

Abwägungsmethodik für den Vergleich von Endlagersystemen in unterschiedlichen Wirtsgesteinsforma- tionen

Abschlussbericht zum Vorhaben
3607R02589 VerSi „Evaluierung
der Vorgehensweise“



Gesellschaft für Anlagen-
und Reaktorsicherheit
(GRS) mbH

Abwägungsmethodik für den Vergleich von Endlagersystemen in unterschiedlichen Wirtsgesteinsformati- onen

Anleitung zur Anwendung der Abwägungsmethodik

Abschlussbericht zum Vorha-
ben 3607R02589 VerSi „Evalu-
ierung der Vorgehensweise“

Abwägungsmethodik für den
Vergleich von
Endlagersystemen in
unterschiedlichen
Wirtsgesteinsformationen

Anleitung zur Anwendung der
Abwägungsmethodik

Abschlussbericht zum Vorhaben
3607R02589 VerSi
„Evaluierung der Vorgehensweise“

Autoren:
K. Fischer-Appelt
B. Baltés

Dezember 2010

Auftrags-Nr.: 845700

Anmerkung:

Das diesem Bericht zu Grunde liegende FE-Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit finanziert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Kurzfassung

Der vorliegende Bericht beinhaltet die Darstellung der Arbeiten zum VerSi-Vorhaben 3607R02589 bestehend in der Entwicklung eines verbal-argumentativen Abwägungsverfahrens zum sicherheitsgerichteten Vergleich von Endlagersystemen in verschiedenen Wirtsgesteinsformationen. Die vorgestellte Abwägungsmethodik zielt auf die Robustheit der Sicherheitsfunktionen als übergeordnetes Vergleichskriterium ab. Durch die Anwendung der Methodik im Rahmen eines zukünftigen Standortauswahlverfahrens können Entscheidungen systematisch erarbeitet und nachvollziehbar begründet werden.

Der Bericht umfasst die Darstellung, Erläuterung und Begründung der schrittweisen Vorgehensweise. Anhand der Kriterien Charakterisierbarkeit und Prognostizierbarkeit von Parametern der Sicherheitsfunktionen wird das Vertrauen in die Erfüllung der konzeptionellen Anforderungen an die verschiedenen geotechnischen Verschlusskomponenten sowie an den einschlusswirksamen Gebirgsbereich als übergeordnetes Robustheitsmaß systematisch bewertet. Durch die Aggregation dieser Bewertungen wird die Robustheit der Endlagersystemen ermittelt und ein Vergleichsmaßstab hergestellt.

Abstract

This report contains a description of the work in connection with VerSi project 3607R02589, consisting of the development of a verbal-argumentative weighting procedure regarding the safety-oriented comparison of repository systems in different host rock formations. The weighting method presented concentrates on the robustness of the safety functions as the overriding criterion of comparison. By applying this method as part of a future site selection procedure, it will be possible to come to decisions in a systematic manner and justify them comprehensibly.

The report presents, explains and justifies the stepwise procedure. Confidence in the fulfilment of the conceptual requirements for the different geological sealing components as well as for the isolating rock zone as an overriding measure of robustness are systematically assessed by applying the criteria of characterisability and predictability of the safety function parameters. By aggregation of these assessments, the robustness of the overall repository systems is determined and a standard of comparison established.

Inhalt

1	Einleitung	1
2	Definitionen	3
2.1	Zielsystem	3
2.2	Sicherheit	4
2.3	Robustheit	5
2.4	Sicherheitsfunktionen und zusätzliche Sicherheitswirkungen	6
2.5	Weitere Definitionen	8
2.6	Projektinterne Festlegungen	9
3	Methodische Grundlagen	11
3.1	Verfahren zur vergleichenden Bewertung	11
3.2	Vergleichende Bewertung bei der Standortauswahl	13
3.3	Vergleichende Bewertung von Endlagersystemen auf Grundlage ihrer Robustheit	14
4	Abwägungsmethodik und Standortauswahlverfahren	19
4.1	Einbettung der Abwägungsmethodik in ein Standortauswahlverfahren	19
4.2	Anforderungen an den Umfang der Standorterkundung	21
4.3	Beitrag von Langzeitsicherheitsanalysen für den Endlagersystemvergleich	23
5	Sicherheits- und Endlagerkonzepte der zu vergleichenden Endlagersysteme	25
5.1	Sicherheitskonzepte	25
5.1.1	Sicherheitskonzept für Endlagersysteme in steil stehenden Steinsalzformationen	25
5.1.2	Sicherheitskonzept für Endlagersysteme in Tonsteinformationen	26
5.2	Einlagerungs- und Verschlusskonzepte	27
5.2.1	Einlagerungs- und Verschlusskonzept Steinsalzstandort Gorleben	28
5.2.2	Einlagerungs- und Verschlusskonzept für den Tonsteinsandort	29
5.2.3	Einteilung der Endlagersysteme in Komponenten und Kompartimente	32

6	Die Abwägungsmethodik im Überblick.....	34
7	Verfahrensschritt 1: Synoptischer Sachstandsbericht	44
8	Verfahrensschritt 2: Ableitung von Sicherheitsfunktionen und Aufbereitung für den Endlagersystemvergleich	46
9	Verfahrensschritt 3: Relevanzwichtung der Sicherheitsfunktionen... 49	
9.1	Einteilung in Relevanzklassen	49
9.2	Praktische Vorgehensweise	51
9.2.1	Steinsalz.....	54
9.2.2	Tonstein	55
9.3	Einteilung in Wirkungsphasen.....	56
9.3.1	Übergangsphase ($t < 10.000$ a)	57
9.3.2	Stationäre Langzeitphase ($t > 10.000$ a).....	58
9.4	Ergebnis	58
10	Verfahrensschritt 4: Globale Standortcharakterisierung	60
11	Verfahrensschritt 5: Ermittlung der Robustheit der rückhaltenden Sicherheitsfunktionen	63
11.1	Übersicht	63
11.2	Verfahrensschritt 5a: Identifizierung der die relevanten Sicherheitsfunktionen charakterisierenden Parameter	69
11.3	Verfahrensschritt 5b: Ermittlung des Vertrauens in die Charakterisierung des Ist-Zustandes der die RSF charakterisierenden materiellen Ei-genschaften (Parameter)	72
11.3.1	Teilschritt a): Charakterisierbarkeit der Parametergröße in Abhängigkeit von der Untersuchungsmethode	76
11.3.2	Teilschritt b): Räumliche Charakterisierbarkeit der Parametergröße	77
11.3.3	Teilschritt c): Aussagesicherheit aufgrund des Untersuchungsaufwandes unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus Teilschritt b).....	78
11.3.4	Aggregation der Bewertungen aus den Teilschritten a) bis c).....	79

11.4	Verfahrensschritt 5c: Ermittlung der Prognostizierbarkeit der RSF-Parameter und der einwirkungsbedingten Auswirkungen auf den RSF-Parameter	80
11.4.1	Erläuterungen und Prämissen.....	80
11.4.2	Methodische Vorgehensweise	91
11.4	Verfahrensschritt 5d: Ermittlung des Vertrauens in die Erfüllung der Auslegungsanforderungen an die RSF-Parameter über den Nachweiszeitraum (Gesamtrobustheit des RSF-Parameters)	97
11.5	Verfahrensschritt 5e: Ermittlung der Robustheit der rückhaltenden Sicherheitsfunktion (RSF)	106
12	Verfahrensschritt 6: Korrelation Relevanz-Robustheit.....	111
13	Verfahrensschritt 7: Ergebnisanalyse.....	116
13.1	Vorgehensweise.....	116
13.2	Abschließende Bemerkungen	125
14	Literatur.....	129
15	Anhänge.....	134
15.1	Anhang 1: Auflistung der integritätsbewahrenden und rückhaltenden Sicherheitsfunktionen.....	135
15.2	Anhang 2: Ergebnisse der Relevanzwichtung	145
15.3	Anhang 3: Ergebnisse der globalen Standortcharakterisierung.....	156
15.4	Anhang 4: Identifizierung der die rückhaltenden Sicherheitsfunktionen charakterisierenden Parameter	168
15.5	Anhang 5: Korrelation Relevanz-Robustheit.....	173
15.6	Anhang 6: Beispielhafte Bewertung beider Endlagersysteme	177
15.6.1	Streckenversatz der Einlagerungsbereiche und der Restgrube des Steinsalzstandortes Gorleben	177
15.6.2	Abdämmungen zu den Einlagerungsbereichen des Steinsalzstandortes Gorleben	184
15.6.3	Streckenabdichtungen des Steinsalzstandortes Gorleben.....	189

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Phasen der Erkundung in einem Standortauswahlprozess und Einsatzzeitpunkte für das Abwägungsverfahren für den Endlagersystemvergleich.....	19
Abb. 2: Schematische Struktur des Einlagerungskonzeptes für den Steinsalzstandort Gorleben (aus /GRS 10c/ verändert nach /DBE 98/).....	28
Abb. 3: Schematische Darstellung des Einlagerungs- und Verschlusskonzeptes für den Tonsteinstandort /GRS 10a/.	30
Abb. 4: Schematische Darstellung der Kompartimente und Komponenten eines Endlagersystems. Die rote Linie umfährt das Endlagerbergwerk, der einschlusswirksame Gebirgsbereich wird von der grünen Linie begrenzt. WG = weiteres Wirtsgestein(im Sinne dieses Berichtes).	32
Abb. 5: Überblick über die Einzelschritte der verbal-argumentativen Abwägungsmethodik für den Endlagersystemvergleich. (SF: Sicherheitsfunktion, RSF: Rückhaltende Sicherheitsfunktion, ISF: Integritätsbewahrende Sicherheitsfunktion, SR 2580: VerSi Teilvorhaben: „Szenarientwicklung“ 3607R02580; SR 2538: VerSi Teilvorhaben: „Planerische Grundsatzfragen“ 3607R02538, WS 2044: VerSi Teilvorhaben: „Vergleichende Langzeitsicherheitsanalysen“).	34
Abb. 6: Beispielhafte Darstellung eines Auszugs aus dem synoptischen Sachstandsbericht /GRS 10d/, der im Vorhaben VerSi erarbeitet wurde. Dargestellt sind die Konzepte zur Abdichtung der Zugangsschächte (links: Verschlusskonzept Gorleben; rechts Verschlusskonzept zum generischen Tonsteinstandort).....	45
Abb. 7: Ungefähre Wirkungszeiträume der verschiedenen Endlagerkomponenten.	57
Abb. 8: Arbeitsschritte zur Ermittlung des Vertrauens in die Charakterisierung zum Ist-Zustand.....	65
Abb. 9: Arbeitsschritte zur Bewertung der Prognostizierbarkeit und der Systemrobustheit einschließlich der Aggregation der Robustheitsbewertungen zu den RSF-Parametern auf die Ebene der zugehörigen Sicherheitsfunktion.	65
Abb. 10: Aufgliederung der rückhaltenden Sicherheitsfunktionen in zugehörige Parameter	69
Abb. 11: Rückhaltende Sicherheitsfunktionen und zugehörige Parameter für die Komponente einschlusswirksamer Gebirgsbereich.....	71

Abb. 12: Teilschritte zur Ermittlung des Vertrauens in die Charakterisierung eines RSF-Parameters für den Ist-Zustand.	73
Abb. 13: Teilschritte zur Ermittlung der Prognostizierbarkeit eines RSF-Parameters und der Auswirkungen auf den RSF-Parameter durch interne und/oder externe Einwirkungen. SR 2580: Ergebnisse des VerSi-Teilvorhabens „Szenarienermittlung“	84
Abb. 14: Schematische Darstellung der Auswirkungen von Unsicherheiten bei Charakterisierung und Prognose (Prozessverständnis) der durch interne oder externe Einwirkungen hervorgerufenen Parameteränderungen.	88
Abb. 15: Schematische Darstellung der Veränderung eines Parameterwertes infolge veränderter externer Randbedingungen als Maß für die Systemrobustheit. ..	90
Abb. 16: Teilschritte zur Ermittlung des Vertrauens in die Erfüllung der Auslegungsanforderungen an die RSF-Parameter über den Nachweiszeitraum.	97
Abb. 17: Verhältnis Parameterwert und –spannweite zur Auslegungsmindestanforderung.	98
Abb. 18: Teilschritte zur Ermittlung der Robustheit der rückhaltenden Sicherheitsfunktion über den Nachweiszeitraum.	106
Abb. 19: Matrix zur Ableitung von Robustheitsdefiziten (rote Zahlen) einer Sicherheitsfunktion aus ihrer Relevanz und der Einordnung ihrer Robustheit	112
Abb. 20: Schematische Darstellung einer Relevanz-Robustheitskorrelation mit Hinweisen auf systematische Robustheitsdefizite	114
Abb. 21: Verbreitung elsterzeitlicher Rinnensysteme dargestellt durch die Tiefenlage der Quartärbasis. Aus /BGR 09/.	Fehler! Textmarke nicht definiert.
Abb. 22: Stratigraphische Gliederung des synthetischen Tonsteinstandortes. Aus /GRS 10d/.	Fehler! Textmarke nicht definiert.

1 Einleitung

Vom BfS wurde im Jahre 2007 das Verbundprojekt "Durchführung vergleichender Sicherheitsanalysen für Endlagersysteme zur Bewertung der Methoden und Instrumentarien" VerSi initiiert, dessen übergeordnete Zielsetzung die Entwicklung von Vergleichsgrößen, Methoden und Werkzeugen für den Vergleich von Endlagerstandorten auf der Basis von Langzeitsicherheitsanalysen zu unterschiedlichen Endlagersystemen in unterschiedlichen Wirtsgesteinstypen ist. Ziel ist es, wissenschaftlich-technische Grundlagen für einen sicherheitsgerichteten, methodisch systematischen und transparenten Vergleich zwischen dem Standort Gorleben und alternativen generischen Standorten in einer Tonsteinformation oder Salinarstruktur zu erarbeiten. Mit dieser übergeordneten Zielsetzung - eine Voraussetzung für einen späteren realen Vergleich wirtsgesteinsverschiedener Endlagersysteme - verknüpft das Verbundprojekt VerSi die in Bezug auf die übergeordnete Zielsetzung aufeinander aufbauenden GRS-Eigenforschungsvorhaben 3607R02538 (Planerische Grundsatzfragen zur Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen /GRS 10a/), 3607R02580 (Entwicklung von Szenarien/GRS 10b/) und 3607R02589 (Evaluierung der Vorgehensweise). Weiterhin liefert das BfS-Auftragsforschungsvorhaben WS 2044 (Langzeitsicherheitsanalysen für den Vergleich von Endlagersystemen /GRS 10c/) Ergebnisse modellgestützter Langzeitsicherheitsrechnungen.

Der vorliegende Bericht stellt die Arbeitsergebnisse des VerSi-Vorhabens 3607R02589 vor. In diesem Projekt wurde von der GRS eine verbal-argumentative Abwägungsmethodik entwickelt, mit Hilfe derer Endlagersysteme in verschiedenen Wirtsgesteinsformationen aus sicherheitstechnischer Sicht im Zuge eines späteren Standortauswahlverfahrens verglichen werden können. Basis des Vergleichs und der Abwägung ist für die jeweiligen Endlagersysteme die Sicherheit der Endlagerung in der Nachverschlussphase. Es wird im Grundsatz davon ausgegangen, dass bei den zum Vergleich stehenden Endlagersystemen keine Erkenntnisse bestehen, die gegen eine Genehmigungsfähigkeit aus sicherheitstechnischer Sicht sprechen. Aus diesem Grund wird ein der sicherheitstechnischen Eignung übergeordnetes Kriterium – die Robustheit – als Vergleichsmaßstab herangezogen. Hierunter wird die Unempfindlichkeit der Endlagersysteme gegenüber zukünftigen Einwirkungen auf deren Sicherheitsfunktionen sowie das Vertrauen in die Charakterisierung und Prognose der sicherheitsgerichteten Parameter verstanden. Anhand einer schrittweise geführten Methodik wird entlang verschiedener Kriterien die Robustheit von Sicherheitsfunktionen anhand ihrer wesentlichen Parameter bewertet.

Auf dieser Basis werden „Robustheitsdefizite„ der zu vergleichenden Endlagersysteme identifiziert, die im letzten Schritt weiter analysiert werden.

Im vorliegenden Bericht werden methodische und verfahrenstechnische Randbedingungen und Voraussetzungen für das verbal-argumentative Abwägungsverfahren dargelegt. Weiterhin enthält der Bericht eine ausführliche Anleitung und Begründung der schrittweisen methodischen Vorgehensweise bei der Bewertung der Relevanz und Robustheit von Sicherheitsfunktionen. Die jeweiligen Verfahrensschritte werden durch Beispiele illustriert. Die Ergebnisse der Verfahrensschritte sind im Anhang tabellarisch zusammengestellt. Eine Ausnahme stellen die Einzelbewertungen der Robustheit der Parameter von Sicherheitsfunktionen der verschiedenen Endlagerkomponenten im Verfahrensschritt 5 dar. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurden hierzu separate Einzelberichte verfasst, die auf der beiliegenden CD-ROM enthalten sind.

2 Definitionen

2.1 Zielsystem

Die Gesamtheit der Ziele, die einem alternativen Vergleich zu Grunde liegen, gleichsam der „Blickwinkel“ unter dem die vergleichende Bewertung aber zuvor auch der Vergleich selbst vorgenommen wird, wird als „**Zielsystem**“ bezeichnet /APP 09/. Das Zielsystem bestimmt, welche Art von Eigenschaften und Gesichtspunkten dem Vergleich von Alternativen zu Grunde gelegt werden. Das Zielsystem ergibt sich aus der Veranlassung unter der der Auswahlprozess geführt wird. Je nach gewähltem Zielsystem müssen verschiedene Endlagersysteme - unabhängig von der Bewertungsmethode - unterschiedlich bewertet werden /APP 09/.

Durch die klare **Formulierung des Zielsystems** können Begründungen für die Entscheidung transparent dargelegt werden. Möglich ist auch eine Differenzierung in Haupt- und Nebenziele /APP 09/.

Ein klares Zielsystem ist außerdem Voraussetzung für die **sachgerechte Auswahl und Gewichtung der Kriterien** aus der Gesamtmenge der Merkmale der zu beurteilenden Alternativen. Von der Auswahl der Kriterien und der Formulierung ihrer "Zielerfüllungsfunktionen" zur Bewertung der Ausprägung des jeweiligen Merkmals hängt das Ergebnis des Bewertungsvorgangs maßgeblich mit ab. Hieraus ergibt sich die Anforderung nach der **Begründung der Kriterienauswahl** /APP 09/ (zu den methodischen Grundlagen vgl. auch Kap. 3).

Prinzipiell gehört die Formulierung des Zielsystems zu den **subjektiven Elementen** in einem Entscheidungsprozess. Dennoch besteht die Notwendigkeit auch im Vorfeld der Darstellung objektiver Sachverhalte und Eigenschaften im Rahmen eines synoptischen Sachstandsberichtes das Zielsystem festzulegen, da das Zielsystem bestimmt, welche Eigenschaften der Endlagersysteme vergleichend einander gegenübergestellt werden. Ziel des synoptischen Sachstandsberichtes ist es, die sicherheitsrelevanten Eigenschaften beider Endlagersysteme in Salz und Tonstein systematisch zu erfassen, für beide Standorte gegenüberzustellen und die entsprechenden Sicherheitsfunktionen unter Berücksichtigung ihrer zeitabhängigen Wirkung abzuleiten. Inhaltlich weist der synoptische Bericht noch keine (subjektiven) vergleichenden Wertungen oder Abwägungen auf, son-

dern es steht eine **wertungsneutrale** und **objektive Sachstandsgegenüberstellung** im Vordergrund.

Es ist zu beachten, dass die Festlegung des Zielsystems **unmittelbare Festlegungen für das Gesamtprojekt VerSi** enthält, da sie die Basis für die zu entwickelnde Vergleichsmethodik bildet und damit möglicherweise einem späteren operativen Endlagersystemvergleich zu Grunde liegt. Im vorliegenden Fall wird das Zielsystem folgendermaßen definiert:

Das Zielsystem besteht im Vergleich zweier genehmigungsfähiger Endlagersysteme mit dem Ziel, das im Hinblick auf den Radionuklidein-schluss zu bevorzugende Endlagersystem transparent auszuwählen.

2.2 Sicherheit

Grundlegendes Ziel des Vorhabens VerSi ist die Entwicklung einer Systematik für einen Vergleich von zwei Endlagersystemen in unterschiedlichen Wirtsgesteinsformationen im Hinblick auf ihre **Sicherheit in der Phase nach Verschluss**. Problematisch ist zunächst, dass im deutschen Sprachgebrauch der Ausdruck „Sicherheit“ mehrere Bedeutungen hat. So steht der Begriff beispielsweise für die Sicherheit im technischen Sinne („safety“), die Sicherheit gegenüber vorsätzlichen Einwirkungen Dritter („security“), die Gewissheit („Assurance“), die Zuverlässigkeit („reliability“) oder der als Antonym zu „Unsicherheit“ („certainty“). Im vorliegenden Fall wird „Sicherheit“ im technischen Sinne verstanden. Hierdurch wird in etwa der Zustand der „Gefahrlosigkeit“ bezeichnet, im Sinne des im englischsprachigen Raum verwendeten Begriffs „**safety**“.

