen für die RSF-Parameter im Wirkzeitraum $t < 10.000$ Jahre	
RSF-Parameter	TE + TM Salz (steil)	TE + TM Salz (flachlagernd)
Permeabilität	4	4
Porosität	4	4
Diffusivität	4	4
Ermittlung der Ausdehnung des Wirtsgesteins um das Endlagerbergwerk, für die die charakteristischen Eigenschaften der Sicherheitsfunktion gelten	4	5
Sorption	n.b.	n.b.

Tab. E-8: Vertrauen in die Erfüllung der Auslegungsanforderungen für die RSF-Parameter des ewG bei Lagerung im Salz für den Wirkzeitraum $t < 10.000$ Jahre (TE – Endlager, TM = Tiefenlager mit Monitoring u. der Möglichkeit der Rückholbarkeit; Bewertung: 1 = sehr geringes/vernachlässigbares Vertrauen bis 5 sehr hohes Vertrauen).

E.4.1.2 Vertrauen in die Erfüllung der Auslegungsanforderungen der RSF-Parameter des ewG für $t \geq 10.000$ Jahre bei Lagerung in Steinsalz

In diesem Kapitel geht es darum, die Erfüllung der Auslegungsanforderungen für Zeiträume über 10.000 Jahre hinaus zu überprüfen. Dies geschieht durch die Betrachtung externer Einwirkungen auf das End- bzw. Tiefenlager, und zwar für folgende das Salz betreffende externen Ereignisabläufe in Norddeutschland:

- **Tiefe Rinnenbildung plus Eisüberfahung** für **steil stehendes Salz in Norddeutschland**; dabei Berücksichtigung zweier Rinnentiefen (350 und 450 m unter GOK); Einlagerungssohle 800 m unter GOK, wobei mindestens 200 m Steinsalzüberdeckung über dem Einlagerungsbereich vorhanden ist.
- **Eisüberfahung ohne Rinnenbildung** für **flach lagerndes Salz in Norddeutschland**; Einlagerungssohle mindestens 600 m tief unter GOK, dabei mindestens 100 m Steinsalzüberdeckung über dem Einlagerungsbereich.

Salz – Steile Lagerung:

(a, b, c) Auswirkungen auf Gebirgsporeabilität, Porosität und Diffusivität – Erfüllung der Auslegungsanforderungen für $t \geq 10.000$ a

Die Auslegungsanforderungen an die drei RSF-Parameter werden für den Zeitraum $t < 10.000$ Jahre erfüllt (s. E.4.1.1). Das dementsprechende Vertrauen ist weit überwiegend hoch. Diese Aussage gilt auch für die externen Ereignisabläufe für den Zeitraum ≥ 10.000 a, weil unter den getroffenen Annahmen keine weitergehenden negativen Auswirkungen auf die RSF-Parameter zu erwarten sind.

Tiefe Rinnenbildung plus Eisüberfahung:

Die Auswirkungen auf diese drei RSF-Parameter (a, b, c) bei tiefer Rinnenbildung plus einer ca. 700 m mächtigen Eisüberfahung führen nicht zu signifikanten Änderungen der Parameter. Der Hauptgrund dafür liegt in der Tiefenlage der Einlagerungssohle von 800 m unter GOK. Bei Rinnentiefen von 350 bzw. 450 m verbleiben 450 bis 350 m Gestein über der Einlagerungssohle, davon alleine 200 m Wirtsgestein.

Hierbei ist zu beachten, dass die zusätzliche Eisauflast mit hoher Wahrscheinlichkeit ebenfalls keine negativen Auswirkungen auf den rund 800 m tiefen ewG hat, weil eine zusätzliche Auflast im Deckgebirge bei einem verfüllten End- bzw. Tiefenlager tendenziell zu keiner erhöhten Durchlässigkeit für Lösungen, Rissbildungen oder Ähnlichem führt (Goulder/IfG (2011)).

(d) Ausdehnung des Wirtsgesteins um das Tiefenlagerbergwerk, für die charakteristischen Eigenschaften der Sicherheitsfunktion des ewG gelten – Erfüllung der Auslegungsanforderungen für $t \geq 10.000$ a

Selbst bei einer (zeitlich begrenzten) Rinnentiefe von 350 bzw. 450 m verbleiben immer noch 450 bzw. 350 m Deckgebirge und Wirtsgestein. Der rein rechnerische Erhalt des vollständigen Wirtsgesteins, das die Auslegungsanforderungen hinsichtlich der drei oben unter (a), (b) und (c) behandelten RSF-Parameter erfüllt, hat den Erhalt der charakteristischen Eigenschaften der Sicherheitsfunktionen des ewG für $t \geq 10.000$ a zur Folge. Es besteht deshalb ein hohes Vertrauen in die

Wirksamkeit der rückhaltenden Sicherheitsfunktion des ewG. Voraussetzung dazu ist allerdings die Auswahl des Standortes nach dem Stand von Wissenschaft und Technik.

FAZIT (s. auch Tab. E-9):

Ergebnis: Insgesamt besteht ein hohes Vertrauen darin, dass trotz Eisüberfahung und tiefer Rinnenbildung die Auslegungsanforderungen an die Gebirgsspermeabilität, die Porosität, die Diffusivität und die Ausdehnung des Wirtsgesteines um das Endlagerbergwerk bzw. den ewG für den Zeitraum $t \geq 10.000$ a für Salz in steiler Lagerung erfüllt werden (Bewertungsstufe 4).

Salz – flache Lagerung:

Sämtliche flach lagernden Salzvorkommen in Norddeutschland, die potenziell für ein End- oder Tiefenlager in Frage kommen, liegen **außerhalb der Gebiete**, in denen in der Vergangenheit eine **tiefe Rinnenbildung** stattgefunden hat. Deshalb wird hier nur die Eisüberfahung betrachtet.

Andere denkbare Effekte wie kryogen oder hydraulisch induzierte Rissbildungen, die bis in Tiefen von 600 bis 700 m reichen (Bauer 1991) werden derzeit kontrovers bewertet. Ihre Genese ist nach heutigem Kenntnisstand nicht eindeutig erklärbar. In dem Zusammenhang werden auch thermisch induzierte Spannungen diskutiert, die bei bestimmten Bedingungen im Top der Wirtsgesteinsformation (auch Salz) auftreten könnten. Von Goulder/IfG (2011) durchgeführte Berechnungen zeigen, dass entsprechende Risse wohl nur auf das Deckgebirge einwirken und den ewG nicht erreichen werden. Zudem weisen Modellrechnungen von Goulder/IfG (2011) darauf hin, dass Rissbildung auch durch hydraulische Effekte induziert werden kann.

(a, b, c) Salz, flache Lagerung - Auswirkungen auf Gebirgsspermeabilität, Porosität und Diffusivität - – Erfüllung der Auslegungsanforderungen für $t \geq 10.000$ a

Die Auslegungsanforderungen an die drei RSF-Parameter werden für den Zeitraum $t < 10.000$ Jahre erfüllt (s. E.4.1.1). Das dementsprechende Vertrauen ist hoch bis sehr hoch. Diese Aussage gilt auch für die externen Ereignisabläufe für den Zeitraum ≥ 10.000 a, weil unter den getroffenen Annahmen keine weitergehenden negativen Auswirkungen auf die drei RSF-Parameter zu erwarten sind.

Durch die zusätzliche Eisüberfahung kann es im morphologisch weitgehend flachen Norddeutschland mit überwiegend leicht erodierbarem Lockermaterial zu abrasiven Vorgängen kommen. Dabei greifen an der Gletschersohle erosive Vorgänge an, deren Tiefenwirkung aber in von den jeweiligen Standortbedingungen (z.B. Mächtigkeit des Permafrostes mit relativ hoher mechanischer Festigkeit gegenüber Scherdeformationen) abhängt. Man muss aber davon ausgehen, dass diese abrasiven Vorgänge mit einer Tiefenwirkung von mehreren zehner Metern bis bei weitem nicht die Auswirkungen mit sich bringen, die im Extremfall von tiefen Rinnenbildungen ausgehen.

Weiterhin ist zu beachten, dass die zusätzliche Eisauflast mit hoher Wahrscheinlichkeit ebenfalls keine negativen Auswirkungen auf den rund 600 m tief liegenden ewG hat, weil eine zusätzliche Auflast im Deckgebirge bei einem verfüllten End- bzw. Tiefenlager tendenziell zu keiner erhöhten Durchlässigkeit für Lösungen, Rissbildungen oder Ähnlichem führt. Es ist auch nicht zu erwarten, dass die Spannungsänderungen infolge der Änderung der Eisauflast Einwirkungen auf den ewG haben (Goulder/IfG 2011). Nach dem Rückzug des Eises wird eine Entlastung des Deckgebirges stattfinden, wobei sich die ursprünglichen Spannungsverhältnisse wieder einstellen werden.

(d) Salz, flache Lagerung – Ausdehnung des Wirtsgesteins um das Endlagerbergwerk, für die charakteristischen Eigenschaften der Sicherheitsfunktion des ewG gelten – Erfüllung der Auslegungsanforderungen für $t \geq 10.000$ a

Da die tiefe Rinnenbildung hier nicht wirksam ist und der Erhalt des vollständigen Wirtsgesteins gegeben ist und zugleich auch die Auslegungsanforderungen hinsichtlich der drei oben unter (a), (b) und (c) behandelten RSF-Parameter erfüllt sind, führt dies zu einem hohen Vertrauen in die Wirksamkeit der RSF-Parameter des ewG und seiner Wirtsgesteinsumgebung. Voraussetzung dazu ist allerdings die Auswahl des Standortes nach dem Stand von Wissenschaft und Technik.

FAZIT für Salz (s. Tab. E-9):

Ergebnis: Insgesamt besteht ein hohes Vertrauen, dass die Auslegungsanforderungen an die RSF-Parameter Gebirgspermeabilität, die Porosität, die Diffusivität und die Ausdehnung des Wirtsgesteines Salz um das Endlagerbergwerk bzw. den ewG für den Zeitraum $t \geq 10.000$ a erfüllt werden (Bewertungsstufe 4). Dies gilt sowohl für steilstehendes Salz bei Eisüberfahung mit tiefer Rinnenbildung als auch bei flach lagerndem Salz bei alleiniger Eisüberfahung (Rinnenbildung entfällt hier).

KOMPONENTE ewG	Vertrauen in die Erfüllung der Auslegungsanforderungen für die RSF-Parameter im Wirkzeitraum $t \geq 10.000$ Jahre	
RSF-Parameter	TE + TM Salz (steil) Eisüberfahung mit tiefer Rinnenbildung (350 m u. 450 m)	TE + TM Salz (flachlagernd) (nur Eisüberfahung, keine Rinnenbildung)
Permeabilität	4	4
Porosität	4	4
Diffusivität	4	4
Ermittlung der Ausdehnung des Wirtsgesteins um das Endlagerbergwerk, für die die charakteristischen Eigenschaften der Sicherheitsfunktion gelten	4	4
Sorption	n.b.	n.b.

Tab. E-9: Vertrauen in die Erfüllung der Auslegungsanforderungen für die RSF-Parameter bei Lagerung im Salz für den Wirkzeitraum $t \geq 10.000$ Jahre (TE = Endlager, TM = Tiefenlager mit Monitoring und Möglichkeit der Rückholung; Bewertungen: 1 = sehr geringes/vernachlässigbares Vertrauen bis 5 sehr hohes Vertrauen; n.b.: nicht bewertet).

E.4.2 Vertrauen in die Erfüllung der Auslegungsanforderungen der RSF-Parameter des ewG bei Lagerung in Tonstein

E.4.2.1 Vertrauen in die Erfüllung der Auslegungsanforderungen der RSF-Parameter des ewG für $t < 10.000$ Jahre bei Lagerung in Tonstein

(a) Auslegungsanforderungen an die Permeabilität des ewG

Als zentrale Anforderung gilt eine Permeabilität von $< 10^{-19} \text{ m}^2$, da Tonstein dann als diffusionsdominiertes System gilt. Die Charakterisierung der entsprechenden RSF-Parameterwerte im Ist-Zustand für den ewG im Tonstein werden als hoch zuverlässig bewertet (s. Kap. E.2.2 u. Tab. E-3). Gleiches gilt für die mit der Permeabilität funktional gekoppelte Porosität des Tonsteins, für die aber keine quantitative Auslegungsanforderung vorliegt. Die Auswirkungen der Ereignisse Gasbildung und Wärme auf den ewG im Tonstein für den Zeitraum $t > 10.000$ Jahre werden zudem nur als gering bewertet (s. Kap. E.3.2.1). Die Erfüllung der Auslegungsanforderungen an die Permeabilität des ewG im Tonstein wird insgesamt als hoch angesehen.