Sicherheit in diesem Sinne bezeichnet einen Zustand, der **frei von unvertretbaren Risiken** ist [Quelle: *DIN 2002, ISO/IEC Guide 51: 1999, Def. 3.1*], wobei unter **Risiko** die „Kombination von **Wahrscheinlichkeit** und **Schweregrad** des Auftretens eines Schadens, d.h. einer physischen Verletzung oder gesundheitlichen Schädigung von Menschen oder Schädigung von Gütern und Umwelt“ zu verstehen ist [Quelle: *DIN 2002, ISO/IEC Guide 51: 1999, Def. 3.2, 3.3*]. Im Vorhaben VerSi wird Sicherheit folgendermaßen definiert:

Der Zustand der Sicherheit ist (im technischen Sinne) dann gegeben, wenn vorgegebene Schutzziele eingehalten werden.

2.3 Robustheit

Die alleinige Verwendung von Sicherheit im obigen Sinne als Zielfunktion des Endlagersystemvergleichs wäre jedoch im vorliegenden Fall aus folgendem Grund zu eng gefasst: Als eine der grundlegenden Voraussetzungen wird im Projekt VerSi davon ausgegangen, dass bei keinem der Endlagersysteme Erkenntnisse vorliegen, die die Einhaltung der Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle gemäß /BMU 10/ in Frage stellen. Zwar kann zum heutigen Zeitpunkt die Belastbarkeit dieser Aussage in einem späteren Endlagerauswahlverfahren nicht genau abgesehen werden. Die Untersuchungstiefe zur Langzeitsicherheit der Endlagersysteme wird jedoch als so umfangreich angesehen, dass mindestens von einer **Genehmigungsfähigkeit**, d. h. einer prinzipiellen Eignung für die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle, ausgegangen werden kann. Da somit für beide Endlagersysteme ausreichendes Sicherheitsniveau unterstellt werden kann, kann die Sicherheit in der Phase nach Verschluss nicht das eigentliche Kriterium für einen Endlagersystemvergleich sein. In diesem Sinne ist auch die Definition des Zielsystems in Kap. 2.1 für Vergleichszwecke in der Praxis noch zu global und wird daher in Kap. 3.3 weiter präzisiert. Vielmehr kommt es auf die Zuverlässigkeit sicherheitsgerichteter Aussagen und die Unempfindlichkeit der Sicherheitsfunktionen der Endlagersysteme gegenüber Änderungen ihrer Randbedingungen an. Diese Aspekte werden zum Begriff „**Robustheit**“ zusammengefasst. Auf das Vorhaben VerSi bezogen wird in Anlehnung an /BMU 10/ „Robustheit“ folgendermaßen definiert:

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.

2.4 Sicherheitsfunktionen und zusätzliche Sicherheitswirkungen

Für den Begriff Sicherheitsfunktion wird gemäß der Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle /BMU 10/ innerhalb des Vorhabens VerSi folgende Definition verwendet:

Eine Sicherheitsfunktion ist eine Eigenschaft oder ein im Endlagersystem ablaufender Prozess, die bzw. der in einem sicherheitsbezogenen 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
/BMU 10/.

Erläuterung:

1. In der obigen Definition wird vorausgesetzt, dass „sicherheitsrelevante Anforderungen“ bestehen. Dies impliziert das Vorliegen eines **Endlagersicherheitskonzeptes**, welches auf die Gewährleistung der Rückhaltung der Radionuklide für alle wahrscheinlichen und weniger wahrscheinlichen Szenarien in einem Teilbereich des Endlagersystem, dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG) im Verbund mit seinen technischen Barrieren im Endlagerbergwerk („Endlager“ im Sinne der Sicherheitsanforderungen /BMU 10/), abzielt. Hierauf allein stellen die oben erwähnten sicherheitsgerichteten Anforderungen ab.
2. Sämtliche Eigenschaften von Endlagerkomponenten, die zur **Rückhaltung** der Radionuklide im ewG führen, werden als **rückhaltende Sicherheitsfunktionen (RSF)** bezeichnet. Die „sicherheitsgerichtete Wirkungsweise“ zielt somit auf die weitgehende Rückhaltung der Radionuklide im ewG im Verbund mit den geotechnischen Barrieren ab. Hierzu zählt auch die Verhinderung/Behinderung von Lösungszutritt zu den Abfällen, da hierdurch die Lösung und der Transport von Radionukliden limitiert bzw. unterbunden werden. Es ist dabei unerheblich, ob die Sicherheitsfunktionen im Rahmen der Sicherheitsanalyse betrachtet (und im Nachweis belastet) werden oder nicht.
3. Sämtliche Eigenschaften von Endlagerkomponenten, die zur Wahrung der Integrität von Endlagerkomponenten gegenüber Einflüssen von innen und außen beitragen

und damit eine Schutzfunktion gegenüber den rückhaltenden Sicherheitsfunktionen ausüben, werden als **integritätsbewahrende Sicherheitsfunktionen (ISF)** bezeichnet. Es ist auch hier unerheblich, ob die Sicherheitsfunktionen im Rahmen der Sicherheitsanalyse betrachtet (und im Nachweis belastet) werden oder nicht.

4. Eine Sicherheitsfunktion lässt sich räumlich (System, Teilsystem oder Einzelkomponente) zuordnen.
5. Alle Sicherheitsfunktionen sind demnach Komponenten zugeordnet, die als technische, geotechnische oder natürliche Barrieren den Einschluss der radioaktiven Abfälle gewährleisten.
6. Zentrale Anforderung an ein Endlagersystem ist der Einschluss der Radionuklide im ewG. Rückhaltende Sicherheitsfunktionen (RSF) außerhalb des ewG werden daher nicht betrachtet. Außerhalb des ewG werden sicherheitsgerichtete Wirkungsweisen von Komponenten nur dann als Sicherheitsfunktionen bezeichnet, wenn sie als integritätsbewahrende Sicherheitsfunktionen (ISF) dem physikalischen Schutz des ewG oder der Verschlusskomponenten gegenüber Einflüssen von innen und außen dienen.
7. Die Wirksamkeit von rückhaltenden oder integritätsbewahrenden Sicherheitsfunktionen kann auf bestimmte Teilabschnitte des Nachweiszeitraums beschränkt sein.
8. Aus der Benennung einer Sicherheitsfunktion sollte die sicherheitsgerichtete Wirkung eindeutig hervorgehen.
9. Jeder Sicherheitsfunktion können Eigenschaften und Prozesse zugeordnet werden, auf denen die sicherheitsgerichtete Wirkung beruht.
10. Nicht als Sicherheitsfunktionen bezeichnet werden sicherheitsgerichtete Wirkungsweisen, die
 - **außerhalb des ewG mit seinen Verschlusskomponenten auftreten** und **nicht** zum Erhalt ihrer sicherheitsgerichteten Eigenschaften beitragen (z. B. Sorption im Deckgebirge. In diesem Bericht wird für diese Form der vorläufige Begriff „**Zusätzliche Sicherheitswirkung**“ verwendet.

- oder deren sicherheitsgerichtete Wirkungen **nicht abschätzbar** sind. Sie werden in internationalen Sicherheitsnachweisen z. T. als „**Sicherheitsreserve**“ bezeichnet und können als qualitatives Zusatzargument im safety case verwendet werden.

2.5 Weitere Definitionen

Endlagersystem

Das Endlagersystem besteht aus dem Endlagerbergwerk, 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 /BMU 10/.

Endlagerbergwerk:

Das Endlagerbergwerk besteht aus unterschiedlichen Komponenten wie Schächten, Strecken, Kammern mit den darin eingelagerten Abfallgebänden, Versatz und Dichtelementen /BMU 10/.

Einschlusswirksamer Gebirgsbereich

Der einschlusswirksame Gebirgsbereich (ewG) ist der Teil des Endlagersystems, der im Zusammenwirken mit den technischen Verschlüssen (Schachtverschlüsse, Kammerabschlussbauwerke, Dammbauwerke, Versatz etc.) den Einschluss der Abfälle sicherstellt /BMU 10/.

Endlager

Das Endlager ist Teil des Endlagersystems. Das Endlager umfasst das Endlagerbergwerk, die eingelagerten radioaktiven Abfälle sowie den einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG) mit seinen technischen Verschlüssen.

Einschluss:

Als Einschluss wird eine Sicherheitsfunktion des Endlagersystems bezeichnet, die dadurch charakterisiert ist, dass die radioaktiven Abfälle in einem definierten Gebirgsbereich so eingeschlossen sind, dass sie im Wesentlichen am Einlagerungsort verbleiben und allenfalls geringe definierte Stoffmengen diesen Gebirgsbereich verlassen /BMU 10/.

Deckgebirge:

Als Deckgebirge werden die geologischen Schichten bezeichnet, die den einschlusswirksamen Gebirgsbereich und das oberhalb des ewG anschließende weitere Wirtsgestein überlagern.

Integrität: Der Begriff Integrität beschreibt den Erhalt der Eigenschaften des Einschlussvermögens des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs eines Endlagers /BMU 10/.

2.6 Projektinterne Festlegungen

Zur konsistenten Bearbeitung der 4 VerSi-Teilvorhaben wurden zu Projektbeginn folgende Festlegungen als Randbedingungen für die weitere Projektbearbeitung getroffen:

1. Die Abwägung betrifft ausschließlich Endlager in tiefen geologischen Formationen für wärmeentwickelnde Abfälle.
2. Die Abwägung betrifft alleinig den Langzeitsicherheitsaspekt. Fragen der Sicherheit des Endlagerbetriebs bis zum Verschluss des Endlagers oder des Sicherheitsmanagements sind nicht Gegenstand des Abwägungsprozesses.
3. Für die Langzeitsicherheit wird ein Nachweiszeitraum von 1 Million Jahre zugrunde gelegt.
4. Eine Option der Rückholung endgelagerter radioaktiver Abfälle wird im Abwägungsprozess nicht berücksichtigt.
5. Die Abwägungsmethodik soll sich nach Möglichkeit nicht auf konservative Annahmen abstützen, da ansonsten die Vergleichbarkeit der Robustheit von Sicherheitsfunktionen nicht mehr gegeben ist. Vor- und Nachteile der Endlagersysteme würden hierdurch nicht mehr realitätsnah herausgestellt werden

können, der Vergleich würde in unzulässiger Weise „verzerrt“. Bei fehlenden Befunden werden Erwartungswerte mittels Expertenschätzungen in das Verfahren eingeführt.

6. Szenarien des beabsichtigten oder unbeabsichtigten menschlichen Eindringens in das Endlager bleiben unberücksichtigt.

Die im nachfolgenden vorgestellte Abwägungsmethodik ist jedoch so flexibel gehalten, dass sie prinzipiell auch bei Aufgabenstellungen mit anderen Randbedingungen (z. B. für den Vergleich zweier Endlagersysteme für nicht wärmeentwickelnde Abfälle) durchgeführt werden kann. Aus methodischer Sicht sind allerdings die Randbedingungen 2 und 5, aus regulatorischer Sicht die Randbedingung 3 nicht variabel.

3 Methodische Grundlagen

3.1 Verfahren zur vergleichenden Bewertung

Entscheidungsproblem

Im Rahmen des Vorhabens VerSi wurden entscheidungstheoretische Grundlagen und diesbezügliche Anforderungen an eine Methodik zur vergleichenden Bewertung von Endlagern in verschiedenen geologischen Situationen in einem umfangreichen Bericht /APP 09/ zusammengestellt. Im vorliegenden Bericht werden daher nur wesentliche entscheidungsmethodische Aspekte zusammenfassend gewürdigt.

Bei der Auswahl von Standorten für beliebige Anlagentypen (z. B. Deponien, Kraftwerke, Endlager) besteht eine wesentliche Aufgabe darin, aus einer größeren Zahl von alternativen Möglichkeiten die (unter einem bestimmten Blickwinkel) optimale Lösung zu finden. Es liegt also ein Entscheidungsproblem vor. Dabei gilt: *"Unter 'Entscheidung' wird die (mehr oder weniger bewusste) Auswahl einer von mehreren möglichen Handlungsalternativen verstanden"* /LAU 04/.

Für den Umgang mit Entscheidungsproblemen stellt die Entscheidungstheorie das Handwerkszeug zur Verfügung. Bei der Entscheidungstheorie geht es um rationales Entscheiden: Die Erfolgsaussichten von Entscheidungen sollen durch rationales Vorgehen verbessert werden. Unter Rationalität wird dabei verstanden, dass einerseits gewisse Anforderungen an den Entscheidungsprozess gestellt und eingehalten werden (prozedurale Rationalität), und andererseits der Grundsatz der Widerspruchsfreiheit verfolgt wird.

Subjektive Einflüsse Im Entscheidungsprozess

Die Entscheidungstheorie zeigt weiterhin auf, dass es keine "objektiv richtigen" Entscheidungen gibt. Entscheidungen werden vielmehr gesteuert bzw. beeinflusst durch subjektive Erwartungen, Ziele und Prämissen von Entscheidern, die nur begrenzt überprüfbar sind. Aufgabe muss es also sein, die subjektiven Erwartungen, Ziele und Prämissen im Entscheidungsprozess offen zu legen.

Verdeckte subjektive Bewertungen entstehen, wenn am Bewertungsprozess Beteiligte sich auf "der objektiven Seite" wähnen und glauben, eine rationale Entscheidung zu

treffen, obwohl diese Entscheidungen gänzlich oder in Teilen subjektiv sind. Diese nicht wahrgenommene Subjektivität führt im Ergebnis zu Scheinobjektivität. Subjektiv mitgeprägte Bewertungen können nicht vollständig verhindert werden; es ist aber möglich, den subjektiven Anteil zu reduzieren und im Entscheidungsprozess deutlich zu machen.

Deshalb müssen im Vorfeld der Methodik die wesentlichen Quellen für verdeckte subjektive Bewertungen identifiziert werden, wie etwa bei der Festlegung der Ziele, der Festlegung und Anwendung der Kriterien und Szenarien oder bei der Aggregation von Entscheidungselementen. Entscheidungstheoretische Methoden, welche die Nachvollziehbarkeit der Entscheidung zur Grundlage haben, liefern Klarheit darüber, wo subjektive Wertungen in den Entscheidungsprozess einfließen bzw. eingeflossen sind.

So muss insbesondere beim Bewertungsprozess möglichst klar zwischen indikativen Elementen (Sachebene) und normativen Elementen (Wertebene) unterschieden werden. Diesem Aspekt wurde im vorliegenden Fall durch die Trennung des synoptischen Sachstandsberichtes (vgl. Kap. 7 = indikative Ebene) und der vorliegenden Beschreibung der verbalargumentativen Abwägungsmethodik (= normative Ebene) Rechnung getragen. Da normative Elemente konstitutiv für die Definition des Zielsystems sind, werden auch in den Bewertungsprozess selbst normative Elemente eingebunden sein (z. B. bei Kriterienfestlegung und Abwägungsprozess). Eine konsequente Trennung von Sach- und Wertebene ist also nicht vollständig möglich. Dennoch gilt die Forderung, dass deutlich gemacht wird, wo normative Elemente im Entscheidungsprozess angesiedelt sind. Dies ist besonders wichtig an den Stellen des Entscheidungsprozesses, wo normative Elemente versteckt auftreten können. Dies kann z.B. bei der Formulierung des Zielsystems, der Auswahl der Kriterien, der Gewichtung von Kriterien, der Festlegung von Szenarien oder bei der Festlegung von Wahrscheinlichkeiten für mögliche Prozesse der Fall sein.

Bei der Anwendung von Kriterien kommen subjektive Einflüsse insbesondere dann ins Spiel, wenn der Informationsbedarf nicht gedeckt ist, Untersuchungsbefunde fehlen oder entsprechende Unsicherheiten bestehen. Die Aussagen zu Kriterien gelten verschärft noch für Indikatoren, denn sie bewerten Größen, die nicht direkt gemessen werden können. Die Auswahl geeigneter Indikatoren hat zwangsläufig subjektive Momente und normative Setzungen zur Grundlage.

Inbesondere bei nicht formalisierten Verfahren mit nichtkompensatorischem Ansatz besteht die Gefahr, dass durch persönliche Präferenzen, Einstellungen und normativen

Setzungen ein subjektiver Faktor in die Gesamt-Beurteilung über alle Kriterien hinweg einfließt. Diese Gefahr kann verringert werden, indem die Gesamt-Beurteilung auf einzelnen, aufeinander aufbauenden Entscheidungen fußt, zu denen jeweils aussagekräftige Begründungen gegeben werden.

Die beschriebenen subjektiven Einflüsse auf die Bewertung von Objekten können nicht völlig verhindert werden. Deshalb gilt die Anforderung, dass subjektive Einflüsse und normative Setzungen minimiert werden und verdeutlicht wird, an welchen Stellen des Entscheidungsprozesses sie auftreten und welche Konsequenzen daraus resultieren. Dies ist eine notwendige Voraussetzung für den angestrebten rationalen Entscheidungsprozess.

3.2 Vergleichende Bewertung bei der Standortauswahl

Bei der Standortauswahl für Endlager tritt zu einem bestimmten Zeitpunkt im Verfahrensablauf die Notwendigkeit auf, aus mehreren potenziellen geeigneten Standorten den relativ besten zu identifizieren (vgl. Kap. 4.1). Zu diesem Zweck müssen diese einer **vergleichenden Bewertung** unterzogen werden. Die vergleichende Bewertung von Endlagerstandorten entspricht aus methodologischer Sicht der entscheidungstheoretischen Kernaufgabe der vergleichenden Bewertung von Alternativen mit dem Ziel, die beste Alternative auf rationale Weise zu identifizieren. Die entscheidungstheoretischen Anforderungen für den Vergleich von Alternativen gelten also auch für den Vergleich von potenziellen Endlagersystemen. Ein echtes Entscheidungsproblem ist immer dann gegeben, wenn die zu vergleichenden Alternativen (hier: potenzielle Endlagerstandorte) sowohl Vor- als auch Nachteile aufweisen. Wenn eine Alternative alle Vorteile auf ihrer Seite hat und alle Nachteile bei den anderen Alternativen liegen, liegt kein echtes Entscheidungsproblem vor, da die Alternative mit allen Vorteilen den Vergleich eindeutig dominiert. Dieser Fall braucht nicht weiter betrachtet zu werden.

Die jeweiligen Vor- und Nachteile der einzelnen Endlagersysteme sind unter Einhaltung einer zielgerichteten (auf das Zielsystem bezogenen) einheitlichen und vorab festgelegten (und damit nicht willkürlichen) Vorgehensweise zu bewerten und untereinander zu vergleichen. Die dabei zu berücksichtigenden Sachverhalte beziehen sich im Wesentlichen auf die übergeordneten Vergleichskriterien mögliche Beeinträchtigungen von Schutzgütern (Mensch, Wasser, Boden, Luft usw.), im Sinne der

Einhaltung von (quantitativen) Schutzziele.

Das Kernproblem der vergleichenden Bewertung besteht in dem bis heute nicht vollständig gelösten "Abwägungsproblem bei der multikriteriellen Entscheidungsfindung" /STR 95/. Bei der multikriteriellen Entscheidungsfindung müssen Kriterien mit verschiedenen sachlichen Inhalten zu einer Gesamtbewertung zusammengeführt (aggregiert) werden, damit überhaupt eine Entscheidung getroffen werden kann.

Für die hier gestellte Aufgabe der Entwicklung einer Methode der vergleichenden Bewertung bei der Standortauswahl ist entscheidend, dass es sich bei den zu vergleichenden Alternativen um Objekte (Endlagersysteme) mit verschiedenartigen Merkmalen (Eigenschaften) handelt, d. h. Aussagen über die Objekte sind zunächst Aussagen über ihre Eigenschaften. Diese lassen sich unterteilen in physische und funktionale Eigenschaften, die eine qualitative oder quantitative Ausprägung besitzen, denen wiederum eine geeignete Mess-Skala zu ihrer Bewertung zugeordnet werden muss. Diejenigen Merkmale der Objekte, die im Hinblick auf die Entscheidungsfindung relevant sind, bezeichnet man als **Kriterien**. Kriterien stellen also nur eine Teilmenge aller Merkmale eines Objekts dar. Es gilt also: Kriterien sind diejenigen Merkmale, die zum Zweck des Vergleichs von Objekten aus der Menge aller Merkmale ausgewählt werden. Durch das im vorliegenden Fall gewählte Zielsystem (Kap. 2.1) zielen die Kriterien auf die Langzeitsicherheit der Endlagersysteme und ihrer Sicherheitsfunktionen ab.

Die Anforderungen, die an eine Methodik der vergleichenden Bewertung zur Auswahl eines Endlagersystems sowie ihrer Verfahrensentwicklung zu stellen sind, wurden in /APP 09/ umfassend abgehandelt. Darüber hinaus sind die Erfahrungen mit verschiedenen methodischen Ansätzen und den daraus resultierenden Problemen eingehend dargelegt.

3.3 Vergleichende Bewertung von Endlagersystemen auf Grundlage ihrer Robustheit

Die im Vorhaben VerSi entwickelte Methode zum Vergleich von Endlagersystemen zielt auf die Bewertung der Robustheit von Sicherheitsfunktionen ab. Für die vergleichende Bewertung von Endlagersystemen anhand ihrer Robustheit lassen sich aus den vorliegenden Erfahrungen und methodischen Ansätzen zur Überwindung der genannten

Probleme /APP 09/ folgende grundlegende methodische Schlussfolgerungen ziehen:

- Der Kern der vergleichenden Bewertung verschiedener Optionen liegt in der Abwägung ihrer Vor- und Nachteile. Das gilt grundsätzlich auch für den sicherheitsgerichteten Vergleich von Endlagersystemen. Dafür gibt es keine allgemeingültige Methode, es müssen vielmehr geeignete methodische Instrumente entwickelt bzw. aus anderen Arbeitsgebieten übernommen und adaptiert werden. In Kapitel 2.1 wurde das Zielsystem definiert. Auf dieser Grundlage wird als übergeordnetes Merkmal des Verfahrens die Gesamtrobustheit der integralen Sicherheit des jeweiligen Endlagersystems definiert, die sich aus den Robustheiten der die Sicherheit gewährleistenden Teilsysteme aggregieren lassen. Aufgrund der Vielzahl der in die Bewertung der "Gesamtsystemrobustheit" der zu vergleichenden Endlagersysteme eingehenden Einzeleinflüsse (zahlreiche Sicherheitsfunktionen mit unterschiedlicher Relevanz für bestimmte Bewertungszeiträume bzw. zahlreiche einzelne Robustheiten) besteht die Gefahr, dass das Bewertungsinstrumentarium komplex und unübersichtlich wird. Um die Anforderung nach Transparenz des Vorgehens und Nachvollziehbarkeit der Bewertung zu erfüllen, muss es daher klar strukturiert und auf die wesentlichen Bewertungsgrößen ausgerichtet sein. Nachgeordnete Aspekte können begründet zurückgestellt oder aus der Bewertung ausgeschlossen werden. Eine wesentliche Anforderung an das transparente Verfahren und dessen Nachvollziehbarkeit stellt eine strukturierte Dokumentation aller Entscheidungen mit ihren Begründungen dar.
- Für die Lösung des anstehenden Problems wird aus den verschiedenen in Anwendung befindlichen Methoden eine formalisierte Bewertungsmethode ohne Kompensation ausgewählt.
- "Formalisiert" bedeutet dabei, dass die Bewertung nach einem vorher festgelegten Handlungsablauf durchgeführt wird. Der Vorteil formalisierter Methoden beruht auf einer vorab einvernehmlich festgelegten Struktur und darauf, dass alle Sachverhalte auf einheitliche Weise bewertet werden.
- "Ohne Kompensation" bedeutet den Verzicht darauf, die Vor- und Nachteile einer Option hinsichtlich der Erfüllung von Kriterien mittels einer übergeordneten Bewertungsgröße (z. B. Nutzwert) miteinander zu verrechnen. Dadurch kommt man zwangsläufig zu Methoden, die sich bei der Anwendung der Kriterien mit den Vor- und Nachteilen der Optionen inhaltlich verbal argumentativ auseinandersetzen.

- Kern einer solchen Methode ist die **verbal-argumentative Bewertung**. Für ihre Anwendung bei der Bewertung der Robustheit von Endlagersystemen spricht nicht zuletzt die Informationslage: Die **Relevanz** der endlagersystemspezifischen Sicherheitsfunktionen im Hinblick auf die integrale Sicherheit des Endlagersystems kann nur anhand einer ordinalen Skalierung mit Klasseneinteilung entsprechend "höherer bzw. geringerer Relevanz" beurteilt werden. Deswegen verbietet sich die "rechnerische" Behandlung der Kriterien. Entsprechendes gilt für das Ausmaß der Veränderung der Sicherheitsfunktionen durch auf sie einwirkende innere und / oder äußere Einflüsse: Hier mögen zwar für einzelne Kriterien 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 verbal-argumentative Bewertung zwanglos als angemessen an.

Die im Vorhaben VerSi entwickelte verbal-argumentative Methode zum Vergleich von Endlagersystemen zielt auf die Bewertung der **Robustheit** von Sicherheitsfunktionen ab. Der Vergleich von Endlagersystemen anhand ihrer Robustheit wird aus methodischer Sicht durch folgende für die Entwicklung und Umsetzung der Bewertungsmethodik wichtigen Rahmenbedingungen beeinflusst:

- Anders als beim Nachweis der Langzeitsicherheit von Endlagersystemen (z. B. in Genehmigungsverfahren) üblich sollten beim Vergleich von Endlagersystemen Defizite hinsichtlich Systemverständnis und -information nach Möglichkeit **nicht durch konservative**, d. h. (über)-pessimistische **Annahmen** "überbrückt" werden; denn es besteht die Gefahr, dass dann diese Annahmen das Vergleichsergebnis in unzulässigem Maße verzerren /APP 09/.
- Die **Anzahl** der hinsichtlich ihrer Robustheit zu vergleichenden alternativen Endlagersysteme ist voraussichtlich klein. Sie sind zudem nur zwei Endlagersystemtypen zuzuordnen ("Wirtsgestein Steinsalz in steiler Lagerung" / "Wirtsgestein Tonstein"). Im Sinne der regelgerechten und transparenten Durchführung und Nachvollziehbarkeit des Entscheidungsprozesses ist dies als Vorteil anzusehen.
- Da die hinsichtlich ihrer Robustheit zu bewertenden Endlagersysteme grundsätzlich als **genehmigungsfähig** (s. Kap. 4) betrachtet werden, besteht die vergleichende Bewertung nicht in der multikriteriellen Abwägung der sicherheitlichen Vor- und Nachteile der Endlagersysteme (wie oben beschrieben), sondern im Vergleich

unterschiedlich großer Vorteile hinsichtlich der Robustheit von Sicherheitsfunktionen. Diese Vorteile beruhen auf der **über die Genehmigungsveraussetzungen hinausgehenden Erfüllung von Anforderungen** an die materiellen Systemeigenschaften.

- Der Vergleich der Robustheit bei der verbal-argumentativen Abwägungsmethodik muss sich an der robusten Erfüllung der **konzeptionellen Sicherheitsanforderungen**, die an die verschiedenen Endlagerkomponenten gestellt werden, orientieren. Es wird prinzipiell unterstellt, dass bei Erfüllung des Sicherheitskonzeptes und der hierauf beruhenden Auslegungsanforderungen die Endlagersysteme genehmigungsfähig sind. Die Verwendung von Indikatoren, die einen Bezug zu quantitativen Schutzziele aufweisen, (z. B. Radionuklidstrom über die Begrenzungen des ewG oder definierte Radiotoxizitätsindices) ist im Rahmen der verbal-argumentativen Abwägungsmethodik ohne Einbeziehung begleitender numerischer Sicherheitsanalysen nicht möglich.
- Da das Ergebnis der verbal-argumentativen Abwägungsmethodik auf dem Bezug der Robustheit der Sicherheitsfunktionen mit ihren zugehörigen sicherheitskonzeptionellen Anforderungen beruht, ist es von elementarer Wichtigkeit, **dass die Auslegungsanforderungen an die Barrieren der zu vergleichenden Endlagersysteme ungefähr die gleiche „Strenge“ aufweisen**. Ein Endlagersystem, an welches extrem strikte (ggf. übertriebene) Anforderungen gestellt werden, würde im Vergleich trotz ggf. höherer Robustheit einem anderen Endlagersystem mit weniger strengen (angemessenen) Auslegungsanforderungen unterliegen. Hierauf ist seitens des Antragsstellers, dem die Aufstellung der Sicherheitskonzeptes und der Auslegungsanforderungen für die zu vergleichenden Endlagersysteme obliegt, zu achten.

Mit Blick auf die gewählte verbal-argumentative Vergleichsmethodik Methode, die Abwägung und die Entscheidung ergeben sich unter Berücksichtigung der Zusammenhänge zwischen Sicherheitsfunktionen und Systemrobustheit für das jeweilig betrachtete Szenario folgende Konsequenzen für das konkrete Vorgehen bei der Bewertung:

- Die **Sicherheitsfunktionen** der Endlagersysteme sind die Kernelemente der (vergleichenden) Bewertung der Robustheit dieser Systeme; denn zum einen bezieht sich Robustheit definitionsgemäß (s. Kap. 2.3) unmittelbar auf die Sicherheitsfunktionen, zum anderen hängt die Robustheit entscheidend von der

Bedeutung der jeweiligen Sicherheitsfunktion für die Sicherheit des Gesamtsystems ab (Kap. 9).

- Da die Sicherheitsfunktionen für die Sicherheit des Gesamtsystems unterschiedliche Bedeutung haben (können), müssen sie für den Vergleich von Endlagersystemen auf Basis ihrer Robustheit zunächst nach ihrer **Relevanz** (Bedeutung) für die Sicherheit des Gesamtsystems klassifiziert werden. Dabei ist differenziert nach dem Endlagersystemtyp (Steinsalz / Tonstein) bzw. dem Wirkungszeitraum (<10.000 Jahre / ≥10.000 Jahre) vorzugehen (Kap. 9.3).
- Diese Klassifizierung der Relevanz und der Robustheit der Sicherheitsfunktionen kann nur auf einer **Ordinalskala** erfolgen, da beim Ranking der Sicherheitsfunktionen lediglich eine Ordnungsaussage möglich ist (wichtiger, weniger wichtig), wobei die Abstände zwischen den einzelnen Rangplätzen nicht bekannt sind. Rechenoperationen sind bei Ordinalskalen nicht zulässig. Rangplätze können aber durch Symbole, Ziffern o. ä. gekennzeichnet werden.
- Das Ergebnis dieses Rankings der Relevanz der Sicherheitsfunktionen entspricht letztlich deren Gewichtung, und zwar differenziert nach den Endlagersystemtypen (Steinsalz, Tonstein) und den beiden Wirkungszeiträumen.
- Da die Relevanz der Sicherheitsfunktionen von entscheidender Bedeutung für die Wichtung der Robustheit der Sicherheitsfunktionen im Rahmen des Endlagersystemvergleichs ist (s. Kap. 12), muss die Zuordnung zu den Relevanzklassen sorgfältig verbal-argumentativ begründet werden. Zudem ist der unvermeidliche Einfluss subjektiver Einschätzungen bei der Begründung offen zu legen.
- Gleiches gilt für die Bewertung der **Robustheit** der Sicherheitsfunktionen auf der Basis der sie charakterisierenden Parameter (Kap. 11). Auch bei der Bestimmung dieser Größe muss sehr sorgfältig vorgegangen werden und es müssen subjektive Einflüsse deutlich gemacht werden.
- Da auch das Ausmaß der Robustheit in der Regel nicht quantitativ bestimmt werden kann, ist lediglich die Bildung von "Veränderungsklassen" mit ordinaler Skalierung möglich. Falls kardinale Bestimmungsergebnisse vorliegen, müssen sie ordinal umgewandelt werden.

4 Abwägungsmethodik und Standortauswahlverfahren

4.1 Einbettung der Abwägungsmethodik in ein Standortauswahlverfahren

In Abb. 1 sind die einzelnen Phasen der Erkundung in einem möglichen Standortauswahlprozess dargestellt. Bezogen auf die Erkundung entsprechen die dargestellten Phasen weitgehend den vom Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AKEnd /AKE 02/) vorgeschlagenen Verfahrensschritten 3 (Identifikation von Teilgebieten mit besonders günstigen geologischen Eigenschaften = Phase I) 4 (Übertägige Erkundung und Festlegung von Standorten für die untertägige Erkundung = Phase II) sowie 5 (untertägige Erkundung und Entscheidung über den Standort für den das nachfolgende Genehmigungsverfahren durchgeführt wird = Phase III und IV).

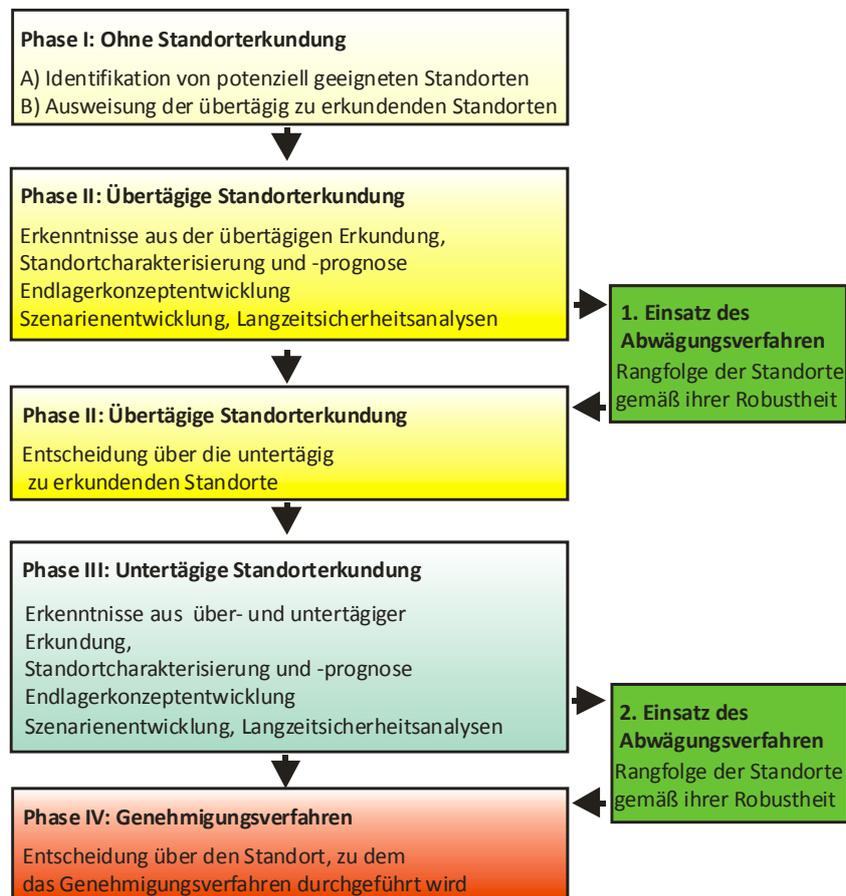


Abb. 1: Phasen der Erkundung in einem Standortauswahlprozess und Einsatzzeitpunkte für das Abwägungsverfahren für den Endlagersystemvergleich.

Am Ende der Phase II „übertägige Erkundung“ bzw. der Phase III „untertägige Erkundung“ liegen in jeweils unterschiedlichem Tiefgang umfassende Dokumentationen der

Standortcharakterisierung sowie der Szenarien- und Sicherheitsanalysen vor, die zur Feststellung der Genehmigungsfähigkeit herangezogen werden. Für Tonsteinstandorte kann für die Phase II „übertägige Erkundung“ bzw. III „untertägige Erkundung“ von einem Untersuchungsumfang ausgegangen werden der - abgeleitet aus den diesbezüglichen Ausführungen des AKEnd /AKE 02/ in /BFS 09/ beschrieben wurde. Der Untersuchungsumfang für die übertägige Erkundung eines Tonsteinstandortes ist beispielhaft in tabellarischer Form am Ende des Anhangs 3 aufgelistet.

Die im Vorhaben VerSi entwickelte Abwägungsmethodik kann in einem Standortauswahlverfahren als wichtige Unterstützung im Entscheidungsprozess zweimal zum Einsatz kommen:

1. Am Ende der Phase II werden mindestens zwei Standorte festgelegt, die untertägig erkundet werden sollen. Basis dieser Standortentscheidung sind Ergebnisse übertägiger Erkundungsmaßnahmen und orientierender Langzeitsicherheitsanalysen, die an drei bis fünf Standorten durchgeführt und ausgewertet wurden. Bei der Auswahl der Kandidaten für die untertägige Erkundung und einer transparenten Begründung der getroffenen Festlegung im Hinblick auf den Aspekt der Langzeitsicherheit kann die im Vorhaben VerSi entwickelte Abwägungsmethodik am Ende der Phase II (AKEnd-Verfahrensschritt 4) zum ersten Mal eingesetzt werden.
2. Am Ende der Phase III wird die Entscheidung über den Endlagerstandort getroffen, für den das nachfolgende Genehmigungsverfahren durchgeführt werden soll. Grundlage hierfür sind die Ergebnisse der untertägigen Erkundung an mindestens zwei Standorten sowie die Ergebnisse vollständiger Langzeitsicherheitsanalysen zu beiden Standorten. Zur Festlegung, welches der beiden Endlagersysteme für ein Genehmigungsverfahren aus sicherheitstechnischer Sicht zu favorisieren ist, kann die im Vorhaben VerSi entwickelte Abwägungsmethodik ein zweites Mal herangezogen werden.

Die im nachfolgenden dargestellten beispielhaften Anwendungsfälle beziehen sich sämtlich auf einen Einsatz der Abwägungsmethodik am Ende der Phase II. Die im Vorhaben VerSi entwickelte Abwägungsmethodik ist allerdings so angelegt, dass sie auch für die Entscheidung im Rahmen der Phase III gleichermaßen und ohne irgendwelche Modifikationen eingesetzt werden kann, wobei hier die Aussagesicherheit des Vergleichsergebnisses aufgrund des besseren Kenntnisstandes zu beiden Endlagersystemen im Regelfall höher ist. Im vorliegenden Fall (Phase II) wird unterstellt, dass Ergebnisse aus der übertägigen Erkundung eines (fiktiven) Tonsteinstandortes und bestehende Ergebnisse

aus einer bisher noch nicht abgeschlossenen übertägigen und untertägigen Erkundung des Standortes Gorleben vorliegen und damit die Basis des Endlagersystemvergleichs bilden. Durch den unterschiedlichen Tiefgang der Erkundungsergebnisse zu beiden Standorten wird dabei nicht notwendigerweise vorab eine vergleichsbeeinflussende „Schieflage“ erzeugt. Vielmehr kommt es darauf an, dass der Untersuchungsumfang mit der Charakterisierbarkeit des Standortes (z. B. im Hinblick auf die Homogenität/Heterogenität der geologischen Strukturen, Fazieswechsel etc.) im Einklang steht. Diesem Aspekt ist ein eigener Abwägungsteilschritt bei der Bewertung der Robustheit der Sicherheitsfunktionen des ewG (Verfahrensschritt 5b, Kap. 11.3) gewidmet.

4.2 Anforderungen an den Umfang der Standorterkundung

Voraussetzung für die Durchführung der im Vorhaben VerSi entwickelten Abwägungsmethodik sind ausreichend tiefe Kenntnisse zu den zu vergleichenden Endlagersystemen. Wie bereits erwähnt, können nur Endlagersysteme, deren Genehmigungsfähigkeit positiv bewertet wurde, dem Abwägungsverfahren zugeführt werden. Genehmigungsfähigkeit bedeutet mindestens, dass keine Zweifel an einer prinzipiellen Eignung für die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle vorliegen und eine begründete Erwartung besteht, den Sicherheitsnachweis positiv führen zu können.

Ein zur Beurteilung der Genehmigungsfähigkeit erforderlicher Kenntnisstand ist frühestens nach einer eingehenden übertägigen Erkundung erreicht. Mit der übertägigen Erkundung werden standortspezifische Befunde und Erkenntnisse erhoben, die eine tiefgreifende Charakterisierung eines Standortes im Hinblick auf seine geologischen, hydrogeologischen geomechanischen und geochemischen Eigenschaften erlauben. Der Verfahrensbetreiber muss die im jeweiligen Verfahrensschritt gewonnenen Erkenntnisse der Standortcharakterisierung umfassend dokumentieren. Dabei ist auch die Zuverlässigkeit der Aussagen bezüglich der Charakterisierbarkeit der Standorteigenschaften, der Explorierbarkeit der räumlichen Verhältnisse sowie der Prognostizierbarkeit der Standortentwicklung zu bewerten. Auf Basis der Standortcharakterisierung ist die Entwicklung eines auf den jeweiligen Standort zugeschnittenen Einlagerungs- und Verschlusskonzeptes möglich. Ab diesem Zeitpunkt kann das Endlagersystem hinsichtlich seiner Sicherheitsfunktionen und der sie charakterisierenden Eigenschaften und Prozesse analysiert werden.

Im Einzelnen sind folgende Rahmenbedingungen bei der Anwendung der Abwägungsmethodik zu beachten:

Die zu bewertenden Endlagersysteme haben als Mindestanforderung einen Auswahlprozess, entsprechend AKEnd (Verfahrensschritte 1 - 4) positiv durchlaufen. Es liegen für die jeweiligen Standorte adäquate und optimierte Endlagerkonzepte vor. Für die jeweiligen Endlagersysteme liegen keine Erkenntnisse vor, die eine Eignung im Hinblick auf die Langzeitsicherheit in Frage stellen würden, d. h. die der Erfüllung der Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle /BMU 10/ entgegenstehen.

Das bedeutet, dass für die im Vergleich stehenden Endlagersysteme Kenntnisse in einer Qualität vorliegen, die eine sicherheitstechnische Bewertung in Form einer Langzeitsicherheitsanalyse erlauben.

In diesem Sinne ergeben sich folgende Anforderungen an die Standorterkundung:

- Der Tiefgang der Erkundungsmaßnahmen muss einen Vergleich von Standorten untereinander ermöglichen und zeigen, dass die wesentlichen Voraussetzungen für die Erfüllung der Sicherheitsanforderungen vorliegen bzw. keine Daten gegen eine spätere Genehmigung des Endlagers sprechen. Dieser Tiefgang entspricht noch nicht demjenigen, der für die Nachweise im Genehmigungsverfahren erforderlich ist.
- Bei der Einschätzung des erforderlichen Erkundungsaufwandes wird von der verfügbaren geowissenschaftlichen Datenlage in Deutschland ausgegangen sowie die Möglichkeit, internationale Erfahrungen und Daten auf die Bewertung von Standorten zu übertragen, berücksichtigt.
- Die übertägige Erkundung muss so ausgerichtet sein, dass zumindest die Anforderungen und Abwägungskriterien der Gewichtungsgruppe 1 und 2 aus den Empfehlungen des AKEnd abgeprüft werden kann. Um die anschließende orientierende Langzeitsicherheitsanalyse durchzuführen, muss ein standortadäquates Einlagerungs- und Verschlusskonzept (Endlagerkonzept) im erforderlichen Tiefgang entwickelt sein.