Ergebnis: Es besteht ein hohes Vertrauen darin, dass die Anforderungen an den RSF-Parameter Gebirgspermeabilität für Zeiträume < 10.000 Jahre erfüllt werden. Daraus folgt die Einstufung der Bewertung des RSF-Parameters für $t < 10.000$ Jahre als hoch (Bewertungsstufe 4).

(b) Auslegungsanforderung an die Porosität des ewG

Für die Porosität besteht keine konkrete Auslegungsanforderung. Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass Porosität und Permeabilität physikalisch gekoppelte Größen darstellen, müssen für die Porosität ähnlich geringe Werte bestehen wie bei der Permeabilität, denn nur so ist die zentrale Anforderung nach einem diffusionsgesteuerten System zu erfüllen. Deswegen wird auch hier von der plausiblen Annahme der GRS (2010-5) ausgegangen, dass wegen der unter der Mindestanforderung liegenden Permeabilitätswerte auch die Porositäten entsprechend geringe Werte besitzen und deshalb advective Transportvorgänge mit sehr grosser Sicherheit ausgeschlossen werden können. Die indirekte Auslegungsanforderung an die Porosität wird also mit großer Sicherheit ebenfalls erfüllt.

Zieht man außerdem die Ergebnisse der Charakterisierung der Porositätswerte im Ist-Zustand heran (hohes bzw. sehr hohes Vertrauen) und die geringe bzw. sehr geringen Auswirkungen von Gasdruck und Wärme auf die Porosität, dann ergibt sich insgesamt eine hohe Aussagesicherheit.

Ergebnis: Es besteht ein hohes bis sehr hohes Vertrauen darin, dass die Auslegungsanforderungen an die Porosität für den Zeitraum $t < 10.000$ Jahre erfüllt werden. Daraus folgt die Einstufung der Bewertung des RSF-Parameters für $t < 10.000$ Jahre als hoch (Bewertungsstufe 4) für Lagerung in Tonstein.

(c) Auslegungsanforderungen an die Diffusivität des Tonsteins des ewG

Die generelle Anforderung an den ewG bezüglich der Diffusivität sind möglichst geringe Porendiffusionskoeffizienten. Die Porendiffusionskoeffizienten der nichtretardierenden Anionen Cl-36, Se-79 und die nur schwach sorbierten Radionuklide I-129 und C-14 sind maßgeblich für die Bestim-

mung der Mindestausdehnung des ewG. Hinsichtlich der Freisetzung von Radionukliden aus dem ewG ist nach (GRS 2010-5) die Anforderung ein möglichst geringer Diffusionskoeffizient. Die Diffusivität ist eine für die Auslegung der Abmessungen des ewG extrem sensitive Größe. Eine Erhöhung der Porendiffusionskoeffizienten um ca. eine halbe Größenordnung hat eine Erweiterung der erforderlichen Mindestmächtigkeit des ewG um das Endlager um mehrere 10er m zur Folge.

GRS (2010-5) fordert nach Aufsättigung des Tonsteins eine Diffusionskonstante von $D_p > 5 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ als Auslegungsanforderung. Wegen der guten Charakterisierbarkeit von Tonstein (s. Kap. E.2.2) und den geringen Auswirkungen von Gas und Wärme auf die Diffusivität (s. Kap. E.3.2) besteht ein hohes Vertrauen in das Erreichen der Auslegungsanforderung für Zeiträume < 10.000 Jahre.

Ergebnis: Es besteht ein hohes Vertrauen (Bewertungsstufe 4) darin, dass die Auslegungsanforderung an die Diffusivität des Tonsteins des ewG für den Zeitraum < 10.000 Jahre erreicht wird.

(d) Ausdehnung des Wirtsgesteins um das Endlagerbergwerk, für die charakteristischen Eigenschaften der Sicherheitsfunktion des ewG in Tonstein gelten

Auslegungsanforderung an den Parameter ist, dass bei den gegebenen rückhaltenden Eigenschaften der anderen Parameter (v.a. Gebirgspermeabilität, Porendiffusionskoeffizienten, Sorption) eine Mindestmächtigkeit des ewG um das Endlagerbergwerks gegeben ist, so dass an dessen Rande das Kriterium der Null-Emission (vollständiger Einschluss) oder das der Geringfügigkeit der Freisetzung (sicherer Einschluss) erfüllt ist. Die Bedingung der Null-Emission kann bei Tonstein wegen diffusiver Transportvorgänge nicht erfüllt werden. Ein sicherer Einschluss kann jedoch gewährleistet werden.

Zu beachten ist, dass das Vertrauen in die RSF-Parameterwerte angesichts der guten Charakterisierbarkeit und der sehr geringen bzw. geringen kaltzeitbedingten Auswirkungen für den Zeitraum < 10.000 Jahre insgesamt als hoch angesehen wird. Darüber hinaus ist die Charakterisierung der RSF-Parameter des ewG für den über den ewG hinausgehenden Tonstein gut abschätzbar.

Insgesamt führen die Aussagen zu der Bewertung, dass ein hohes Vertrauen hinsichtlich der Erfüllung der Auslegungsanforderung in den den ewG umgebenden Salzvorkommen gegeben ist.

Ergebnis: Es besteht ein hohes Vertrauen darin, dass die Auslegungsanforderungen an die Ausdehnung des Wirtsgesteins, für die die charakteristischen Eigenschaften der RSF-Parameter des ewG gelten, für den Zeitraum $t < 10.000$ Jahre erfüllt werden. Daraus folgt die Einstufung der RSF-Parameters für $t < 10.000$ Jahre als hoch (Bewertungsstufe 4) für Tonstein.

(e) Auslegungsanforderungen an die Sorption im ewG des Tonstein

Es liegen keine expliziten nuklidspezifischen quantitativen Anforderungen an die Sorptionseigenschaften des ewG in Tonstein vor. Es gilt jedoch die Forderung, dass bei einem ewG in einer Tonsteinformation gegenüber den kationischen Radionukliden, die in den radioaktiven Abfällen enthalten sind, hohe Sorptionskapazitäten bestehen. Je stärker diese Wirkung, umso günstiger die Rückhaltung im ewG, selbst im Falle relativ großer Diffusionskonstanten. Eine nahezu vollständige sorptionsbedingte Rückhaltung wird für kationische Radionuklide bei K_d -Werten $> 0,005 \text{ m}^3/\text{kg}$

bewirkt (GRS 2010-5). Hieraus ergibt sich, dass für die kationischen Radionuklide eine weitgehende sorptionsbedingte Rückhaltung am Tonstein des ewG besteht, eine Eigenschaft, die auch durch unsicherheitsbedingte Schwankungen der messtechnisch ermittelten Sorptionsparameter nicht in Frage gestellt werden kann.

Für die hochmobilen Radionuklide Cl-36, Se-79, I-129 und C-14, die für die Abmessung des ewG auslegungsrelevant sind, wird keine bzw. eine nur sehr geringe Sorption unterstellt, d.h. es bestehen zu diesen Radionukliden keine bzw. nur geringe Auslegungsanforderungen (GRS 2010-5). Dennoch ist insgesamt festzustellen, dass trotz nur mäßigen Vertrauens in die Charakterisierung der Sorptionsparameter für den Ist-Zustand die Auslegungsanforderungen mit hoher Sicherheit eingehalten werden können.

Ergebnis: Es besteht ein hohes Vertrauen (Bewertungsstufe 4) darin, dass die Auslegungsanforderung an die Sorption des Tonsteins des ewG für den Zeitraum < 10.000 Jahre eingehalten wird.

KOMPONENTE ewG		Tonstein
Sicherheitsfunktion	RSF-Parameter	Vertrauen in die Erfüllung der Auslegungsanforderungen für die RSF-Parameter im Wirkzeitraum $t < 10.000$ Jahre (für TE und TM)
Begrenzung/Verhinderung von Lösungsbewegung und Radionuklidtransport	Permeabilität	4
	Porosität	4
	Diffusivität	4
	Ermittlung der Ausdehnung des Wirtsgesteins um das Endlagerbergwerk, für die die charakteristischen Eigenschaften der Sicherheitsfunktion gelten	4
Verzögerung des Radionuklidtransportes durch Sorption	Sorption	4

Tab. E-10: Vertrauen in die Erfüllung der Auslegungsanforderungen für die RSF-Parameter bei Lagerung in Tonstein für den Wirkzeitraum $t < 10.000$ Jahre (TE = Endlager, TM = Tiefenlager mit Monitoring und Möglichkeit der Rückholbarkeit; Bewertung: 1 = sehr geringes/vernachlässigbares Vertrauen bis 5 sehr hohes Vertrauen).

E.4.2.2 Vertrauen in die Erfüllung der Auslegungsanforderungen der RSF-Parameter des ewG für $t \geq 10.000$ Jahre bei Lagerung in Tonstein

Hier geht es darum, die Erfüllung der Auslegungsanforderungen für Zeiträume $t \geq 10.000$ Jahre zu überprüfen. Dies geschieht mit Hilfe externer Einwirkungen auf das End- bzw. Tiefenlager, und zwar für folgende den Tonstein betreffenden Ereignisabläufe in Norddeutschland:

- Eisüberfahung **ohne** tiefe Rinnenbildung für Tonstein in Norddeutschland; geometrische Verhältnisse wie bei Eisüberfahung mit tiefer Rinnenbildung.
- Eisüberfahung **mit** tiefer Rinnenbildung für Tonstein in Norddeutschland; Rinnentiefe 400 m unter GOK; Lage der Einlagerungssohle 600 m unter GOK, 50 m Tonsteinüberdeckung über dem Einlagerungsbereich.

Eisüberfahung ohne tiefe Rinnenbildung:

(a, b, c, d) Tonstein - Auswirkungen auf Gebirgsspermeabilität, Porosität, Diffusivität und Sorption- – Erfüllung der Auslegungsanforderungen für $t \geq 10.000$ a

Die Auslegungsanforderungen an die vier RSF-Parameter Permeabilität, Porosität, Diffusivität und Sorption werden für den Zeitraum $t < 10.000$ Jahre erfüllt (s. E.4.2.2). Das dementsprechende Vertrauen ist hoch bis sehr hoch. Diese Aussage gilt jedoch nur eingeschränkt für die externen Ereignisabläufe für den Zeitraum ≥ 10.000 a, weil unter den getroffenen Annahmen negativen Auswirkungen auf die RSF-Parameter zu erwarten sind.

Durch die zusätzliche **Eisüberfahung** kommt es im morphologisch weitgehend flachen Norddeutschland mit überwiegend leicht erodierbarem Lockermaterial zu abrasiven Vorgängen. Dabei greifen es an der Gletschersohle erosive Kräfte an, deren Tiefenwirkung von den jeweiligen Standortbedingungen (z.B. Mächtigkeit des Permafrostes mit relativ hoher mechanischer Festigkeit gegenüber Scherdeformationen) abhängt. Man muss davon ausgehen, dass diese abrasiven Vorgänge mehrere zehner Meter nicht überschreiten und bei weitem nicht die Auswirkungen mit sich bringen, die im Extremfall von tiefen Rinnenbildungen ausgehen.

Weiterhin ist zu beachten, dass die zusätzliche Eisaufast mit hoher Wahrscheinlichkeit ebenfalls keine oder kaum negativen Auswirkungen auf den rund 600 m tief liegenden ewG hat, weil eine zusätzliche Aufast im Deckgebirge bei einem verfüllten End- bzw. Tiefenlager tendenziell zu keiner erhöhten Durchlässigkeit für Lösungen, Rissbildungen oder Ähnlichem führt. Es ist auch nicht zu erwarten, dass die Spannungsänderungen infolge der Änderung der Eisaufast Einwirkungen auf den ewG haben (Goulder/IfG (2011)). Nach dem Rückzug des Eises wird eine Entlastung des Deckgebirges stattfinden, wobei sich die ursprünglichen Spannungsverhältnisse wieder einstellen werden.