- Der Tiefgang der orientierenden Langzeitsicherheitsanalyse im Anschluss an die übertägige Erkundung muss die Aufstellung von Prüfkriterien (Eignungsprüfung) für die untertägige Erkundung ermöglichen.
- Die untertägige Erkundung muss die Grundlage für eine vollständige Langzeitsicherheitsanalyse und für einen abschließenden Vergleich von Standorten liefern.

4.3 Beitrag von Langzeitsicherheitsanalysen für den Endlagersystemvergleich

In jedem Verfahrensschritt des Standortauswahlverfahrens werden Langzeitsicherheitsanalysen mit dem Ziel durchgeführt, Erkenntnisse einerseits über das komplexe nichtlineare Zusammenwirken der Eigenschaften des Endlagersystems zu gewinnen und andererseits vorläufige Aussagen im Hinblick auf die Sicherheit zu generieren. Darüber hinaus werden mittels Sensitivitätsanalysen und Unsicherheitsanalysen der Einfluss der Datenunsicherheiten einerseits und die Sensitivität der als wesentlich für die Rückhaltung angesehenen Parameter andererseits ermittelt. Den Langzeitsicherheitsanalysen muss eine umfassende Szenarienentwicklung zugrunde liegen, in welcher die repräsentativen Szenarien identifiziert werden, die mittels Langzeitsicherheitsanalysen auf ihre Konsequenz hin behandelt werden.

Im Verlauf des Standortauswahlprozesses werden mehrfach Langzeitsicherheitsanalysen durchgeführt, die anfangs aufgrund des begrenzten Kenntnisstandes zu den Standortverhältnissen noch orientierenden Charakter haben. Bereits in der Phase II werden jedoch Befunde zum Standort in einem solchen Umfang erhoben, dass die Genehmigungsfähigkeit des Gesamtsystems erstmals geprüft werden kann. Die in diesem Verfahrensschritt durchgeführte Sicherheitsanalyse hat zwar noch vorläufigen Charakter, ist aber aufgrund der Befundlage mehr als nur generischer Natur. Am Ende der Phase III (untertägiger Erkundung) liegen ausreichende Kenntnisse über das Endlagersystem vor, so dass die entsprechenden Langzeitsicherheitsanalysen auch im Hinblick auf das anschließende Genehmigungsverfahren belastbare Aussagen liefern.

Zwischen den beiden Einsatzzeitpunkten der im Vorhaben VerSi entwickelten Abwägungsmethodik (Ende Phase II und Ende Phase III) erfolgt somit eine deutliche Verbesserung des Kenntnisstandes zu den zu vergleichenden Endlagersystemen. Gleiches gilt für die Belastbarkeit langzeitsicherheitsanalytischer Aussagen. Insofern ist zu erwarten,

dass die Einschätzung der Robustheit der Sicherheitsfunktionen (und der sie charakterisierenden Parameter) im Hinblick auf die Charakterisierbarkeit (vgl. Verfahrensschritt 5b, Kap. 11.3 und ggf. auch der Prognostizierbarkeit (im Sinne der Erweiterung des Prozessverständnisses, vgl. Verfahrensschritt 5c, Kap. 11.4) am Ende der Phase III prinzipiell höher ausfällt als am Ende der Phase II.

5 Sicherheits- und Endlagerkonzepte der zu vergleichenden Endlagersysteme

5.1 Sicherheitskonzepte

Das Sicherheitskonzept für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle beruht auf dem Prinzip des Konzentrierens und langfristigen Einschusses der radioaktiven Abfälle im einschlusswirksamen Gebirgsbereich, ohne dass korrigierende Maßnahmen nach Verschluss vorzusehen sind. Das Schwergewicht der Einschussfunktion liegt auf der geologischen Barriere. Die Anforderung an Einschuss der radioaktiven Abfälle wird durch die Endlagerung radioaktiver Abfälle in geeigneten Wirtsgesteinen, wie Steinsalz oder Tonstein, erfüllt. Diese Wirtsgesteine zeichnen sich durch extrem geringe Permeabilitäten und geringe Diffusionskoeffizienten aus. Im Falle von Endlagersystemen in Tonsteinformationen kommt hinzu, dass die Tonminerale gegenüber einer Vielzahl von Radionukliden signifikante Sorptionseigenschaften aufweisen.

Mit einem optimierten Verfüll- und Verschlussystem wird der anthropogene Eingriff in das Wirtsgestein korrigiert. Der einschlusswirksame Gebirgsbereich muss im Verbund mit dem Verfüll- und Verschlussystem Eigenschaften aufweisen, die den u. a. in /BMU 10/ geforderten Einschuss der radioaktiven Abfälle gewährleisten. Die an die Komponenten zu stellenden Anforderungen sind im Sicherheitskonzept unter Berücksichtigung der entsprechenden Wirkungszeiträume zu beschreiben. Im Nachfolgenden sind die wesentlichen Sicherheitskonzepte für Endlagersysteme in Steinsalz und Tonstein aufgelistet.

5.1.1 Sicherheitskonzept für Endlagersysteme in steil stehenden Steinsalzformationen

Wesentlich für die Isolationswirkung eines Endlagers im Steinsalz ist die extrem geringe **Durchlässigkeit** des Wirtsgesteins gegenüber Fluiden und damit auch gegenüber gelösten Radionukliden. Eine weitere wesentliche Eigenschaft ist die **Plastizität**, die langfristig zum Verschluss bergbaulicher Auffahrungen wie Schächte und Strecken führt, wobei das Wirtsgestein seine ursprünglichen barrierewirksamen Eigenschaften zurückgewinnt.

Die technischen Maßnahmen im Endlager dienen der Beschleunigung des autogenen Verschlusses durch Konvergenz. Dies wird erreicht durch Versatz mit arteigenem Material (Salzgrus) und durch die Minimierung des Lösungszutritts zu den Abfällen in der Anfangsphase bis zum Erreichen des dichten Wiederverschlusses mittels schnellwirkender Barrieren i.d.R. aus wirtsgesteinsfremdem Material. Die wichtigsten technischen und konzeptionellen Maßnahmen sind im Einzelnen /GRS 10c/:

- Einlagerung in geeignete und gut explorierbare Gesteinskörper,
- Verschluss von Tagesschächten und Zugangsstrecken mit Abdichtbauwerken (schnellwirkende Barrieren),
- Abtrennung der einzelnen Einlagerungsfelder durch Dammbauwerke,
- Verfüllung der offenen Hohlräume,
- Minimierung der mit den Abfällen bzw. dem Versatz eingebrachten Feuchtigkeit,
- Begrenzung der maximalen Kontakttemperatur am Steinsalzkörper auf 200°C,
- Einhaltung von Sicherheitsabständen zu nicht-hallitischen Gesteinsschichten (Carnallit, Hauptanhydrit, Salzstockflanken),
- Gewährleistung ausreichender Mächtigkeit der hangenden Gesteinsschichten zum Schutz des ewG (z.B. ausreichende Teufe).

5.1.2 Sicherheitskonzept für Endlagersysteme in Tonsteinformationen

Wesentlich für die Isolationswirkung eines Endlagers im Tonstein sind die **geringe Durchlässigkeit** des Wirtsgesteins gegenüber Fluiden, die **geringe Diffusion** von gelösten Stoffen und die **Sorption** von gelösten Radionukliden. Eine weitere wesentliche Eigenschaft ist die **Plastizität**, die im Verbund mit einem wirtsgesteinsähnlichen Versatzmaterial (Bentonit) langfristig zum Verschluss bergbaulicher Auffahrungen wie Schächte und Strecken führen.

Die technischen Maßnahmen im Endlager dienen der Beschleunigung des Selbstverschlusses durch Konvergenz durch Verfüllung mit arteigenem Material (Bentonit) und der Minimierung des Lösungszutritts zu den Abfällen in der Anfangsphase bis zum Erreichen des dichten Wiederverschlusses.

Die wichtigsten technischen und konzeptionellen Maßnahmen sind im Einzelnen:

- Verwendung von Abfallbehältern, die aufgrund ihrer Auslegung ihre Integrität über einen Zeitraum von mindestens 1000 a erhalten,
- Verfüllung der Einlagerungsstrecken,
- Versiegelung der Einlagerungsstrecken durch Abdichtungen,
- Verschluss von Tagesschächten und Zugangsstrecken mit Abdichtbauwerken (schnellwirkende Barrieren),
- Begrenzung der maximalen Temperatur im Tonstein auf 100°C,
- Gewährleistung ausreichender Mächtigkeit der hangenden Gesteinsschichten zum Schutz des ewG.

5.2 Einlagerungs- und Verschlusskonzepte

Die an die Komponenten zu stellenden Anforderungen unter Berücksichtigung der entsprechenden Wirkungszeiträume werden im Sicherheitskonzept (Kap. 5.1) beschrieben. Im Rahmen der Entwicklung eines standortadäquaten Endlagerkonzeptes (Behälter-Einlagerungs- und Verschlusskonzept) ist darzulegen, durch welche technischen Maßnahmen diese Anforderungen erfüllt werden können.

Es wird davon ausgegangen, dass der Antragsteller auf der Grundlage des vorgegebenen Sicherheitskonzeptes (z. B. Einschluss im ewG, passive Sicherheit, Verschluss der anthropogenen Eingriffe in die Geologie nach der Anforderung auf Einschluss) für den jeweils zu beurteilenden Standort ein Endlagerkonzept entwickelt. Im Endlagerkonzept wird die Einlagerungstechnik (z. B. Streckenlagerung, Bohrlochlagerung) begründet festgelegt und die Auslegung des Multibarrierensystems aus geologischen und geotechnischen Komponenten spezifiziert, so dass durch ein System ineinandergreifender Sicherheitsfunktionen die Langzeitsicherheit des Endlagers gewährleistet wird.

Die Anforderungen an die Komponenten des Multibarrierensystems leiten sich aus der übergreifenden Sicherheitsfunktion „Einschluss der Radionuklide derart, dass die Schutzziele und Sicherheitsprinzipien eingehalten werden“, ab. Die Feststellung der grundsätzlichen Genehmigungsfähigkeit des Endlagersystems erfordert weiterhin konkrete Nachweise zur Langzeitstabilität, Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit zu den (geo)technischen Komponenten (Behälter, Versatz, Dämme Schachtverschlüsse, Streckenabdichtungen etc.). Aufgrund derzeit fehlender detaillierter und im Sinne von Zuver-

lässigkeit und Qualität des langfristigen Einschusses der Abfälle sowie der Steigerung der Robustheit des Barrierensystems gegenüber inneren und äußeren Einflüssen und Störungen optimierter Endlagerkonzepte wurden im Vorhaben VerSi generische Endlagerkonzepte entwickelt. Diese werden im Nachfolgenden kurz beschrieben.

5.2.1 Einlagerungs- und Verschlusskonzept Steinsalzstandort Gorleben

Das als Basis der Arbeiten im Vorhaben VerSi für den Standort Gorleben entwickelte Endlagerkonzept /GRS 10c/ umfasst zwei Tagesschächte, die in einer Teufe von ca. 900 m im Infrastrukturbereich enden. Aus diesem Infrastrukturbereich führen zwei im Abstand von ca. 300 m parallel verlaufende Richtstrecken in das einsöhlige Einlagerungsbergwerk. Zwischen den Richtstrecken werden die Einlagerungsfelder aufgefahren. Hierzu werden Verbindungsstrecken (Querschläge) zwischen den Richtstrecken aufgefahren. Von diesen Querschlägen aus werden dann parallel zu den Richtstrecken bis zu acht 250 m lange Einlagerungsstrecken aufgefahren (Abb. 2).

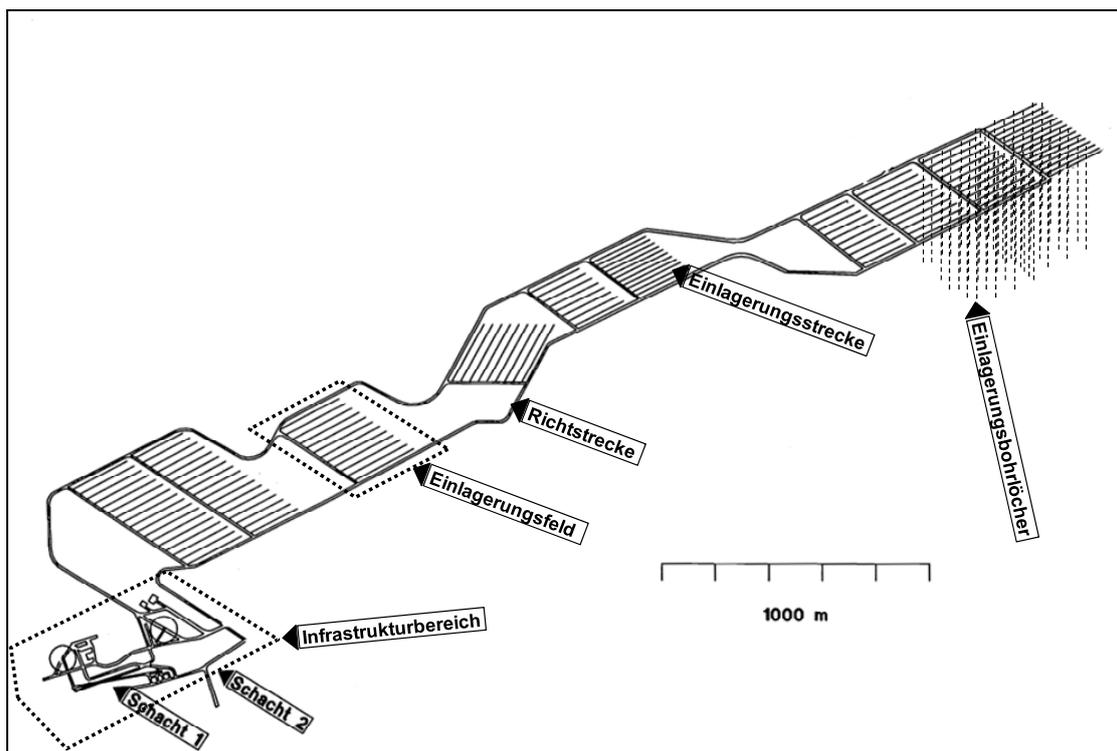


Abb. 2: Schematische Struktur des Einlagerungskonzeptes für den Steinsalzstandort Gorleben (aus /GRS 10c/ verändert nach /DBE 98/)

Für die Einlagerung der wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle werden nach bisherigen Abschätzungen insgesamt neun Einlagerungsfelder benötigt. Die minimalen Ab-

stände zwischen den Abfallbehältern bzw. den Einlagerungsbohrlöchern in den Einlagerungsfeldern ergeben sich aus der Anforderung, dass die Temperatur durch den Wärmeeintrag auf Grund der wärmeentwickelnden Abfälle an der Kontaktfläche von Einlagerungsstrecke oder Bohrloch und der Salzformation 200°C nicht überschreiten soll. In die beiden Einlagerungsfelder, die vom Schacht am weitesten entfernt sind, werden Kokillen mit Abfällen aus der Wiederaufarbeitung (CSD-B, CSD-C und CSD-V) in bis zu 300 m tiefen Bohrlochern endgelagert. In den sieben weiteren Einlagerungsfeldern werden bestrahlte Brennelemente in Pollux-Behältern durch Ablegen in den Einlagerungstrecken endgelagert.

Das Verschlusskonzept basiert darauf, dass alle geschaffenen Hohlräume im Rückbauprinzip versetzt werden. Die versetzten Hohlräume, die langfristig eine Barrierewirksamkeit entfalten müssen, werden mit kompaktierbarem Salzgrus versetzt. Die Querschläge der Einlagerungsbereiche werden gegenüber den Richtstrecken mit Dämmen aus vor-kompaktiertem Salzgrus und die Richtstrecken gegenüber dem Infrastrukturbereich mit Abdichtbauwerken aus Salzbeton (Basis ist das Konzept der Streckenverschlüsse aus nicht kompaktierbarem Salzbeton für das Endlager Morsleben) versehen. Die beiden Tagesschächte werden mit jeweils zwei Abdichtbauwerken z. B. auf Basis des Konzeptes des Schachtverschlusses Salzdetfurth (setzungsarme Schottersäule, Dichtelementen aus kompaktiertem Bentonit, Salzgrus-Bentonit Mischungen und eventuell Asphaltzwischenichtungen), dicht verschlossen.

5.2.2 Einlagerungs- und Verschlusskonzept für den Tonsteinstandort

Die Basis der Arbeiten im Vorhaben VerSi ist das für den Standort Gorleben entwickelte Endlagerkonzept. Dieses wurde im Rahmen des VerSi-Teilvorhabens 3607R02538 „Planerische Grundsatzfragen zur Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen“ /GRS 10a/ auf der Grundlage des Konzeptentwurfs der DBE /DBE 98/ erarbeitet. Das Einlagerungs- und Verschlusskonzept für den Tonsteinstandort ist schematisch in Abb. 3 dargestellt.

Es handelt sich um ein einsöhliges Endlagerbergwerk in einer Teufe von ca. 450 m, in dem Einlagerungsbereiche für HAW (bestrahlte Brennelemente / verglaste Abfälle aus der Wiederaufarbeitung) und MAW (technologische Abfälle aus der Wiederaufarbeitung) getrennt eingelagert werden.

Das Endlagerbergwerk wird in der ersten Ausbaustufe (Nutzung der HAW-Einlagerungsfelder I und II) über zwei Schächte erschlossen. Es handelt sich um den zentralen Hauptschacht (HS) über den alle radioaktiven Abfälle in das Endlager transportiert werden und der als ausziehender Wetterschacht dient sowie den Schacht 1, für den Personen- und Materialtransport bzw. die einziehenden Frischwetter. In der 2. Ausbaustufe (Nutzung der HAW-Einlagerungsfelder III und IV) erfolgt das Abteufen des Schachtes 2. Das Grubengebäude wird in seiner letzten Ausbaustufe somit durch drei Schächte erschlossen sein. Alle Tagesschächte enden in einer Teufe von ca. 450 m.

Das Endlagerbergwerk enthält einen Service- und Infrastrukturbereich, der zur Aufnahme von Wasserhaltung, Energieversorgung, Treibstofflager und Werkstatt dient.

Die HAW-Einlagerungsbereiche werden durch vollständige Umfahrungen erschlossen. Die Umfahrungen umfassen die Einlagerungstranstrecken (in Abb. 3 rot dargestellt), die Wetterstrecken (blau) sowie die Baustrecken, in (grün).

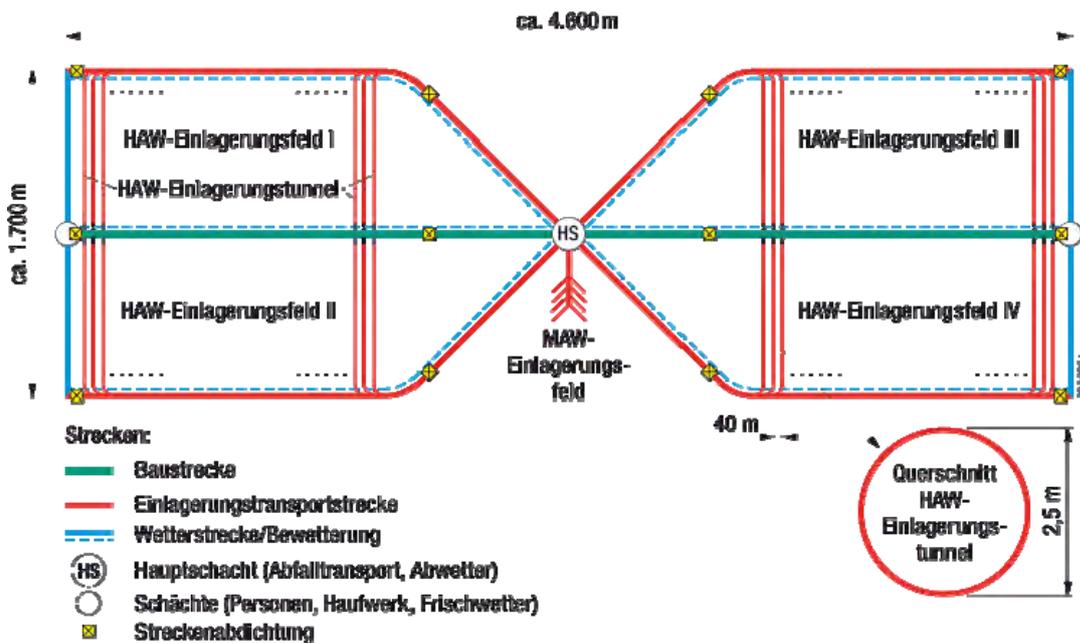


Abb. 3: Schematische Darstellung des Einlagerungs- und Verschlusskonzeptes für den Tonsteinstandort /GRS 10a/.

Das Endlagerkonzept sieht einen Einlagerungsbereich für **HAW** mit insgesamt vier Einlagerungsfeldern für 3.612 Endlagerbehälter mit CSD-V sowie 9.995 Endlagerbehälter mit bestrahlten Brennelementen vor. Die vier Einlagerungsfelder sind von ihrem Aufbau identisch und gruppieren sich symmetrisch um den Hauptschacht. Für die Endlagerung der HAW-Abfallgebände werden zwischen der Baustrecke und der Einlagerungstranst-

portstrecke parallele Einlagerungstunnel aufgefahren. Die Länge der Einlagerungstunnel beträgt etwa 800 m bei einem Tunneldurchmesser von 2,5 m. Der Abstand zwischen zwei Einlagerungstunneln beträgt 40 m. Ein HAW-Einlagerungsfeld umfasst etwa 33 parallele Einlagerungstunnel. Die Abfallgebände werden in den Einlagerungstunneln kraft- und formschlüssig auf Bentonitblöcken abgelegt.

Der **MAW**-Einlagerungsbereich wird durch eine vom Hauptschacht ausgehende Strecke erschlossen. Diese MAW-Einlagerungstransportstrecke hat eine Länge von ca. 300 m. Nach etwa 200 m zweigen rechts und links von der MAW-Einlagerungstransportstrecke jeweils 4 Blindstrecken im Abstand von 20 m ab. Diese Blindstrecken, mit einem Querschnitt von 6 x 6 m und einer Länge von 80 m, sind die Einlagerungskammern für den MAW. In den Blindstrecken werden ca. 670 Abfallgebände 2-lagig gestapelt. Diese kubischen Beton-Behälter mit einer Kantenlänge von 2,5 m enthalten jeweils neun CSD-C und CSD-B-Kokillen mit mittelradioaktivem Abfall deren Zwischenräume mit Zementmörtel verfüllt sind. Der Querschnitt der Einlagerungskammern liegt bei ca. 36 m². Als Sicherungsmaßnahme für die Einlagerungskammern wird ein einschaliger Ausbau, bestehend aus Ankern und Spritzbeton, vorgesehen.

Das Versetzen der HAW-Einlagerungstunnel erfolgt unmittelbar nach Einlagerung der Behälter durch Bentonitgranulat. Die Zugänge zu den HAW-Einlagerungstunneln werden nach erfolgter Einlagerung verschlossen und abgedichtet (Versiegelung). Die Versiegelungen sind sandwichartig aufgebaut. Die Dichtelemente bestehen aus Bentonitgranulat und einer Mischung aus Bentonit und Sand. Der Lastabtrag erfolgt über eine Schotterkiespackung, die zwischen den Dichtelementen eingebaut ist. Gegenüber der Einlagerungstransport- bzw. der Baustrecke wird die Versiegelung durch eine Betonwand geschützt. Diese Betonwand hat eine Schutzfunktion für die Versiegelung bis zum Zeitpunkt der Verfüllung der jeweiligen Strecke.

Das in den MAW-Einlagerungstunnel zwischen den Abfallgebänden verbleibende Hohlraumvolumen wird mit Zementmörtel versetzt. Die Zugänge (Schleusen) werden über den gesamten Querschnitt durch eine Betonwand abgemauert.

Die um die HAW Einlagerungsfelder herumlaufenden Strecken (Bau-, Wetter- und Einlagerungstransportstrecken) werden mit einem Bentonit/Quarzsand-Gemisch versetzt. Der Versatz der Strecken geht mit der Errichtung von Abdichtbauwerken an so genannten Schlüsselpositionen (Abb. 3) einher. Gleiches gilt für die MAW-Einlagerungstransport-

strecke. Der Service- und Infrastrukturbereich wird einschließlich der Zufahrtsstrecke mit einem Schotter/Sand-Gemisch verfüllt.

Das Schachtverschlusskonzept entspricht den bisherigen Planungen im Projekt Opalinuston NAGRA /NAG 02/ auf. Im Bereich der Schachtabdichtung wird der Schachtausbau vollständig entfernt und Auflockerungen werden beseitigt. Das eigentliche Dichtelement besteht aus einem 40 m hohen kompaktierten Bentonitblock, der hinsichtlich seines Durchmessers deutlich über den ursprünglichen Schachtdurchmesser hinausgeht. Das Dichtelement stützt sich auf eine Schottersäule ab, die bis in den ehemaligen Schachtsumpf reicht. Eine weitere Abdichtung wird in die Schächte im Bereich unterhalb der Fischerschiefer-Schicht in einer Teufe zwischen 250 und 310 m eingebaut.

5.2.3 Einteilung der Endlagersysteme in Komponenten und Kompartimente

Ausgehend von den im vorangegangenen vorgestellten Endlagerkonzepten wurde eine Systematisierung des Netzwerkes an Sicherheitsfunktionen eines Endlagersystems vorgenommen. Dabei wurden die Gesamtsysteme in einzelne Komponenten und Kompartimente gegliedert. Diese Strukturierung, an der sich sämtliche weitere Verfahrensschritte orientieren, ist schematisch in Abb. 4 dargestellt.

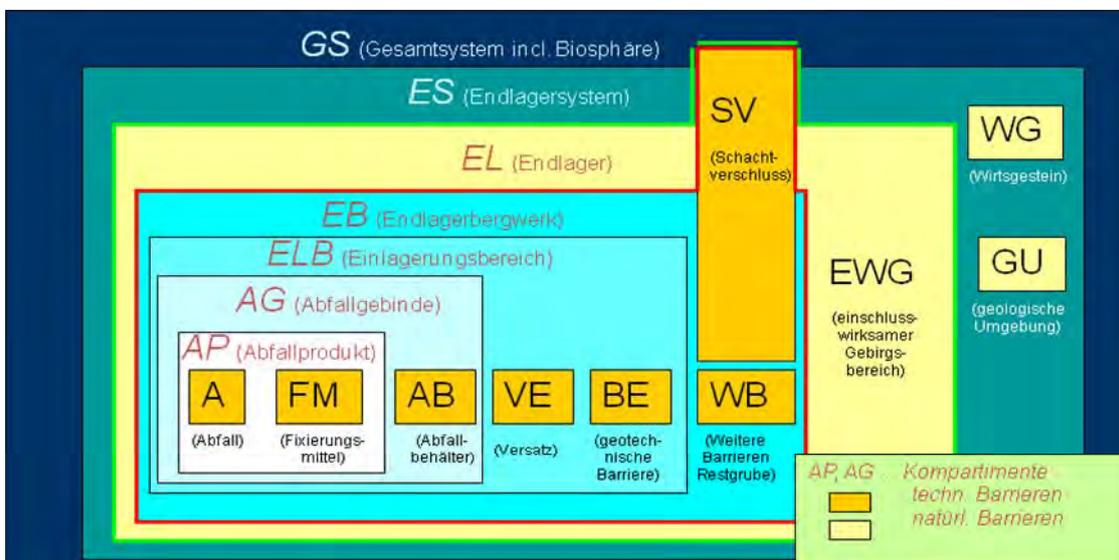


Abb. 4: Schematische Darstellung der Kompartimente und Komponenten eines Endlagersystems. Die rote Linie umfährt das Endlagerbergwerk, der einschlusswirksame Gebirgsbereich wird von der grünen Linie begrenzt. WG = weiteres Wirtsgestein (im Sinne dieses Berichtes).

Es handelt sich um ein System gestaffelter sicherheitsrelevanter Komponenten, bestehend aus technischen und natürlichen Barrieren, die innerhalb ineinander verschachtelter Kompartimente liegen. Im Einzelnen handelt es sich um:

- das **Abfallprodukt**, welches aus den radioaktiven Abfällen und dem Fixierungsmittel besteht und quasi den Behälterinhalt darstellt,
- das **Abfallgebinde**, d. h. der Behälter und das in ihm eingeschlossene Abfallprodukt,
- den **Einlagerungsbereich**, der neben den Abfallgebinden den Versatz der Einlagerungstrecken und deren Abdichtungen umfasst,
- das **Endlagerbergwerk**, welches aus den versetzten und abgedichteten Einlagerungsbereichen und infrastrukturell genutzten Hohlräumen (Zugangs- und Bewetterungstrecken) sowie den abgedichteten Schächten besteht,
- das **Endlager**, welches sich aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG) mit dem Endlagerbergwerk zusammensetzt und in dem die rückhaltenden Sicherheitsfunktionen (s. Kap. 8) wirken,
- das **Endlagersystem**, welches zusätzlich den nicht zum ewG gehörigen Anteil des Wirtsgesteins sowie das Deckgebirge (geologische Umgebung) enthält. Aufgabe dieses Kompartiments ist der Schutz des ewG gegenüber mechanischen, hydraulischen oder geochemischen Einflüssen von außen durch integritätswahrende Sicherheitsfunktionen (s. Kap. 8).

Eingerahmt sind diese Kompartimente in das **Gesamtsystem**, welches im Wesentlichen die oberhalb des Deckgebirges anschließende Biosphäre und ggf. noch neben bzw. unterhalb des Endlagers anschließende geologische Formationen umfasst. Da hierzu bei beiden Endlagerkonzepten für Tonstein und Steinsalz keine sicherheitsrelevanten Anforderungen bestehen, wird dieses Kompartiment hier nur der Vollständigkeit halber erwähnt, im vorliegenden Bericht jedoch nicht weiter behandelt.

6 Die Abwägungsmethodik im Überblick

Die Gesamtrobustheit eines Endlagersystems hängt von der Robustheit der einzelnen Sicherheitsfunktionen ab. Die Bewertung der Robustheit der einzelnen Sicherheitsfunktionen ist daher die Grundlage für die vergleichende Bewertung zweier Endlagersysteme und damit zentrales Ziel der hier vorgestellten verbal-argumentativen Abwägungsmethodik. Hierzu wird ein sequentiell gestuftes Abwägungsverfahren durchlaufen, dessen Struktur als Gesamtübersicht in Abb. 5 dargestellt ist.

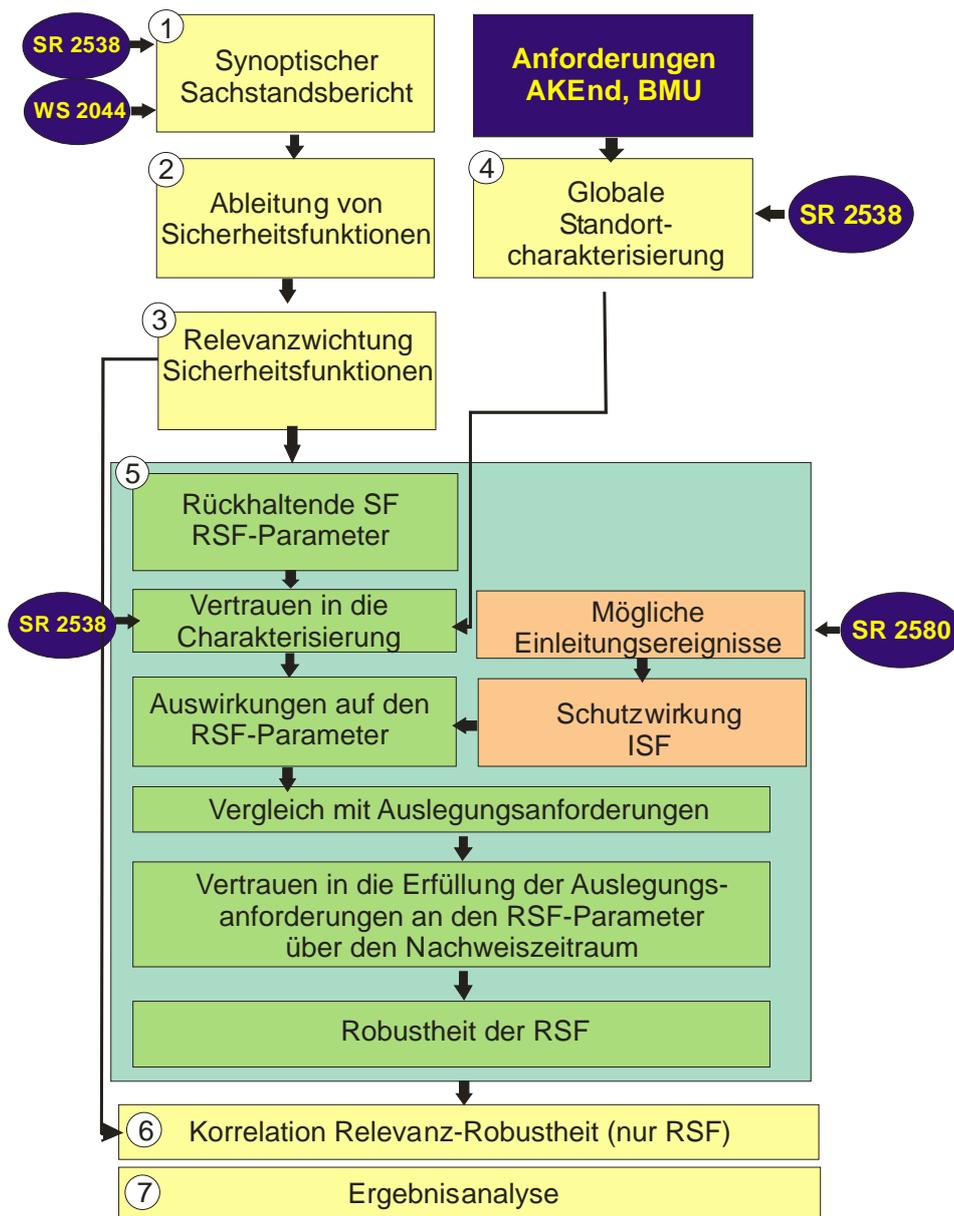


Abb. 5: Überblick über die Einzelschritte der verbal-argumentativen Abwägungsmethodik für den Endlagersystemvergleich. (SF: Sicherheitsfunktion, RSF: Rückhaltende Sicherheitsfunktion, ISF: Integritätsbewahrende Sicherheitsfunktion, SR

2580: VerSi Teilvorhaben: „Szenarientwicklung“ 3607R02580; SR 2538:
VerSi Teilvorhaben: „Planerische Grundsatzfragen“ 3607R02538, WS 2044:
VerSi Teilvorhaben: „Vergleichende Langzeitsicherheitsanalysen“).

Kern der Methodik ist eine durchstrukturierte und systematisierte und jeweils begründete Einschätzung der Gesamtrobustheit der zu vergleichenden Endlagersysteme und zwar auf der Grundlage der Robustheit der rückhaltenden Sicherheitsfunktionen (Definition siehe Kap. 2.4) und hier wiederum auf der Basis der die rückhaltenden Sicherheitsfunktionen charakterisierenden Parameter. Zur Bewertung werden die übergeordneten Kriterien herangezogen, die die Robustheit im Sinne der Definition in Kap. 2.3 kennzeichnen. Im Vorfeld der Robustheitsbewertung sind allerdings zunächst eine Reihe vorbereitender Arbeitsschritte durchzuführen:

Synoptischer Sachstandsbericht (s. Kap. 7, ① in Abb. 5)

Im ersten Schritt geht es darum, die notwendige Informationsgrundlage für nachfolgende Untersuchungen und Bewertungen zur Robustheit der Endlagersysteme zu schaffen. Für einen späteren operativen Endlagersystemvergleich wird davon ausgegangen, dass im Zuge der Untersuchung der zu vergleichenden Standorte durch den Antragsteller eine schrittweise aktualisierte Dokumentation der Erkundungsergebnisse und der Ergebnisse begleitender Sicherheitsanalysen erfolgt. Diese werden den zwei entscheidungsrelevanten Haltepunkten des Standortauswahlverfahrens (s. Kap. 4) zu Grunde gelegt. Ziel des ersten Verfahrensschrittes des verbal-argumentativen Abwägungsverfahrens ist es, diese Informationen entsprechend aufbereitet für die zu vergleichenden Endlagersysteme systematisch einander gegenüberzustellen. Zu diesem Zweck wird entlang der im vorangegangenen Kap. 5.2.3 beschriebenen Endlagersystemkomponenten eine beschreibende synoptische Gegenüberstellung der natürlichen Standorteigenschaften sowie der Sicherheits- und Endlagerkonzepte für die zu vergleichenden Endlagersysteme (synoptischer Sachstandsbericht) erarbeitet. In diesem Zusammenhang erfolgt auch eine Auflistung der aus den Sicherheitskonzepten abgeleiteten Anforderungen an die einzelnen Endlagerkomponenten (technische und geotechnische Barrieren, sowie einschlusswirksamer Gebirgsbereich).

Im Vorhaben VerSi flossen bei der Erstellung des synoptischen Sachstandsberichtes die Standortbeschreibungen und die Endlagerkonzepte ein, die im Rahmen der VerSi Teilvorhaben 3607R02538 zum Tonsteinstandort in /GRS 10a/ und zum Salinarstandort in /GRS 10c/) dokumentiert wurden. Der synoptische Sachstandsbericht, der im Vor-

haben VerSi (Teilvorhaben 3607R02589 Evaluierung) erarbeitet wurde, liegt als separates Dokument /GRS 10d/ vor.

Aus zwei Gründen ist dringend zu empfehlen, dass dieser synoptische Sachstandsbericht auch im Zuge eines späteren operativen Standortvergleichs als eigenständiges Dokument erarbeitet wird:

a) Methodisch-theoretischer Grund

Die Gegenüberstellung der Informationen zu den zu vergleichenden Endlagersystemen sollte rein deskriptiv erfolgen und sich so weit wie möglich subjektiven Bewertungen zur Zuverlässigkeit der Datenlage oder zur Prognostizierbarkeit enthalten. Hintergrund ist, dass diese Sachverhalte erst im Rahmen der verbal-argumentativen Abwägungsmethodik einer systematischen Prüfung unterzogen werden. Zum anderen muss aus methodischen Gründen eine möglichst weitgehende Trennung von indikativen (objektiven) Sachverhaltdarstellungen und normativen (subjektiven) bewertenden Einschätzungen sichergestellt werden (vgl. Kap. 3). So muss insbesondere beim Bewertungsprozess möglichst klar zwischen indikativen Elementen (Sachebene) und normativen Elementen (Wertebeine) unterschieden werden. Diesem Aspekt wurde im vorliegenden Fall durch die Trennung des synoptischen Sachstandsberichtes und der vorliegenden Beschreibung der verbal-argumentativen Abwägungsmethodik (= normative Ebene) Rechnung getragen.

b) Verfahrenstechnischer Grund

Es ist vorstellbar, dass bei einem späteren operativen Standortvergleich mehrere Gruppen (z. B. der Verfahrensführer sowie verschiedene Interessensgruppen) die Bewertung der Robustheit der zu vergleichenden Endlagersysteme getrennt voneinander durchführen und die (ggf. unterschiedliche) Bewertung der Robustheit, die auf der Grundlage des verbal-argumentativen Abwägungsverfahrens gewonnen wurden, anschließend diskutieren. In diesem Fall ist es von entscheidender Bedeutung, dass alle Gruppen die gleiche Informationsbasis verwenden, zu dessen Inhalt und Umfang Konsens besteht. Ist dies nicht der Fall, ist ein Vergleich der (ggf. unterschiedlichen) Einschätzungen zur Robustheit nicht möglich, da unterschiedliche indikative Bezugssysteme vorliegen.

Ableitung von Sicherheitsfunktionen (s. Kap. 8, ② in Abb. 5)

- Ausgehend von den im synoptischen Sachstandsbericht aus den

Sicherheitskonzepten abgeleiteten Anforderungen an die einzelnen Endlagerkomponenten erfolgt eine komponentenweise Auflistung von Sicherheitsfunktionen. Hierbei werden alle Sicherheitsfunktionen gemäß ihrer Wirkungsweise in rückhaltende Sicherheitsfunktionen (RSF) und integritätsbewahrende Sicherheitsfunktionen (ISF) gegliedert. Hierbei sind gemäß den Definitionen in Kapitel 2.4 rückhaltende Sicherheitsfunktionen solche, deren Wirkung primär der Radionuklidrückhaltung dient. Integritätsbewahrende Sicherheitsfunktionen dienen dagegen dem Schutz von Komponenten z. B. gegenüber mechanischen oder thermischen Lasten, die sich aus der Endlagerentwicklung oder externen Einwirkungen auf das Endlagersystem ergeben. Weiterhin werden zusätzliche Sicherheitswirkungen identifiziert. Dies sind rückhaltende Eigenschaften von Systemkomponenten, die außerhalb des ewG (weiteres Wirtsgestein, Deckgebirge) liegen und von denen in den Sicherheitskonzepten kein Kredit genommen wird.

- Eine systematische Zuordnung der sicherheitsgerichteten Wirkungen zu diesen 3 Gattungen ist wichtig, da allein die rückhaltenden Sicherheitsfunktionen in den nachfolgenden Verfahrensschritten einer Robustheitsbewertung unterzogen werden. Die integritätsbewahrenden Sicherheitsfunktionen werden dagegen bei der Bewertung der Systemrobustheit im Hinblick auf den Schutz rückhaltender Sicherheitsfunktionen vor internen oder externen Einwirkungen berücksichtigt (Verfahrensschritt 5c, Kap. 11.4). Zusätzliche Sicherheitswirkungen können im Sinne einer Sicherheitsreserve bei der Bewertung des Vertrauens in die Erfüllung der Auslegungsanforderungen (Verfahrensschritt 5c, Kap. 11.4) berücksichtigt werden.

Relevanzwichtung der Sicherheitsfunktionen (s. Kap. 9, ③ in Abb. 5)

Prinzipiell leistet jede Sicherheitsfunktion direkt oder indirekt ihren spezifischen Beitrag zur Radionuklidrückhaltung im ewG und ist damit grundsätzlich von Relevanz, wobei die Sicherheitsfunktionen im Hinblick auf ihre diesbezügliche Bedeutung jedoch graduelle Unterschiede aufweisen können. Auch kann die Wirkung einer Sicherheitsfunktion auf einen bestimmten Zeitabschnitt beschränkt sein. Im Vorfeld der Bewertung der Robustheit von Sicherheitsfunktionen ist daher das unterschiedliche Gewicht (Relevanz), mit der die Sicherheitsfunktionen zur Erfüllung der Globalanforderung an ein Endlagersystem (Radionuklidrückhaltung im ewG) beitragen, unter Berücksichtigung der

jeweiligen Wirkungszeiträume zu würdigen. Im vorliegenden Fall wurden zwei Wirkungszeiträume unterschieden:

- a) Eine Übergangsphase, die bei einem Teil der Barrieren benötigt wird, damit diese auslegungskonforme Eigenschaften annehmen. In dieser Zeit wird die Radionuklidrückhaltung von „schnellwirkenden“ Barrieren (wie z. B. Behälter, Schacht- und Streckenabdichtungen) im Verbund mit dem ewG gewährleistet.
- b) Einer stationären Langzeitphase in der die Barrieren aus wirtsgesteinsähnlichem Material ihre auslegungskonforme Eigenschaften angenommen haben und im Verbund mit dem ewG eine dauerhafte Radionuklidrückhaltung bewirken.