Ergebnis: Die Eisüberfahung hat geringe Auswirkungen auf die RSF-Parameter des ewG. Es besteht ein hohes Vertrauen, dass die Auslegungsanforderungen für die RSF-Parameter Permeabilität, Porosität, Diffusivität und Sorption des ewG in Tonstein erfüllt werden (Bewertungsstufe 4).

(e) Tonstein – Ausdehnung des Wirtsgesteins um das Endlagerbergwerk, für die charakteristischen Eigenschaften der Sicherheitsfunktion des ewG gelten – Erfüllung der Auslegungsanforderungen für $t \geq 10.000$ a

Die Eisüberfahung ist ohne Bedeutung für den Erhalt des Wirtsgesteins, denn es bleibt vollständig erhalten. Zugleich sind die Auslegungsanforderungen hinsichtlich der vier oben unter (a), (b) (c) und (d) behandelten RSF-Parameter weitgehend erfüllt.

Ergebnis: Die Eisüberfahung hat keine Auswirkungen auf die Wirksamkeit der RSF-Parameter des ewG und seines umgebenden Wirtsgesteins. Es besteht ein hohes Vertrauen, dass die Auslegungsanforderungen an die Ausdehnung und Qualität des Wirtsgesteins im Tonstein erfüllt

werden (Bewertungsstufe 4). Voraussetzung dazu ist allerdings die Auswahl des Standortes nach dem Stand von Wissenschaft und Technik.

Eisüberfahung mit tiefer Rinnenbildung (400 m)

(a, b, c, d) Tonstein - Auswirkungen auf Gebirgspermeabilität, Porosität Diffusivität und Sorption - – Erfüllung der Auslegungsanforderungen für $t \geq 10.000$ a

Durch die Bildung einer 400 m tiefen Rinne verbleiben über der Einlagerungssohle noch knapp 200 m Gesteinskörper, von dem ca. 40 m zum Wirtsgestein Tonstein gehören (als Teil des ewG). Dies bedeutet, dass noch 160 m Wirtsgestein oberhalb des ewG verbleiben. Damit verschwinden zwei Drittel des nicht zum ewG gehörenden ursprünglichen Deckgebirges. Dadurch kann es zu Entlastungserscheinungen im verbleibenden Deckgebirge bzw. Wirtsgestein kommen, was wiederum zu Rissbildungen und zu Druckentlastungen im Wirtsgestein führen kann. Die auflagernde Eisschicht kann diesen Vorgang nicht kompensieren; es ist auch unklar, wie sich die Mächtigkeit der auflagernden Eisschicht im Zeitverlauf entwickelt.

Es muss damit gerechnet werden, dass die Werte für Gebirgspermeabilität und die Porosität zunehmen. Gleiches gilt für die Diffusivität. Sie ist eine im Hinblick auf Ausdehnung des ewG sehr sensitive Größe. Eine Erhöhung der Porendiffusionskoeffizienten um ca. eine halbe Größenordnung hat eine Erweiterung der erforderlichen Mindestmächtigkeit des ewG um das Endlager um mehrere 10 m zur Folge (GRS 2010-5). Insgesamt muss mit dem Verlust des Vorherrschens der Diffusion als dominierendem Transportmechanismus gegenüber der Advektion im ewG und dem weiteren Wirtsgestein gerechnet werden.

Radionuklidspezifische quantitative Anforderungen an die Sorptionseigenschaften des ewG bestehen nicht. Allerdings gilt die Forderung, dass für die kationischen Radionuklide eine praktisch vollständige sorptionsbedingte Rückhaltung am Tonstein des ewG besteht, eine Eigenschaft, die auch durch unsicherheitsbedingte Schwankungen der messtechnisch ermittelten Sorptionsparameter nicht in Frage gestellt werden kann. Für die hochmobilen Radionuklide wie beispielsweise Cl-36, C-14 oder I-129, die für die Abmessung des ewG auslegungsrelevant sind, bestehen hinsichtlich der Sorption ebenfalls keine Auslegungsanforderungen. In welchen Umfang die Sorption wegen der durch die tiefe Rinnenbildung verursachten veränderten Randbedingungen betroffen wird, muss offen bleiben. Jedenfalls werden kationische Radionuklide in Abhängigkeit von Sediment und Chemismus der Lösung zumindest teilweise sorbiert. Wir gehen von einem hohen Vertrauen auf die Wirksamkeit der Sorption aus.

Ergebnis: Das Vertrauen in die Erfüllung der Auslegungsanforderungen für $t \geq 10.000$ Jahren für den ewG in Tonstein bei tiefer Rinnenbildung ist für die vier RSF-Parameter Permeabilität, Porosität und Diffusivität nur mit mäßig zu bewerten (Bewertungsstufe 3). Lediglich das Vertrauen in die Sorption wird als hoch angesehen (Bewertungsstufe 4).

(e) Tonstein – Ausdehnung des Wirtsgesteins um das Endlagerbergwerk, für die charakteristischen Eigenschaften der Sicherheitsfunktion des ewG gelten – Erfüllung der Auslegungsanforderungen für $t \geq 10.000$ a

Die Eisüberfahung mit tiefer Rinnenbildung hat Folgen für die RSF-Parameter des ewG und das umgebende Wirtsgestein. Zwar wird der ewG rechnerisch nicht angegriffen, aber er wird wahrscheinlich unter der Druckentlastung seine Integrität zumindest teilweise verlieren und eine er-

höhte Durchlässigkeit aufweisen. Dieser partielle Integritätsverlust muss auch für das den ewG umgebende Wirtsgestein angenommen werden.

Ergebnis: Die tiefe Rinnenbildung hat negative Auswirkungen auf die Wirksamkeit der charakteristischen Eigenschaften der RSF-Parameter des den ewG umgebenden Wirtsgesteins. Deshalb wird das Vertrauen in die Erfüllung der entsprechenden Auslegungsanforderungen nur als mäßig bewertet (Bewertungsstufe 3).