Aus methodischen Gesichtspunkten ist als ungefähre Zeitgrenze zwischen beiden Phasen der Zeitpunkt 10.000 a nach Endlagerverschluss angesetzt worden (s. Kap. 9.3). Jedoch ist bei einem entsprechend verfüllten und verschlossenen Endlagerbergwerk davon auszugehen, dass die Barrieren mit wirtsgesteinsähnlichem Material zu diesem Zeitpunkt ihre volle Isolationswirkung entfaltet haben.

Auf Grund fehlender quantitativer Maßstäbe für die Relevanz kann die Wichtung der Sicherheitsfunktionen nach ihrer Relevanz nur entlang von Ordinalskalen erfolgen. Bei diesem Ranking ist lediglich eine Ordnungsaussage möglich (wichtiger, weniger wichtig etc.), wobei die Abstände zwischen den einzelnen Rangplätzen nicht bekannt sind. Im vorliegenden Fall erfolgte die Einteilung der Sicherheitsfunktionen in 5 Relevanzklassen (5 = sehr hohe Relevanz, d. h. „unverzichtbar“ bis 1 = sehr geringe bzw. keine Relevanz).

Relevanzwichtung und Robustheitsbewertung gehen im Verfahrensschritt 6 (Kap. 12) mit dem gleichen Gewicht ein. Für den Endlagersystemvergleich spielt daher auch die Relevanzwichtung eine maßgebliche Rolle. Es wird dringend empfohlen, die Relevanzwichtung der Sicherheitsfunktionen **vor** der Bewertung ihrer Robustheit auszuführen. Andernfalls besteht die Gefahr, dass in die Relevanzwichtung die Erfahrungen aus der Robustheitsbewertung einfließen. Durch diese subjektiven Einflüsse kann (möglicherweise unbewusst) über das Ranking der Relevanz das Vergleichsergebnis manipulativ verzerrt werden.

Globale Standortcharakterisierung (s. Kap. 10, ④ in Abb. 5)

Aufgrund der Komplexität der natürlichen Komponenten des ewG wird eine gezielte Gegenüberstellung der sicherheitsrelevanten Standorteigenschaften beider Endlagersysteme empfohlen, ein Schritt, der aufgrund des deutlich einfacheren strukturellen Aufbaus bei geotechnischen und technischen Komponenten entfallen kann. In Vorbereitung der Robustheitsprüfung zur Charakterisierbarkeit und Prognostizierbarkeit der Parameter von rückhaltenden Sicherheitsfunktionen des ewG (Verfahrensschritt 5, Arbeitsschritte 5b und 5c) erfolgt eine systematische Zusammenstellung der geometrischen, geologischen, hydraulischen, geomechanischen und erdgeschichtlichen Eigenschaften der zu vergleichenden Standorte, zweckmäßigerweise in tabellarischer Form.

Ziel der globalen Standortbewertung ist weiterhin die Gegenüberstellung der sicherheitsgerichteten Anforderungen an den Standort und der tatsächlichen Eigenschaften, die die Standortkandidaten aufweisen. Soweit vorhanden werden dazu die aus den Sicherheitskonzepten zu beiden Standorten erforderlichen Auslegungsanforderungen, im Wesentlichen nach dem Anforderungskatalog nach AKEnd /AKE 02/, aufgelistet und den tatsächlichen Standorteigenschaften gegenübergestellt.

Die globale Standortcharakterisierung kann prinzipiell auch im Rahmen des synoptischen Sachstandsberichtes (objektiv-indikative Ebene, vgl. Kap. 3) erfolgen. Da im vorliegenden Fall jedoch teilweise subjektive Bewertungen, z. B. hinsichtlich der Charakterisierbarkeit der Standorte bezüglich der Homogenität/Inhomogenität des geologischen Strukturaufbaus, vorgenommen wurden, wurden die oben genannten Aspekte in einem separaten Arbeitsschritt innerhalb des vorliegenden Methodenbandes (subjektiv-normative Ebene) behandelt.

Ermittlung der Robustheit der rückhaltenden Sicherheitsfunktionen (s. Kap. 11, ⑤ in Abb. 5)

Der zentrale Verfahrensschritt der verbal-argumentativen Abwägungsmethodik ist die Bewertung der Robustheit der Sicherheitsfunktionen. Die Bewertung der Robustheit erfolgt dabei anhand der die rückhaltenden Sicherheitsfunktionen charakterisierenden Parameter (und ggf. auch Prozesse). Der Grund für den Übergang auf die Parameterebene ist, dass Sicherheitsfunktionen zunächst lediglich qualitativ-verbale Beschreibungen der Umsetzung sicherheitsgerichteter Anforderungen an die einzelnen Systemkom-

ponenten darstellen und sich somit nicht primär einer Robustheitsbewertung unterziehen lassen. So können Sicherheitsfunktionen nicht selbst gemessen werden, sondern nur die sie charakterisierenden Parameter. Im letzten Arbeitsschritt der Robustheitsbewertung werden die Einzelbewertungen zu den Parametern zur Gesamtrobustheit der betreffenden Sicherheitsfunktion aggregiert.

Gemäß der Definition in Kap. 2.3 umfasst der Begriff Robustheit zwei übergeordnete und in ihrer Natur unterschiedliche Aspekte:

- a)** Unempfindlichkeit der Sicherheitsfunktionen gegenüber inneren und äußeren Einflüssen.

Die Unempfindlichkeit des Endlagersystems gegenüber inneren und äußeren Einflüssen wird im nachfolgenden als Systemrobustheit bezeichnet. Zu externen Einflüssen zählen veränderte Randbedingungen, die sich aus der natürlichen Standortentwicklung ergeben (z. B. die Reaktion auf Inlandeisüberfahung). Bei internen Einflüssen handelt es sich um endlagerinduzierte Prozesse wie z. B. Einflüsse durch zerfallsbedingte Temperaturerhöhung oder korrosionsbedingte Gasdruckerhöhung im Endlagerbergwerk. Im Rahmen der verbal-argumentativen Abwägungsmethodik wird die Systemrobustheit reziprok, d.h. als Ausmaß der Veränderung des Parameterwertes einer rückhaltenden Sicherheitsfunktion infolge innerer und äußerer Einwirkungen auf das Endlagersystem bewertet. Eine hohe Systemrobustheit ist dann gegeben, wenn die Änderung des Parameterwertes gering ist oder sich die Änderung des Parameterwertes auf die Radionuklidrückhaltung innerhalb der betrachteten Endlagerkomponente positiv auswirkt.

- b)** die Charakterisierbarkeit und Prognostizierbarkeit der Sicherheitsfunktionen im Sinne des Vertrauens in die Erfüllung der Auslegungsanforderungen.

Hierbei geht es um die Bewertung, wie hoch die Aussagesicherheit, d. h. das Vertrauen in die Quantifizierung von Parametern rückhaltender Sicherheitsfunktionen über den geforderten Wirkungszeitraum ist. Es wird entlang verschiedener Kriterien geprüft, wie sicher man sein kann, dass ein bestimmter Parameterwert durch Messungen charakterisiert oder beim Bau geotechnischer Barrieren eingehalten werden kann (Charakterisierbarkeit für den Istzustand). Weiterhin wird überprüft, wie gut das Prozessverständnis ist, um Veränderungen des Parameterwertes infolge externer oder interner Einwirkungen (s. o.) prognostizieren zu können.

Auch in diesem Verfahrensschritt erfolgt die Robustheitseinstufung der Parameter der rückhaltenden Sicherheitsfunktionen entlang von Ordinalskalen, da quantitative Maßstäbe, nach denen die Robustheit „gemessen“ werden könnte, zumindest nicht durchgängig vorhanden sind. Bei diesem Ranking ist, wie bereits erwähnt, lediglich eine Ordnungsaussage möglich wobei die Abstände zwischen den einzelnen Rangplätzen nicht bekannt sind. Im vorliegenden Fall erfolgte die Einteilung in 5 Robustheitsklassen (5 = sehr hohe Robustheit bis 1 = sehr geringe Robustheit).

In Analogie zur Relevanzbewertung erfolgt auch die Robustheitsbewertung für die beiden Wirkungszeiträume < 10.000 a und > 10.000 a getrennt. Bei der Bewertung der Systemrobustheit und des Prozessverständnisses (Prognostizierbarkeit von Veränderungen des Parameterwertes infolge externer oder interner Einwirkungen) muss die Bewertung der rückhaltenden Sicherheitsfunktionen und der sie charakterisierenden Parameter prinzipiell für jedes im Rahmen einer vorlaufenden Szenarienentwicklung identifizierte Einwirkungsereigniss (externe oder interne Einwirkungen) getrennt vorgenommen werden. Im Vorhaben VerSi erfolgte die Szenarienentwicklung im Teilvorhaben 3607R02580, die Ergebnisse wurden in /GRS 10b/ dokumentiert

Zur Illustration des Vorgehens bei der Robustheitsbewertung erfolgte im Rahmen des Vorhabens VerSi für beide zu vergleichende Endlagersysteme eine beispielhafte Anwendung der verbal-argumentativen Abwägungsmethodik auf die Sicherheitsfunktionen der Endlagersystemkomponenten:

- Abfallbehälter,
- Versatz in den Einlagerungsbereichen,
- Abdämmung der Einlagerungsbereiche (Gorleben) sowie Abdichtungen der Einlagerungstrecken (Tonsteinstandort),
- Versatz in der Restgrube sowie
- Schachtverschlüsse und Streckenabdichtungen zum Infrastrukturbereich (Gorleben) und
- Einschlusswirksamer Gebirgsbereich.

Die beispielhafte Anwendung der Robustheitsbewertung beschränkt sich dabei auf zwei exemplarische Einwirkungen:

- a) korrosionsbedingte Gasdruckerhöhung im Porenraum (interne Einwirkung für den Wirkungszeitraum $t < 10.000a$) und
- b) Inlandeisüberfahung mit Bildung von Schmelzwassererosionsrinnen (externe Einwirkung für den Wirkungszeitraum $t > 10.000a$)

Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurden die beispielhaften Robustheitsbewertungen in separaten Berichten dokumentiert, die in digitaler Form auf einer CD-ROM dem vorliegenden Erläuterungsband beigelegt sind /GRS 10e bis GRS 10j/. Auszugsweise werden die beispielhaften Robustheitsbewertungen auch im Nachfolgenden zur Illustration der Erläuterung der einzelnen Arbeitsschritte zur Bewertung der Robustheit herangezogen.

Korrelation Relevanz-Robustheit (s. Kap. 12, ⑥ in Abb. 5)

Die Korrelation zwischen Relevanz und Robustheit der Sicherheitsfunktionen bildet die Synthese der Verfahrensschritte ③ und ⑤ in Abb. 5. Ziel ist es, für den Vergleich der Endlagergesamtsysteme Hinweise auf mögliche „Robustheitsdefizite“ bei den jeweiligen Sicherheitsfunktionen zu identifizieren (Negativselektion). Es geht allerdings noch nicht um eine „Endbewertung“ der Endlagersysteme, sondern zunächst nur darum, potentielle Anhaltspunkte für relevanzgewichtete Robustheitsschwächen zu gewinnen, die im letzten Verfahrensschritt ⑦ genauer analysiert werden. Im Grundsatz wird dabei davon ausgegangen, dass ein Endlagersystem dann eine ideale Robustheit aufweist, wenn alle rückhaltenden Sicherheitsfunktionen bezogen auf ihre Relevanz *angemessene* Robustheiten aufweisen. So bestehen bei rückhaltenden Sicherheitsfunktionen, die als sehr relevant (Einstufung 5), d.h. als unverzichtbar eingestuft wurden, entsprechend hohe Erwartungen an die Robustheit. Diese werden dann erfüllt, wenn die Bewertung der Sicherheitsfunktion im Verfahrensschritt ⑤ mindestens zur Einstufung als „robust“ (Einstufung 4) geführt hat. Entsprechendes gilt für rückhaltende Sicherheitsfunktionen deren Relevanz geringer als 5 eingestuft wurde. Auch hier gilt die Erwartung einer bezüglich der Relevanz angemessenen Robustheitseinstufung. Fällt die Robustheitseinstufung dagegen um 2 oder mehr Ordinalklassen geringer aus als die entsprechende Relevanzeinstufung, so wird dies als Hinweis auf eine Robustheitsschwäche des jeweiligen Endlagersystems gewertet. Robustheitseinstufungen von rückhaltenden Sicherheitsfunktionen, die höher als die erwartete Mindesteinstufung liegen, führen dagegen zu keinem „Robustheitsgewinn“ des betrachteten Endlagersystems.

Ergebnisanalyse (s. Kap. 13, ⑦ in Abb. 5)

Ziel des letzten Verfahrensschrittes ist die Bewertung der im vorangegangenen Verfahrensschritt zunächst formal identifizierten Robustheitsdefizite. Es erfolgt eine Analyse, welche Einzelaspekte zu einer (bezogen auf ihre Relevanz) kritischen Robustheitseinschätzung beigetragen haben. Weiterhin werden die Auswirkungen der Robustheitsdefizite auf die Einschusswirkung der zu vergleichenden Endlagersysteme sowie die Ursachen der Robustheitsdefizite im Hinblick auf ihre Behebbarkeit untersucht.

Auch im Verfahrensschritt ⑦ wird keine Kompensation der identifizierten Robustheitsdefizite im Sinne einer Verrechnung vorgenommen. Dies bedeutet, dass es beispielsweise nicht zielführend ist, dasjenige Endlager als Favorit herauszustellen, welches weniger Robustheitsdefizite als das andere aufweist oder ein Robustheitsdefizit mit einem besonders robusten Befund einer anderen Sicherheitsfunktion zu kompensieren. Vielmehr wird das Ergebnis verbal-argumentativ bewertet werden müssen.

Generell erfolgt keine endgültige Entscheidung, welches der beiden Endlagersysteme das zu bevorzugende ist. Dies bleibt im späteren operativen Standortauswahlprozess dem Entscheider vorbehalten. Endziel des verbal-argumentativen Abwägungsverfahrens ist es vielmehr, dem Entscheider die Ergebnisse des Abwägungsverfahrens soweit aufbereitet und interpretiert zur Verfügung zu stellen, dass dieser eine vergleichsweise einfache Endabwägung vornehmen und eine begründete Entscheidung treffen kann.

7 **Verfahrensschritt 1: Synoptischer Sachstandsbericht**

Für die zu vergleichenden Endlagersysteme (wirtsgesteinsabhängig, Endlagerkonzept abhängig) wird ein sogenannter synoptischer Sachstandsbericht erstellt. Wie bereits in Kap. 6 erwähnt, ist es das Ziel des synoptischen Sachstandsberichtes, die sicherheitskonzeptionellen Anforderungen und die den Radionuklideinschluss bewirkenden sicherheitsrelevanten Eigenschaften beider Endlagersysteme in Salz und Tonstein vollständig zu erfassen und zu beschreiben. Weiterhin werden für jede Komponente (z. B. Behälter, Streckenabdichtungen, Schachtverschlüsse, ewG etc.) für beide Endlagersysteme systematisch einander gegenübergestellt sowie auf der Basis der sicherheitskonzeptionellen Anforderungen an die jeweilige Komponente die entsprechenden Sicherheitsfunktionen unter Berücksichtigung ihrer zeitabhängigen Wirkung abgeleitet. Die deskriptive Gegenüberstellung von Standorteigenschaften und Verschlusskonzepten erleichtert den qualitativen Vergleich von ähnlichen sicherheitsgerichteten Eigenschaften und bildet die indikative Informationsgrundlage für die Robustheitsbewertung der Sicherheitsfunktionen beider Endlagersysteme. Inhaltlich weist der synoptische Bericht keine (subjektiven) vergleichenden Wertungen oder Abwägungen auf, sondern er beschränkt sich auf eine **wertungsneutrale und objektive Sachstandsgegenüberstellung**.

Als beispielhafte Vorlage kann der im Vorhaben VerSi erstellte synoptische Sachstandsbericht für die Endlagersysteme Tonstein und Steinsalz /GRS 10d/ herangezogen werden (Beispiel siehe Abb. 6). Im Sinne der strikten Trennung von indikativen Elementen (Sachebene) und normativen Elementen (Wertebene) /APP 09/ ist der synoptische Sachstandsbericht nicht Bestandteil des vorliegenden Dokumentes, welches seinerseits normative Elemente, die für den Wertungs- und Abwägungsprozess im Sinne des entscheidungsorientierten Standortvergleichs erforderlich sind, beinhaltet. Der synoptische Sachstandsbericht sollte auch in einem späteren operativen Endlagersystemvergleich aus den in Kap. 6 genannten Gründen als separates Dokument vorliegen und als Informationsbasis für die Anwendung des Abwägungsverfahrens dienen.

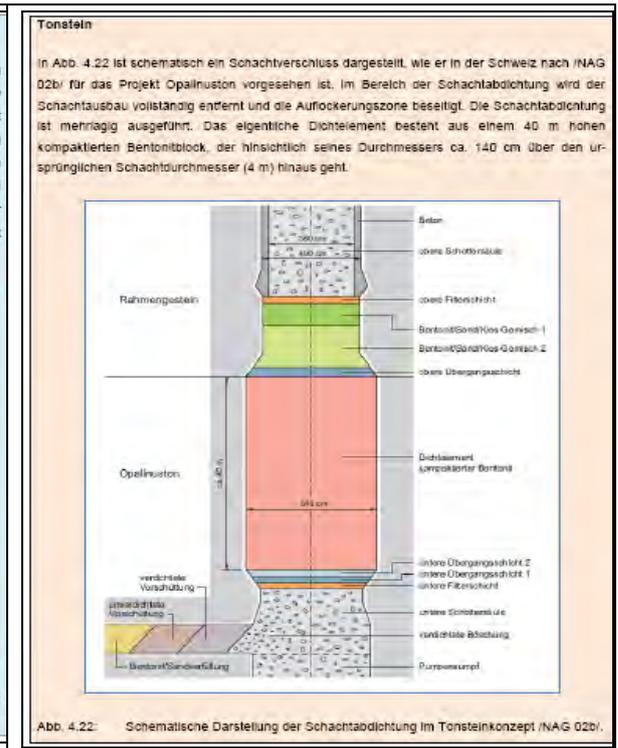


Abb. 6: Beispielhafte Darstellung eines Auszugs aus dem synoptischen Sachstandsbericht /GRS 10d/, der im Vorhaben VerSi erarbeitet wurde. Dargestellt sind die Konzepte zur Abdichtung der Zugangsschächte (links: Verschlusskonzept Gorleben; rechts Verschlusskonzept zum generischen Tonsteinstandort)

8 Verfahrensschritt 2: Ableitung von Sicherheitsfunktionen und Aufbereitung für den Endlagersystemvergleich

Im synoptischen Sachstandsbericht /GRS 10d/ wurden auf der Basis der konzeptionellen Anforderungen an die Endlagersystemkomponenten Sicherheitsfunktionen systematisch für die Endlagersysteme in Steinsalz und Tonstein zusammengestellt¹. Dies geschah zunächst unabhängig davon, ob die Sicherheitsfunktionen der Rückhaltung der endgelagerten Radionuklide dienen oder den Schutz der rückhaltenden Sicherheitsfunktionen bewirken. Insgesamt wurden knapp 70 Sicherheitsfunktionen identifiziert, welche in unterschiedlichen Zeitspannen innerhalb des Nachweiszeitraums ihre Wirkung entfalten. Im synoptischen Sachstandsbericht erfolgte die Ableitung der Sicherheitsfunktionen an jeder Komponente, wobei Sicherheitsfunktionen hier gleichsam als „Antworten“ auf die jeweiligen sicherheitskonzeptionellen Anforderungen definiert wurden. Eine zielgerichtete Aufbereitung für einen systematischen Endlagersystemvergleich erfolgte hierbei noch nicht.

Aus diesem Grund erfolgt im Verfahrensschritt 2 eine Überarbeitung der Liste der Sicherheitsfunktionen mit dem Ziel einer vergleichsorientierten Systematisierung und –falls möglich – einer Zusammenfassung von Sicherheitsfunktionen ähnlicher Wirkungsweise zum Zwecke der Vereinfachung der nachfolgenden Bewertungen der Relevanz und Robustheit von Sicherheitsfunktionen. Die Ergebnisse dieses Aufbereitungsschrittes sind tabellarisch in Anhang 1 dargestellt. Die Überarbeitung betraf folgende Aspekte:

1. Alle Sicherheitsfunktionen wurden gemäß ihrer Wirkungsweise in rückhaltende Sicherheitsfunktionen (RSF) und integritätsbewahrende Sicherheitsfunktionen (ISF) gegliedert. Hierbei sind gemäß der Definition in Kap. 2.4 rückhaltende Sicherheitsfunktionen solche, deren Wirkung primär der Radionuklidrückhaltung dient (z. B. Begrenzung/Verhinderung von Lösungsbewegung und Radionuklidtransport durch hydraulischen Widerstand, Sorption, Löslichkeitsbegrenzung etc.). Integritätsbewahrende Sicherheitsfunktionen (ISF) dienen dagegen dem Schutz von Komponenten, z. B. gegenüber mechanischen oder thermischen Lasten, die sich aus der Endlagerentwicklung (z. B. Gasdruckaufbau infolge Behälterkorrosion) oder externen Einwirkungen auf das Endlagersystem (z. B. Kaltzeit mit Inlandvereisung) ergeben. Damit unterstüt-

¹ Für einen späteren operativen Endlagersystemvergleich ist es nicht zwingend erforderlich, die Ableitung von Sicherheitsfunktionen bereits im Zuge einer synoptischen Gegenüberstellung der Endlagerkomponenten vorzunehmen, dies kann auch in einem nachfolgenden Arbeitsschritt erfolgen.

zen sie die Wirkung der RSF oder machen die rückhaltende Wirkung einer RSF überhaupt erst möglich.