FAZIT für Tonstein (s. Tab. E-11)

Insgesamt ist das Vertrauen in die Erfüllung der Auslegungsanforderungen für $t \geq 10.000$ Jahre für den ewG in Tonstein nur als mäßig anzusehen (s. Tab. E-11). Entscheidend für diese Bewertung ist die Tatsache, dass die tiefe Rinnenbildung die RSF-Parameter des ewG bzw. des den ewG umgebenden Wirtsgesteins wahrscheinlich negativ beeinflusst und somit den ewG insgesamt schwächt. Das große Vertrauen in die Charakterisierung der RSF-Parameter für den Ist-Zustand und den Zeitraum $t < 10.000$ Jahre kann wegen des Verbotes der Kompensation von Bewertungsergebnissen diese Bewertung nicht ändern. Im Falle einer alleinigen Eisüberfahung besteht allerdings ein hohes Vertrauen in die Erfüllung der Auslegungsanforderungen an die RSF-Parameter, da der ewG sehr wahrscheinlich nicht negativ beeinflusst wird.

KOMPONENTE ewG	Tonstein Vertrauen in die Erfüllung der Auslegungsanforderungen für die RSF-Parameter im Wirkzeitraum $t \geq 10.000$ Jahre	
RSF-Parameter	TE + TM Tonstein Eisüberfahung mit tiefer Rinnenbildung (400 m)	TE + TM Tonstein (nur Eisüberfahung, keine Rinnenbildung)
Permeabilität	3	4
Porosität	3	4
Diffusivität	3	4
Ermittlung der Ausdehnung des Wirtsgesteins um das Endlagerbergwerk, für die die charakteristischen Eigenschaften der Sicherheitsfunktion gelten	3	4
Sorption	4	4

Tab. E-11: Vertrauen in die Erfüllung der Auslegungsanforderungen für die RSF-Parameter bei Lagerung im Tonstein für den Wirkzeitraum $t \geq 10.000$ Jahre mit Eisüberfahung und tiefer Rinnenbildung (TE = Endlager, TM = Tiefenlager mit Monitoring u. Möglichkeit der Rückholbarkeit; 1 = sehr geringes/vernachlässigbares Vertrauen bis 5 sehr hohes Vertrauen).

E.5 Zusammenführung der Einzelbewertungen zur Robustheit der radionuklidrückhaltenden Sicherheitsfunktionen des ewG

In diesem letzten Arbeitsschritt werden die Robustheiten der radionuklidrückhaltenden Sicherheitsfunktionen der Systemkomponente ewG über die verschiedenen Wirkzeiträume ($t < 10.000$ Jahre bis ≥ 10.000 Jahre) sowohl für Steinsalz als auch für Tonstein durch Aggregation ermittelt. Diese Robustheit lässt sich ausdrücken als Vertrauen in die Wirksamkeit der rückhaltenden Sicherheitsfunktionen der Komponente Versatz für End- bzw. Tiefenlager in Salz und Tonstein über die hierbei zu betrachtenden beiden Wirkzeiträume.

Aufgrund der engen Verflechtung von Abhängigkeiten ist eine **Kompensation** besserer oder schlechterer Bewertungen von Parametern nicht möglich, entscheidend für die Gesamtbewertung ist der Parameter, zu dem das **geringste Vertrauen** besteht bzw. der die schlechteste Einzelbewertung erhält. Die Ermittlung der Robustheit geschieht durch Aggregation der RSF-Parameter der einzelnen Sicherheitsfunktionen (s. Tab. E-2 bis E-11) über die drei Bewertungsfelder (s. Kap. E.1) hin zu einer Gesamtaussage der Robustheit für jede einzelne Sicherheitsfunktion des ewG.

Das Ergebnis besteht in der Robustheit der dem ewG zugeordneten Sicherheitsfunktionen für Lagerung in Salz- und Tonstein für die unterschiedlichen Wirkzeiträume (s. Tab. E-12). Eine weitere Aggregation über die Ebene der Sicherheitsfunktionen hinaus ist nicht sinnvoll, weil dadurch keine weiteren Informationen gewonnen werden, vielmehr der Detailblick auf die Sicherheitsfunktionen verloren geht.

Robustheit der Systemkomponente ewG				
Radionuklidrückhaltende Sicherheitsfunktionen	Salz (steile u. flache Lagerung) ewG TE + TM		Tonstein ewG TE + TM	
Wirkzeiträume	$t < 10.000 \text{ a}$	$t \geq 10.000 \text{ a}$	$t < 10.000 \text{ a}$	$t \geq 10.000 \text{ a}$
Begrenzung/Verhinderung Lösungsbewegung u. RN-Transport	Ro4	Ro4 (steile L.) Ro5 (flache L.)	Ro4	Ro3
Verzögerte RN-Ausbreitung durch Sorption	n.b.	n.b.	Ro5	Ro4

Tab E-12: Zusammenfassende Bewertung der Robustheit der rückhaltenden Sicherheitsfunktionen für die Systemkomponente ewG für unterschiedliche Wirkzeiträume (TE= Endlager, TM=Tiefenlager mit Monitoring und Möglichkeit der Rückholbarkeit; Bewertung: Ro1 = vernachlässigbare/sehr geringe Robustheit bis Ro5 sehr hohe Robustheit; n.b. = nicht bewertet;).

Hinweise zur Bewertung der radionuklidrückhaltenden Sicherheitsfunktionen:

Die Aggregation der Einzelbewertungen der RSF-Parameter zu einem Gesamturteil der Robustheit der zugehörigen Sicherheitsfunktionen des ewG für die jeweiligen Wirtsgesteine führt bei beiden

Wirtsgesteinen bis auf eine Ausnahme zu einem recht einheitlichen Urteil, nämlich einer hohen (System-)Robustheit. Bei der Ausnahme handelt es sich um die Auswirkung einer tiefen Rinnenbildung auf eine wesentliche Sicherheitsfunktionen bei Tonstein, für die nur eine mäßige Robustheit ermittelt wurde. Dies führt zu einem Robustheitsdefizit der Sicherheitsfunktion für Tonstein für den Zeitraum ≥ 10.000 Jahre (s. Bericht, Tab. 18).