2. Sämtliche den Abfallprodukten zugeordnete Sicherheitsfunktionen wurden – im Rahmen dieser Arbeit - für den Endlagersystemvergleich gestrichen. Der Grund ist, dass Art, Menge und Beschaffenheit der Abfälle als gleiche und unveränderliche Randbedingungen jedem der beiden Endlagersysteme in gleicher Weise zugrunde gelegt werden muss. Aufgrund dessen spielen diese Sicherheitsfunktionen für einen abwägenden Vergleich keine Rolle.
3. Bei integritätsbewahrenden Sicherheitsfunktionen wurde vermerkt, auf welche Komponente sich ihre Schutzwirkung bezieht, da dies dem Systemverständnis zu den Auswirkungen von internen und/oder externen Einwirkungen auf das Endlagersystem in Arbeitsschritt 5c erleichtert.
4. Eine Reihe von Sicherheitsfunktionen (RSF und ISF) wurden im Nachhinein gestrichen, ohne den Endlagersystemvergleich zu beeinflussen, da deren Wirkung derjenigen einer anderen Sicherheitsfunktion zugeschrieben werden konnte. Dies betraf beispielsweise die Sicherheitsfunktionen, deren Wirkung in der Filterung von Kolloiden besteht. Dieser (für die Radionuklidrückhaltung insgesamt als weniger entscheidend eingestufte) Prozess wurde bei den entsprechenden Sicherheitsfunktionen „Verzögerung der Radionuklid Ausbreitung durch Sorption“ mit berücksichtigt. Diese Korrekturmaßnahme war der iterativen Vorgehensweise bei der Entwicklung der verbalargumentativen Vergleichsmethodik geschuldet. Für die operative Anwendung der Vergleichsmethodik wird jedoch zur Verringerung subjektiver Einflüsse dringend empfohlen, die Art und Anzahl der Sicherheitsfunktionen zu Beginn des Vergleichsverfahrens im Einvernehmen unter den Verfahrensbeteiligten festzulegen. Es ist weiterhin möglich, im Rahmen der Relevanzwichtung (s. Kap. 9) solchen Sicherheitsfunktionen, die als vergleichsunerheblich angesehen werden, eine sehr geringe Relevanz zuzuordnen.
5. Sämtliche **rückhaltenden** Sicherheitsfunktionen im weiteren Wirtsgestein und im Deckgebirge werden als zusätzliche Sicherheitswirkungen bezeichnet. Hintergrund ist, dass es sich hierbei nicht um Sicherheitsfunktionen im Sinne der Definition in Kap. 2.4 handelt. Hiernach sind die konzeptionellen Anforderungen bezüglich der Isolationswirkung des Endlagersystems auf den ewG im Verbund mit den technischen und geotechnischen Endlagerkomponenten beschränkt. Bei den Sicherheitswirkun-

gen des Deckgebirges kommt hinzu, dass diese zum Teil hinsichtlich ihrer zeitlichen Wirksamkeit und Isolationswirkung nicht sicher zu prognostizieren sind. Die zusätzlichen Sicherheitswirkungen des weiteren Wirtsgesteins und im Deckgebirge können jedoch (soweit ihre Wirkung über den Betrachtungszeitraum (s. Kap. 9.3) prognostiziert werden kann) bei Freisetzungen aus den ewG, die aus wenig wahrscheinlichen Szenarien resultieren, in die Robustheitsbewertung (Arbeitsschritt 5d, siehe Kap. 11.4) als Sicherheitsreserve einfließen. Die **integritätsbewahrende** Sicherheitsfunktionen des weiteren Wirtsgesteins und des Deckgebirges sind jedoch als „echte“ Sicherheitsfunktionen beizubehalten, da ihre Wirkung auch vom Sicherheitskonzept her dem Schutz der rückhaltenden Sicherheitsfunktionen des Endlagers (ewG und (geo)technische Komponenten) dient (Beispiel ISF Nr. 54: „Integritätserhalt des ewG: Schutz des ewG vor Erosion und Subrosion“).

Die für den Endlagersystemvergleich aufbereiteten Sicherheitsfunktionen für den Steinsalz- und den Tonsteinstandort sind, getrennt nach der Art ihres sicherheitsgerichteten Beitrags (rückhaltende Sicherheitsfunktionen RSF / integritätsbewahrende Sicherheitsfunktionen ISF), in Anhang 1 aufgelistet. Jeder der oben angeführten Modifikationsschritte wurde entsprechend begründet. Nach Abschluss der Aufbereitung der Sicherheitsfunktionen stehen für die nachfolgende Bewertung von Relevanz und Robustheit im Rahmen der Abwägungsmethodik für den Endlagersystemvergleich 14 rückhaltende Sicherheitsfunktionen an. Daneben bestehen 21 integritätsbewahrende Sicherheitsfunktionen und 8 „zusätzliche Sicherheitswirkungen“ im weiteren Wirtsgestein und im Deckgebirge.

9 **Verfahrensschritt 3: Relevanzwichtung der Sicherheitsfunktionen**

Im Vorfeld der Bewertung der Robustheit von Sicherheitsfunktionen ist dem Umstand Rechnung zu tragen, dass die Sicherheitsfunktionen mit unterschiedlichem Gewicht zur Erfüllung der Globalanforderung des Radionuklideinschlusses im ewG im Verbund mit technischen und geotechnischen Barrieren beitragen.

Hinzu kommt, dass die Sicherheitsfunktionen der verschiedenen Endlagerkomponenten – wie im Nachfolgenden erläutert wird - innerhalb der verschiedenen Zeitabschnitte der Phase nach Verschluss des Endlagers, nämlich einer **Übergangsphase** und einer **stationären Langzeitphase**, von unterschiedlicher Relevanz für die Erfüllung der übergeordneten Forderung nach Isolation/Rückhaltung der Radionuklide innerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches sein können. Folglich ist es sinnvoll, die Relevanzwichtung für die beide Zeiträume getrennt vorzunehmen.

Das Ziel dieses Arbeitsschrittes liegt somit in der Einordnung der Bedeutung (Stellenwert) einer Sicherheitsfunktion für die Erfüllung der übergeordneten Anforderung an ein Endlagersystem, nämlich einer möglichst weitgehenden Rückhaltung von Radionukliden innerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches im Verbund mit dem Verschlusssystem. Hierbei ist anzumerken, dass die identifizierten Sicherheitsfunktionen allesamt aus Anforderungen an das Endlagersystem abgeleitet wurden, die in ihrer Summe die Erfüllung oben genannter Globalanforderung erfüllen. Insofern leistet jede Sicherheitsfunktion räumlich und zeitlich ihren spezifischen Beitrag zur Sicherheit eines Endlagersystems und ist damit grundsätzlich von Relevanz, wobei im Hinblick auf das Gesamtziel jedoch graduelle Unterschiede bestehen. Auch kann die Wirkung bestimmter Sicherheitsfunktionen auf einen bestimmten Zeitraum beschränkt sein oder erst nach Eintritt einer Entwicklung erforderlich werden, außerhalb dessen sie als nicht relevant einzustufen ist. Sicherheitsfunktionen, die über den gesamten Nachweiszeitraum als nicht relevant einzustufen wären existieren dagegen nicht, in diesem Fall wäre die zugrundegelegte Anforderung unsinnig bzw. überflüssig.

9.1 **Einteilung in Relevanzklassen**

Da kein quantitativer Maßstab für Relevanz besteht, kann die Wichtung der Relevanz der Sicherheitsfunktionen nur anhand von Ordinalskalen in Form von Relevanzklassen

vorgenommen werden. Bei diesem Ranking der Sicherheitsfunktionen ist lediglich eine Ordnungsaussage möglich (wichtiger, weniger wichtig etc.).

Die Relevanz jeder Sicherheitsfunktion wird in fünf Relevanzklassen eingeteilt¹. Diese Zuordnung ist formal für die rechnerische Korrelation Relevanz-Robustheit im Arbeitsschritt 6 erforderlich. Die Sicherheitsfunktionen, die der Klasse 1 zugeordnet wurden, haben die geringste Relevanz, diejenigen in Klasse 5 die höchste. Dieses Skalenniveau erlaubt die Zuordnung zu Relevanzklassen, wobei allerdings die Unterschiede zwischen den Klassen (Abstände, Spannweite) nicht bekannt sind. Beispielsweise ist die Relevanzklasse 4 nicht doppelt so bedeutsam wie die Klasse 2 – der Unterschied bedeutet nur, dass die Klasse 4 wichtiger ist als die Klasse 3 und deutlich wichtiger ist als die Klasse 2. Sicherheitsfunktionen, die im Hinblick auf die übergeordnete Anforderung Radionuklidrückhaltung im Endlager unverzichtbar sind, wurden sämtlich die höchsten ordinalen Rangzahlen (Klasse 5) zugeordnet. Unverzichtbar bedeutet, dass der (vollständige) Ausfall dieser Sicherheitsfunktion die geforderte Radionuklidrückhaltung des gesamten Endlagersystems in Frage stellen könnte. Der Klasse 1 wurden dagegen solche Sicherheitsfunktionen zugeordnet, die konzeptionell für den jeweiligen Betrachtungszeitraum oder für das jeweilige Endlagerkonzept irrelevant sind. Die betrifft zum Beispiel die Sicherheitsfunktionen des Behälters für den Zeitraum > 10.000 a (s. Kap. 9.3) oder die Radionuklidrückhaltung im Versatz und dem ewG des Salzstandortes durch Sorptionsvorgänge.

Die Einordnung der Sicherheitsfunktionen in Relevanzklassen erfolgt im Wesentlichen auf Grundlage von Expertenmeinung, denn die Voraussetzungen für eine "objektive" Quantifizierung der Relevanz werden bei der weit überwiegenden Zahl von Sicherheitsfunktionen auf Grund von begrenztem Systemverständnis sowie der nichtlinearen komplexen Verknüpfung von Eigenschaften und Sicherheitsfunktionen im Detail nicht gegeben sein. Da mit der Bestimmung der Relevanz weitreichende

¹ Durch die Einteilung in 5 Klassen wird eine relative starke Spreizung der Relevanzskala und der darauf beruhenden Bewertungsergebnisse erzeugt. Sollte es sich in der Anwendungspraxis als schwierig erweisen, für eine so differenzierte Einteilung aussagekräftige Zuordnungsbegründungen ("Bewertungsfunktionen") abzuleiten und die einzelnen Sicherheitsfunktionen auf dieser Basis zu beurteilen, empfiehlt es sich, mit nur drei oder vier Relevanzklassen zu arbeiten. Bei der beispielhaften Entwicklung und auch bei Anwendung der verbal-argumentativen Abwägungsmethodik hat sich jedoch für die Relevanz- und auch für die Robustheitsbewertung eine Aufteilung in 5 Bewertungsklassen als praktikabel erwiesen.

Konsequenzen für die spätere Einstufung der Gesamtrobustheit der zu vergleichenden Endlagersysteme verbunden sind, bedürfen die Festlegungen für die einzelnen Sicherheitsfunktionen der sorgfältigen Begründung. Zur Minimierung des subjektiven Einflusses der Expertenmeinung(en) bietet es sich an, eine "neutrale" externe Expertengruppe, die ansonsten mit dem Vergleich der Endlagersysteme nicht beauftragt ist, mit dieser Aufgabe zu betrauen. Gerade bei der Festlegung der Relevanz, die wegen ihrer hohen Bedeutung für das Bewertungsergebnis eine Schlüsselgröße darstellt, muss der subjektive Einfluss minimiert werden.

Bei der Relevanzwichtung der Sicherheitsfunktionen muss hinterfragt werden, wie wichtig die Bedeutung der jeweiligen Sicherheitsfunktion für die Erfüllung der übergeordneten Globalanforderung, des Radionuklideinschlusses im Endlager, ist. Beurteilt wird also der relative Beitrag jeder Sicherheitsfunktion zur Sicherheit der Endlagersysteme, und zwar differenziert nach dem Endlagersystemtyp (Steinsalz bzw. Tonstein) und den Wirkungszeiträumen ($t < 10.000 \text{ a}$ / $t > 10.000 \text{ a}$, s. Kap. 9.3). Eine alleinige Beschränkung der Relevanzwichtung auf die Bedeutung einer Sicherheitsfunktion innerhalb *einer* Komponente ist dagegen nicht zulässig, da so am Ende der Vergleichsmethodik kein globaler Gesamtvergleich durchgeführt werden kann. Für die zu bemessenden Endlagersysteme wird also das gleiche übergeordnete Sicherheitsniveau als Maßstab angelegt. Aus dieser Randbedingung lässt sich die Gleichwertigkeit der Relevanzklassen in den unterschiedlichen Endlagersystemen ableiten. Durch die Gleichwertigkeit der Relevanzklassen wird ein Vergleich unterschiedlicher Endlagersysteme „auf Augenhöhe“ ermöglicht.

9.2 Praktische Vorgehensweise

Bei der Relevanzwichtung sind folgende Aspekte zu berücksichtigen:

- Die Relevanzwichtung betrifft in erster Linie die rückhaltenden Sicherheitsfunktionen (RSF). Ein Einbezug der integritätsbewahrenden Sicherheitsfunktionen ISF (wie im vorliegenden Fall) ist nicht unbedingt erforderlich. Die integritätsbewahrenden Sicherheitsfunktionen (ISF) tragen zwar ebenfalls zur Robustheit eines Endlagersystems bei, jedoch in der Weise, dass durch sie die jeweils korrespondierende rückhaltende Sicherheitsfunktion gegenüber äußeren Einwirkungen „geschützt“ wird, also in ihrer Wirkung weitgehend unbeeinträchtigt bleibt. Der Robustheitsbeitrag, den die jeweiligen ISF durch die Schutzwirkung gegenüber der korrespondierenden RSF liefern, wird infolgedessen bei der Bewertung der Robustheit der RSF im Verfahrensschritt 5 mit berücksichtigt. Eine separate Bewertung der Robustheit

der ISF findet dort jedoch nicht statt, von daher ist eine Relevanzwichtung der ISF methodisch nicht erforderlich. Die Korrelation Relevanz-Robustheit im Verfahrensschritt 6 betrifft somit alleine die RSF. Ein Einbezug der ISF kann jedoch im Sinne der Entwicklung eines besseren Systemverständnisses in Vorbereitung des Verfahrensschrittes 5 sinnvoll sein. Im vorliegenden Fall wurden daher auch die ISF beispielhaft einer Relevanzwichtung unterzogen.

- Integritätsbewahrende Sicherheitsfunktionen, die den Schutz rückhaltender Sicherheitsfunktionen bewirken, sind (sofern man sie hinsichtlich ihrer Relevanz bewerten möchte) dann gleich relevant wie die komplementäre rückhaltende Sicherheitsfunktion, wenn ihr Ausfall mit hoher Wahrscheinlichkeit das Versagen der komplementären rückhaltenden Sicherheitsfunktion nach sich ziehen würde.
- Temperaturbegrenzende Maßnahmen sind für beide Wirtsgesteine bei der Endlagerauslegung von Bedeutung. Tonstein reagiert aufgrund seiner höheren Temperaturempfindlichkeit empfindlicher als Steinsalz. Sicherheitsfunktionen die Temperaturbegrenzung betreffend können durch eine geeignete Auslegung gesteuert werden.
- Einwirkungen von innen und außen werden bei der Relevanzwichtung nur bei *integritätsbewahrenden* Sicherheitsfunktionen in die Betrachtung mit einbezogen. Dies geschieht, indem der Grad der Schutzwirkung der integritätsbewahrenden Sicherheitsfunktionen gegenüber den komplementären rückhaltenden Sicherheitsfunktionen bei gegebenen internen oder externen Einwirkungen abgewogen wird. Eine Bewertung der *rückhaltenden* Sicherheitsfunktionen im Hinblick auf ihre Robustheit gegenüber diesen Einwirkungen erfolgt dagegen explizit in der Bewertung der Robustheit der Parameter rückhaltender Sicherheitsfunktionen im Verfahrensschritt ⑤ (Arbeitsschritt 5c).
- Wie bereits erwähnt, betrifft die Wichtung einer Sicherheitsfunktion ihre Relevanz im jeweiligen Endlagersystem. Die Bestimmung der Relevanz erfolgt für alle Sicherheitsfunktionen eines Endlagersystems unter übereinstimmendem Blickwinkel – im Hinblick auf die Globalanforderung Radionuklideinschluss im ewG im Verbund mit den geotechnischen Barrieren. Von daher sind alle Sicherheitsfunktionen, die derselben Relevanzklasse zugeordnet werden, in ihrer Bedeutung für die integrale Sicherheit des jeweiligen Endlagersystems und des jeweiligen Wirkungszeitraums als "gleichwertig" anzusehen. Das bedeutet jedoch nicht, dass Sicherheitsfunktionen mit übereinstimmenden Relevanzklassen bei Endlagersystemen unterschiedlichen Typs direkt vergleichbar wären. Aufgrund der unterschiedlichen Sys-

teme und der darin spezifisch wirkenden Sicherheitsfunktionen kann eine Vergleichbarkeit an dieser Stelle noch nicht erreicht werden. Dies wäre allenfalls bei wirtsgesteinsgleichen Systemen (z. B. beim Vergleich zweier Tonsteinstandorte) mit gleichen Endlagerkonzepten erreichbar.

- Im Zuge der Relevanzichtung wird auch – soweit vorhanden – (zeitweise) redundant oder diversitär auftretenden rückhaltenden Sicherheitsfunktionen Rechnung getragen. Zwei Sicherheitsfunktionen sind innerhalb des jeweiligen Betrachtungszeitraums ($t < 10.000$ a und $t > 10.000$ a, s. Kap. 9.3) dann vollständig redundant, wenn bei vollständigem Ausfall einer der beiden Sicherheitsfunktionen die andere die radionuklidrückhaltende Wirkung der ausgefallenen Pendants vollständig übernehmen kann. In diesem Fall ist keine der beiden Sicherheitsfunktionen allein für sich unverzichtbar. Daher kann keine Einstufung in die höchste Relevanzklasse (5 = sicherheitskonzeptionell unverzichtbar, s. Kap. 9.1) erfolgen. Eine derartige Einstufung würde nämlich in Verfahrensschritt © (Kap. 12) bei der Korrelation Relevanz-Robustheit der Sicherheitsfunktionen möglicherweise zu einer falschen Einstufung der Robustheit des gesamten Endlagersystems führen. Von sehr relevanten Sicherheitsfunktionen wird nämlich eine Robustheitseinstufung von mindestens „hoch“ (Ordinalrang 4) gefordert, damit diese im Sinne der Robustheit des gesamten Endlagersystems als „unauffällig“ gelten und nicht einen Hinweis auf eine eventuelle Robustheitsschwäche des gesamten Endlagersystems geben. Bei zwei vollständig redundanten Sicherheitsfunktionen wäre somit die oben genannte Anforderung an die Robustheit für jede der beiden Sicherheitsfunktionen einzeln betrachtet zu streng, die redundante Wirkung bliebe bei der abschließenden Robustheitsbewertung des gesamten Endlagersystems unberücksichtigt. Daher sollten rückhaltende Sicherheitsfunktionen die vollständig redundant sind in Relevanzklassen < 5 eingeordnet werden.
- Um im Rahmen des Verfahrensschrittes © mathematische Operationen z. B. mit Hilfe von Tabellenkalkulationsprogrammen zu ermöglichen, sollten der Relevanzbewertung auch diejenigen Sicherheitsfunktionen, die
 - bei einem der beiden Endlagersystemen konzeptionell keine Rolle spielen (z. B. die RSF „Verzögerung der Radionuklid Ausbreitung durch Sorption“ im Salzgrusversatz Gorleben) oder
 - in einem der betrachteten Wirkungszeiträumen nicht relevant sind (z. B. die RSF „Begrenzung/Verhinderung des Lösungszutritts zum Abfallprodukt infolge Dichtwirkung der Behälterwandungen“ im Zeitraum $t > 10.000$ a), die man auch begrün-

det aussondern und nicht weiter betrachten könnte, formal eine ordinale Rangzahl von 1 (= sehr gering bzw. nicht relevant) zugeordnet werden. Auf das Abwägungsergebnis hat dies keinerlei Einfluss.

Zur näheren Erläuterung der Durchführung der Relevanzwichtung ist zunächst nochmals auf die beiden Endlagerkonzepte einzugehen.

9.2.1 Steinsalz

Wesentlich für die Radionuklidrückhaltung im Steinsalz ist die äußerst geringe Permeabilität des Wirtsgesteins gegenüber Fluiden und damit auch gegenüber gelösten Radionukliden. Eine weitere wesentliche Eigenschaft ist die plastizitätsbedingte Fähigkeit des Selbstverschlusses, wodurch langfristig ein Verschluss bergbaulicher Auffahrungen wie Schächte und Strecken erreicht wird und sich die ursprünglichen barrierewirksamen Eigenschaften des Wirtsgesteins zurückbilden.