Ansonsten ist das Vertrauen in die Charakterisierbarkeit der RSF-Parameter des ewG im Ist-Zustand für Steinsalz hoch und für Tonstein sehr hoch zu bewerten; Salz in flacher Lagerung liegt in seiner Bewertung dazwischen (s. Tab. E-3).

Die Auswirkungen der beispielhaft herangezogenen internen Systementwicklungen Gas und Wärme auf die RSF-Parameter des ewG bei Salz und Tonstein sind für den Wirkzeitraum $t < 10.000$ Jahre als gering oder sehr gering zu bewerten (s. Tab. E-4 u. E-6). Dies spricht für eine hohe Robustheit des ewG beider Wirtsgesteine für den zu Grunde gelegten Wirkzeitraum.

Für den Wirkzeitraum $t \geq 10.000$ Jahre ist der Einfluss externer klimatischer Entwicklungen entscheidend für die Bewertung der Robustheit des ewG. Dies gilt vor allem für die Tiefenwirkung bei der Rinnenbildung, für die ja nur begründete Annahmen getroffen werden können. Betroffen sind insbesondere Tonsteinvorkommen in Norddeutschland, soweit sie in Regionen liegen, bei denen bei Ansatz des Aktualismusprinzips eine tiefe Rinnenbildung angenommen werden muss. Hier ist eine mäßig hohe Auswirkung auf die zugehörigen RSF-Parameter der Sicherheitsfunktion feststellbar (s. Tab. E-7), die Lösungsbewegung und/oder Radionuklidtransport beschreibt.

Für den Wirkzeitraum $t \geq 10.000$ Jahre besteht zwischen Salz und Tonstein ein erkennbarer Unterschied, was die Prognostizierbarkeit der einwirkenden Kräfte auf die RSF-Parameter angeht. Bei Salz liegen alle Bewertungen im Bereich geringer oder sehr geringer Einwirkungen, bei Tonstein jedoch im Bereich mäßig hoher Einwirkungen, soweit es die RSF-Parameter betrifft, die entscheidend sind für ein diffusives oder ein advektives Transportregime. Hier ist zu beachten, dass das Ergebnis der Einzelbewertung davon abhängt, bis zu welcher Tiefe die Rinnenbildung wirkt. Man kann dafür nur einen plausiblen Wert annehmen. Letztlich hängt der Einfluss von tiefen Rinnen auf den ewG vom Verhältnis der Tiefenlage des Lagers zur Tiefenwirkung der Rinne ab. Daraus resultiert der Zielkonflikt zwischen Tiefenlage des Lagers (insbesondere bei Tonstein mit Ausbau) und vermuteter Rinnentiefe.

Anders ist die Situation bei flachlagerndem Salz. In Bereichen mit für die Lagerung potenziell geeigneten flachlagernden Salzvorkommen kann nach derzeitigem Kenntnisstand keine Rinnenbildung stattfinden, woraus eine hohe Robustheit für den ewG bei flachlagerndem Salz für den Wirkzeitraum $t \geq 10.000$ Jahre resultiert.

Die Bewertungen des Vertrauens in die Erfüllungen der Auslegungsanforderungen der RSF-Parameter für den ewG fallen recht einheitlich aus. Für den Wirkzeitraum $t < 10.000$ Jahre sind die Ergebnisse für die RSF-Parameter in Salz und Tonstein durch hohe bis sehr hohe Vertrauenswerte gekennzeichnet (s. Tab. E-8 u. E-10). Für $t \geq 10.000$ Jahre gilt das Gleiche (s. Tab. E-9). Lediglich beim Tonstein mit tiefer Rinnenbildung ist ein nur mäßiges Vertrauen in die Erfüllung der Auslegungsanforderungen für die RSF-Parameter des ewG festzustellen (s. Tab. E-11).

Zusammenfassend ergibt sich insgesamt für den Wirkzeitraum < 10.000 Jahre eine hohe Robustheit der Sicherheitsfunktionen für den ewG in Salz und Tonstein. Dies gilt auch für Sicherheitsfunktionen des ewG in Salz für den Wirkzeitraum ≥ 10.000 Jahre. Lediglich für Tonstein besteht im Wirkzeitraum $t \geq 10.000$ Jahre nur eine mäßige (System-)Robustheit für die Sicherheitsfunktion,

die das Transportregime im ewG beschreibt. Der wesentliche einwirkende Faktor, der langfristig die Robustheit gefährden kann, ist die tiefe Rinnenbildung.

E.6 Quellen zu Anhang E

ANSICHT (2017): Sicherheits und Nachweiskonzept für ein Endlager in Tongestein in Deutschland – Synthesebericht.- Koordinator: Jobmann, Michael, gemeinsame Bearbeitung durch GRS, BGR, DBEtec.- Auftraggeber: KIT (PTKA-WTE) FKZ: 02E11061A/B, Bericht TEC-19-2016-AB, Stand 30.03.2017.

Arbeitsbericht C (2016): Identifizierung beispielhafter Szenarien äußerer Einwirkungen auf die Entria- Referenzmodelle im Rahmen ihrer vergleichenden Bewertung mit Hilfe von Sicherheitsfunktionen und Robustheitsdefiziten. Arbeit im Rahmen von Entria.- Autoren: Kreusch, J. & Neumann, W., intac GmbH, Hannover, August 2016 (unveröff.).

Bauer, G. (1991): Kryogene Klüfte in norddeutschen Salzdiapiren?.-Zbl. Geol. Paläont. Teil I, H. 4: 1247-1261.

BGR – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2014): F+E Endlagerung. Verbreitung, Zusammensetzung und geologische Lagerungsverhältnisse flach lagernder Steinsalzfolgen in Deutschland.- Zwischenbericht v 10.12.2014, Förderkennzeichen 9Y2013030000, Autoren: Reinhold, K., Hammer, J., Pusch, M.; Hannover.

BGR – Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2007): Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen Deutschlands – Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen. – Bericht, Autoren: Hoth, P., Wirth, H., Reinhold, K., Bräuer, V., Krull, P. & Feldrappe, H., Berlin, Hannover.

BMU (2010): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle, Stand 30. September 2010. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.

ENTRIA-AB-03 (2015): Entria Arbeitsbericht-03 „Generische Tiefenlagermodelle mit Option zur Rückholung der radioaktiven Reststoffe: Geologische und Geotechnische Aspekte für die Auslegung“.- Bearbeiter: Stahlmann, J., Leon-Vargas, R., Mintzlaff, V.; Braunschweig, 2015.

Faulkner, D. et al. (2003): The effect of temperature, the nature of the pore fluid, and subyield differential stress on the permeability of phyllosilicate-rich fault gouge, Autoren: Faulkner, D., Rutter, E., Faulkner, D. R.- Journal of Geophysical Research, Bd. 108, B5, DOI 10.1029/2001JB001581, 2003.

Goulder/IfG (2011): Glazigene Beeinflussung von Wirtsgesteinstypen Ton und Salz und deren Einflüsse auf die Eignung zur Aufnahme eines HAW-Endlagers- Abschlussbericht.- Im Auftrag der Bundesanstalt für Strahlenschutz, 292 S., Golder Associates GmbH in Kooperation mit IfG Institut für Gebirgsmechanik GmbH, Celle, 10.10.2011.

GRS - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH (2016): Wärmeentwicklung / Gesteinverträglichkeit – Bericht der GRS im Auftrag der AG 3 der Kommission Lagerung hoch radioaktiver Abfallstoffe K-Mat 64.- Autoren: A. Meleshyn T. Weyand G. Bracke H. Kull K. Wiczorek; Mai 2016

- GRS Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH (2012): Bracke, G., Popp, T., Püttmann, W., Kienzler, B., Lommerzheim, A., Moog, H.C.: Berücksichtigung der Kohlenwasserstoffvorkommen in Gorleben. Bericht der Arbeitsgruppe "Kohlenwasserstoffe", Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-285, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, 99 S., ISBN 978-3-939355-61-8: Köln, 2012.
- GRS – Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH (2010): Abwägungsmethodik für den Vergleich von Endlagersystemen in unterschiedlichen Wirtsgesteinsformationen. Anleitung zur Anwendung der Abwägungsmethodik.- Abschlussbericht zum Vorhaben 3607R02589 „Evaluierung der Vorgehensweise“; Bericht GRS – A – 3536; Autoren: Fischer-Appelt, K. & Baltes, B., Dezember 2010, Köln.
- GRS – Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH (2010-5): Abwägungsmethodik für den Vergleich von Endlagersystemen in unterschiedlichen Wirtsgesteinsformationen - Bewertung der charakteristischen Parameter rückhaltenden Sicherheitsfunktionen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs ewG, 79 S.- Begleitbericht zum Vorhaben 3607R02589 VerSi „Evaluierung der Vorgehensweise“, Bericht GRS A 3536, Köln.
- GRS - Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbH (2007): Thermal effects on the opalinus clay. A joint heating experiment of ANDRA and GRS at the Mont Terry URL (HE-D project). Autor: Zhang, C.L. Final report. BMWA-Vorhaben, FKZ 02E9773, GRS-224, 196 S., ISBN 978-3-931995-98-0, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: Braunschweig, 2007.
- Kull, H et al. (2007): Measurement of thermally-induced pore-water pressure increase and gas migration in the Opalinus Clay at Mont Terri.- Autoren: Kull, H., Jockwer, N., Zhang, C.-L., Wileveau, Y., Pepa, S.- Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, Bd. 32, 8-14, S. 937–946, DOI 10.1016/j.pce.2006.04.036, 2007.
- Lux, KH., Wolters, R., Zhao, J, Rutenberg, M, Feierabend, J., Pan, T. (2017): TH2M-basierte multiphysikalische Modellierung und Simulation von Referenz-Endlagersystemen im Salinar- und Tonsteingebirge ohne bzw. mit Implementierung einer Möglichkeit für ein direktes Monitoring des längerfristigen Systemverhaltens auch noch nach Verschluss der Einlagerungssohle. - Ein Beitrag zur Verbesserung der Robustheit von Sicherheitsfunktionen mit sehr hoher Relevanz im Hinblick auf die Entwicklung von Bewertungsgrundlagen zum Vergleich von Entsorgungsoptionen.- Arbeitsbericht der ENTRIA-Teilprojekte VP 5.1 und VP 5.2 sowie VP 6.7mod – Februar 2017, Lehrstuhl für Deponietechnik und Geomechanik, TU Clausthal, Stand Februar 2017.
- Nagra (2002): Projekt Opalinuston - Konzept für die Anlage und den Betrieb eines geologischen Tiefenlagers. Entsorgungsnachweis für abgebrannte Brennelemente, verglaste hochaktive sowie langlebige mittelaktive Abfälle.- Technischer Bericht 02-02, Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle, Wettingen/Schweiz, Dezember 2002.
- Popp, T et al. (2007): Untersuchungen zur Barriereintegrität im Hinblick auf das Ein-Endlager-Konzept, Abschlussbericht der Vorhabens.- Bearbeiter: Popp, T., Wiedemann, M., Böhnelt, H., Minkley, W., Manthei, G.: SR 2470, Institut für Gebirgsmechanik (IFG) GmbH: Leipzig, 1. Januar 2007.

- Schreiber, U., Ewert, T., Jentzsch, G. (2015): Geologische Potentiale zur Einlagerung von radioaktiven Abfallstoffen unterhalb von stratiformen Salzformationen - Konzeptstudie für ein alternatives Endlagermodell.- Universität Duisburg-Essen, 22.04.2015.
- Stakebrandt, W., Ludwig, A. O. & Ostaficzuk, S. (2001): Base of Quaternary deposits of the Baltic Sea depression and adjacent areas (map 2). - In: Garetsky, R. G., Ludwig, A. O., Schwab, G. & Stackelbrandt, W. (eds.): Neogeodynamics of the Baltic Sea Depression and Adjacent Areas. Results of IGCP Project 346.- Brandenburgische Geowiss. Beiträge, 8, 1: 13-19, 2 Fig.; Kleinmachnow.