Die geotechnischen Maßnahmen im Endlager zielen ab auf die Beschleunigung des konvergenzbedingten Selbstverschlusses durch Verfüllung mit wirtsgesteinsähnlichem Material (Salzgrus) und der Vermeidung von Lösungszutritten von außen in das Endlagersystem und letztlich zu den Abfällen. In der anfänglichen Übergangsphase bis zum Erreichen des dichten Wiederverschlusses der mit Salzgrus verfüllten Hohlräume wird die Barrierewirkung des Verschlusssystems durch „schnellwirkende“ geotechnische Barrieren aus ggf. wirtsgesteinsfremdem Material erreicht.

Zu diesen „schnellwirkenden“ Abdichtungen gehören im Verschlusskonzept zu Gorleben die Schachtverschlüsse und die Streckenabdichtungen zum Infrastrukturbereich. Der Verschluss von Tagesschächten und Zugangsstrecken zum Infrastrukturbereich erfolgt durch Abdichtbauwerke aus wirtsgesteinsfremdem Material (Kombinationsabdichtung aus Bentonit und Asphalt bzw. Salzbetonabdichtungen in den Richtstreckenabschlüssen zum Infrastrukturbereich hin). Diese Abdichtbauwerke haben die Aufgabe, Lösungszutritte in die Einlagerungsbereiche von Beginn der Übergangsphase an bis zu dem Zeitpunkt zu verhindern, zu dem die mit Salzgrus (wirtsgesteinsähnliches Material) versetzten Hohlräume soweit konvergiert und verschlossen sind, dass ihre hydraulischen Eigenschaften annähernd die Qualität des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches (intaktes Steinsalz) angenommen haben. In der stationären Langzeitphase übernimmt der kompaktierte Versatz dann die langfristige Dichtfunktion und den Einschluss. Die Über-

gangsphase dauert je nach geologischer Konfiguration des Salzstocks und je nach Endlagerkonzept wenige 100 bis einige 1.000 Jahre.

9.2.2 Tonstein

Wesentlich für die Isolationswirkung eines Endlagers im Tonstein sind die geringe Durchlässigkeit des Wirtsgesteins gegenüber Fluiden, die geringe Diffusionskoeffizienten und die Sorption von gelösten Radionukliden. Eine weitere wesentliche Eigenschaft ist – wenngleich weniger stark ausgeprägt als im Steinsalz - die plastizitätsbedingte Selbstheilungseigenschaft, die im Verbund mit einem wirtsgesteinsähnlichen Versatzmaterial (Bentonit) langfristig zum Verschluss bergbaulicher Auffahrungen wie Schächte und Strecken führt.

Die technischen Maßnahmen im Endlager dienen der Beschleunigung des Hohlraumverschlusses durch Verfüllung mit wirtsgesteinsähnlichem Material (Bentonit-Sandgemisch), welches bei Lösungszutritt quellfähig ist und selbstabdichtend wirkt. Hierdurch werden einerseits eine Minimierung des Lösungszutritts zu den Abfällen erreicht und andererseits nach Wiederaufsättigung advective Fluidbewegungen verhindert. In der anfänglichen Übergangsphase bis zum Erreichen des dichten Wiederverschlusses der mit Bentonit-Sand verfüllten Hohlräume wird die Minimierung von Lösungszutritten in das Endlagersystem durch „schnellwirkende“ geotechnische und technische Barrieren aus wirtsgesteinsfremdem Material im Verbund mit dem ewG übernommen.

Zu den „schnellwirkenden“ Abdichtungen gehören im Verschlusskonzept des Tonsteinstandortes die Schachtabdichtungen (Kombinationsabdichtung aus Bentonit und Asphalt) und die Verwendung von Abfallbehältern als technische Barrieren, die aufgrund ihrer Auslegung eine Dichtwirkung gegenüber Lösungszutritten über einen Zeitraum von mindestens 1000 a aufweisen. Beide Endlagerkomponenten haben die Aufgabe, Lösungszutritte in die Einlagerungsbereiche von Beginn der Übergangsphase an (im Fall der Abfallbehälter bereits zum Zeitpunkt der Verfüllung der jeweiligen Einlagerungsstrecke) zu minimieren. Mit zunehmender Zeit erfolgt der Selbstverschluss der mit Bentonit-Sandgemisch (wirtsgesteinsähnliches Material) versetzten Hohlräume aufgrund von Konvergenz und Aufquellen des Bentonits, wodurch die hydraulischen Eigenschaften des Bentonitversatzes annähernd die Qualität des intakten Tonsteines im einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG) angenommen haben. Ab diesem Zeitraum, der je nach zuflussbedingter Quellgeschwindigkeit des Bentonits nach einigen 100 bis einigen 1.000 Jahren erreicht wird, beginnt die stationäre Langzeitphase.

9.3 Einteilung in Wirkungsphasen

Die zeitliche Grenze zwischen Übergangsphase und stationärer Langzeitphase wird im vorliegenden Fall auf 10.000 Jahre nach Verschluss des Endlagerbergwerks festgesetzt. Zu dieser Zeit ist auch bei einem entsprechend verfüllten und verschlossenen Endlagerbergwerk im Tonstein spätestens davon auszugehen, dass die wirtsgesteinsähnlichen Barrieren ihre volle Isolationswirkung entfaltet haben. Der Zeitpunkt 10.000 a, der im Nachfolgenden wiederholt zur Abgrenzung der Wirkungszeiträume instationäre Übergangsphase / stationäre Langzeitphase herangezogen wird, steht jedoch eher symbolisch für das (späteste) Ende der Übergangsphase der Endlagersysteme. Bei verschiedenen Komponenten, vor allem diejenigen in einem Endlager im Steinsalz, kann der Übergang zur stationären Phase deutlich früher erfolgen. Die Wirkungszeiträume der verschiedenen Komponenten sind zusammenfassend in Abb.

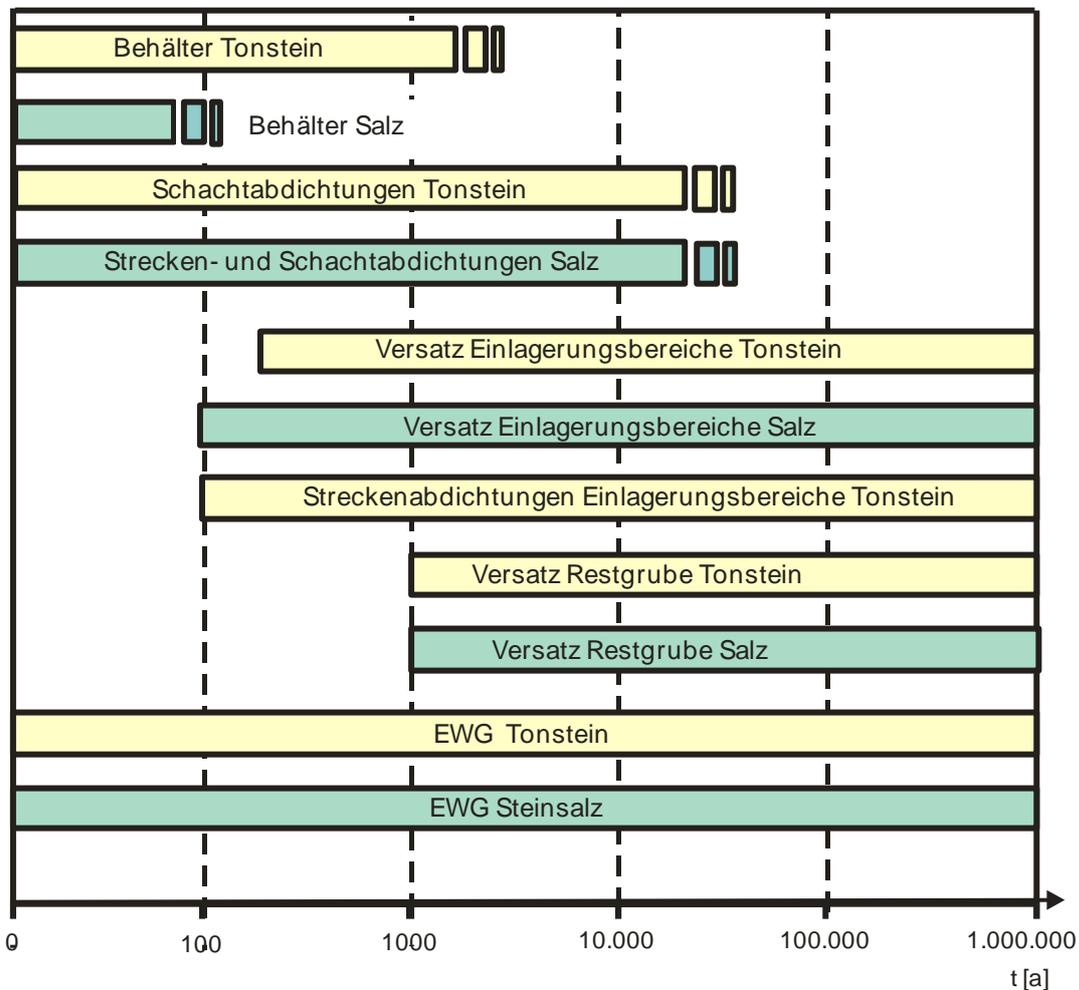


Abb. 7 dargestellt.

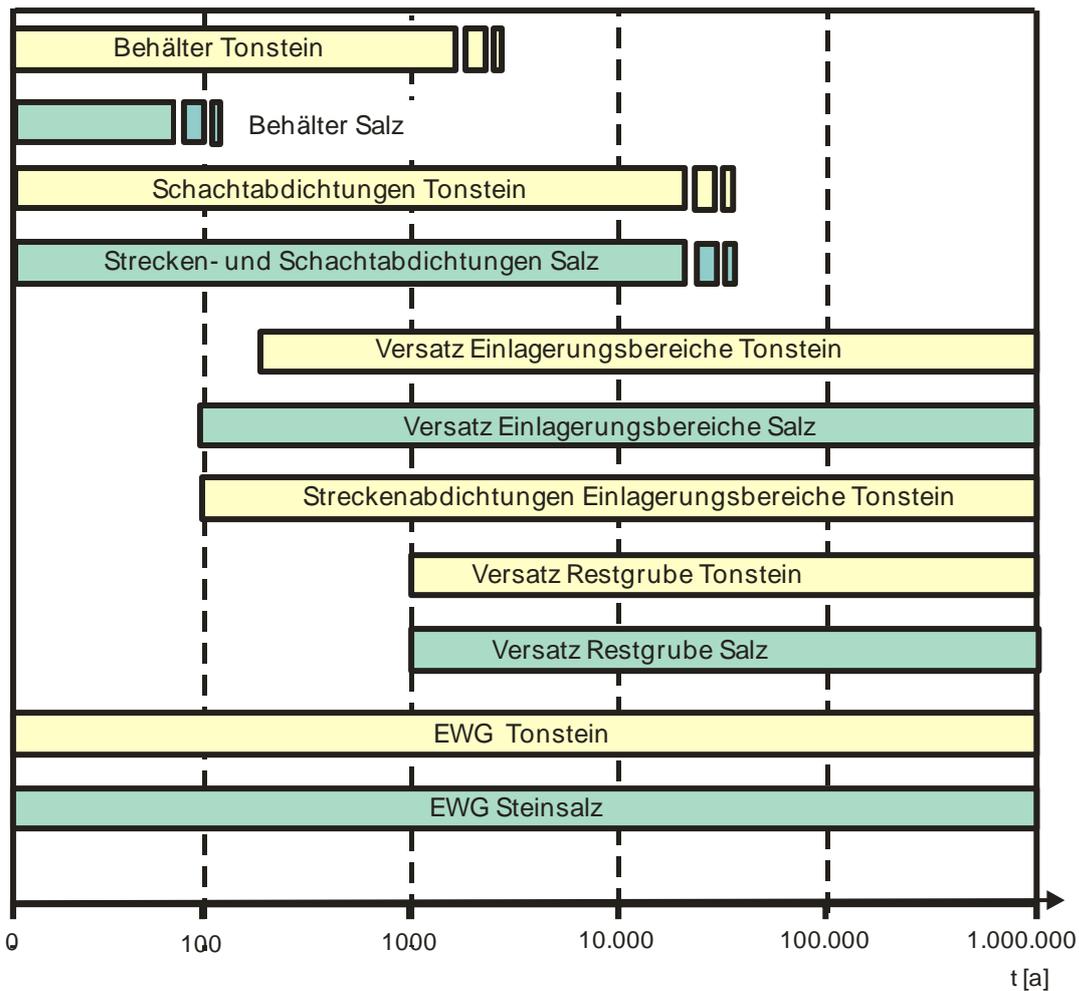


Abb. 7: Ungefähre Wirkungszeiträume der verschiedenen Endlagerkomponenten.

Die zeitabhängig unterschiedlichen Anforderungen an die Wirkung der Barrieren beider Endlagerkonzepte können bezogen auf die beiden Zeitabschnitte im Hinblick auf die Relevanz ihrer Sicherheitsfunktionen wie folgt zusammengefasst werden:

9.3.1 Übergangsphase ($t < 10.000$ a)

Besonders relevant sind in der Übergangsphase alle schnellwirkenden Barrieren, die in der Regel aus wirtsgesteinsfremden Material bestehen (z. B. Salzbetonbarrieren im Steinsalzkonzept, Schachtabdichtungen in beiden Konzepten, Abfallbehälter im Tonsteinkonzept). Diese müssen zunächst alleine im Verbund mit dem ewG Lösungszutritte in das Endlager und letztlich zu den Radionukliden verhindern bzw. minimieren. Da die Barrieren aus wirtsgesteinsähnlichen Materialien, dies sind alle Barrieren auf Bentonitbasis im Tonsteinkonzept, Salzgrus im Steinsalzkonzept (Ausnahme: Abdämmungen aus vorkompaktiertem Salzgrus), erst ihre Einschlusswirkung entwickeln müssen, sind

deren sicherheitsgerichtete Eigenschaften in der Übergangsphase noch weniger relevant. Die hydraulischen Eigenschaften der geologischen Komponente des ewG und des weiteren Wirtsgesteins sind in der Übergangsphase gleich relevant wie in der stationären Langzeitphase, da sie bereits in der Übergangsphase als weitere Barriere gegen den Lösungszutritt in das noch nicht „verheilte“ Grubengebäude wirken.

9.3.2 Stationäre Langzeitphase ($t > 10.000$ a)

Relevant in dieser Phase sind die Barrieren aus wirtsgesteinsähnlichen Materialien, dies sind alle Barrieren auf Bentonitbasis im Tonsteinkonzept, (außer Schachtabdichtung aus diversitärem Material, siehe oben), Salzgrus im Steinsalzkonzept, die nach der Übergangsphase ihre Eigenschaften im Hinblick auf eine langfristige Einschlusswirkung aufweisen und die eine möglichst vollständige Verheilung der anthropogenen Eingriffe in den ewG durch die Auffahrung des Endlagerbergwerks bewirken.

Weiterhin sind neben den sicherheitsgerichteten Eigenschaften des ewG auch die schützenden (integritätsbewahrenden) Eigenschaften des oberhalb des ewG anschließenden weiteren Wirtsgesteins und des Deckgebirges relevant, da in der stationären Langzeitphase von Erosions- und Subrosionsprozessen (Steinsalz) - insbesondere während Kaltzeiten - auszugehen ist.

Die Relevanz von Barrieren aus wirtsgesteinsfremdem Material wird in der Langzeitphase als eher gering eingestuft, da ihr Beitrag zum Einschluss der Radionuklide vollumfänglich durch die Einschlusswirkung der Barrieren aus wirtsgesteinsähnlichen Materialien dauerhaft ersetzt wird. Außerdem wird davon ausgegangen, dass die Haltbarkeit der Barrieren aus wirtsgesteinsfremdem Material nur für einen begrenzten Zeitraum von einigen 10.000 Jahren nachgewiesen werden kann.

9.4 Ergebnis

Das Ergebnis der Relevanzwichtung ist in Anhang 2 in einer Tabelle dargestellt, wobei alle Sicherheitsfunktionen der beiden Endlagersysteme getrennt nach Wirkungsphasen Relevanzklassen zugeordnet wurden. Auch die Begründung der Einstufung ist in der Tabelle enthalten. Die Sicherheitsfunktionen sind zudem entsprechend ihrem Funktionstyp (Rückhaltung / Integritätswahrung) gekennzeichnet und dem jeweiligen Teilsystem zugeordnet.

Ergebnis des Verfahrensschrittes 4 ist die Einstufung der Relevanz einer Sicherheitsfunktion für die beiden Wirkzeiträume je nach Bedeutung für die Erfüllung der Globalanforderung Radionuklideinschluss im ewG.

10 **Verfahrensschritt 4: Globale Standortcharakterisierung**

Die globale Standortcharakterisierung besteht in einer systematischen Zusammenstellung geometrischer, geologischer, hydraulischer, hydrogeologischer, geomechanischer und erdgeschichtlicher Eigenschaften der zu vergleichenden Standorte, zweckmäßigerweise in tabellarischer Form. Als Basis kann der synoptische Sachstandsbericht verwendet werden.

Die globale Standortcharakterisierung dient der Vorbereitung der Robustheitsbewertung im Verfahrensschritt ⑤ und zwar speziell der Teilschritte, die sich mit der Charakterisierbarkeit und Prognostizierbarkeit der Parameter von rückhaltenden Sicherheitsfunktionen des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches befassen (Arbeitsschritte 5b und 5c). Aufgrund der Komplexität der natürlichen Komponente ewG wird eine strukturierte Gegenüberstellung der sicherheitsrelevanten Standorteigenschaften beider Endlagersysteme durchgeführt, ein Schritt, der aufgrund des deutlich einfacheren strukturellen Aufbaus bei geotechnischen und technischen Komponenten entfallen kann. Die separate Behandlung der sicherheitsgerichteten Eigenschaften des Wirtsgesteins und insbesondere des ewG hat auch insofern ihre Berechtigung, da die Hauptlast der Anforderung der Radionuklidrückhaltung von den geologischen Barrieren zu tragen ist und sich die Konzepte der Endlagerauslegung der geologischen Situation des ewG anzupassen haben. Ein Bezug zu den jeweiligen Einlagerungs- und Verschlusskonzepten wird bei der globalen Standortcharakterisierung nur insoweit hergestellt, als dass im 3. Teilschritt auch endlagerinduzierte Einwirkungen auf den ewG berücksichtigt werden.

Ziel der globalen Standortbewertung ist weiterhin der Vergleich der sicherheitsgerichteten Anforderungen an den Standort mit den tatsächlichen Eigenschaften, die die Standortkandidaten aufweisen. Gemäß den Erkenntnissen aus dem jeweiligen Verfahrensschritt werden dazu die aus den Sicherheitskonzepten zu beiden Standorten erforderlichen Auslegungsanforderungen, im Wesentlichen nach dem Anforderungskatalog nach AKEnd /AKE 02/ aufgelistet und den tatsächlichen Standorteigenschaften gegenübergestellt. Zentrale sicherheitstechnische Anforderungen an die Standorte sind hierbei jeweils günstige geologische Gesamtsituationen und die jeweilige Konfiguration des ewG. Die Erkenntnisse zu Standort und ewG liegen abschließend erst im letzten Verfahrensschritt nach Vorlage der Untertageerkundung vor. Da insbesondere in frühen Verfahrensschritten die Bemessung des ewG nicht vorliegt, wurde im Vorhaben VerSi als Arbeitshypothese für den Tonsteinstandort festgelegt, dass seine Ausdehnung ins Liegende und Hangende des Endlagers nicht größer als jeweils 150 m sein sollte. Darüber hinaus

wurden die Kriterien zur Bewertung des Einschlusses nach dem Geringfügigkeitsprinzip (GRS-Ansatz in /BAL 07/) angewendet. Aus diesen Anforderungen an die Eigenschaften des ewG – vornehmlich diffusiver Transport, maximale Abmessung 150 m - ergeben sich zwangsläufig Anforderungen an die Materialeigenschaften des ewG, die im Anhang 3 aufgelistet sind.

Die globale Standortcharakterisierung kann prinzipiell auch im Rahmen der Abfassung des synoptischen Sachstandsberichtes erfolgen. Da im vorliegenden Fall jedoch auch subjektive Bewertungen, z. B. hinsichtlich der Charakterisierbarkeit der Standorte bezüglich der Homogenität/Inhomogenität des geologischen Strukturaufbaus, vorgenommen wurden, wurden die oben genannten Aspekte in einem separaten Arbeitsschritt innerhalb des vorliegenden Methodenbandes behandelt.

Die globale Standortcharakterisierung erfolgt in 3 Einzelschritten:

1. Zusammenstellung der geologischen Standortgegebenheiten,
2. Zusammenstellung der regionalhydrogeologischen Standortgegebenheiten,
3. Zusammenstellung interner und externer Einwirkungen auf den ewG im Zuge der Standortentwicklung.

Die Ergebnisse der globalen Standortcharakterisierung zu den im Vorhaben VerSi zu vergleichenden Endlagerstandorten sind in Anhang 3 in tabellarischer Form aufgelistet. Hierbei ist anzumerken, dass die Tabelle inhaltlich nicht den Anspruch auf Vollständigkeit bezüglich der enthaltenen Daten zum Standort Gorleben erhebt. Weiterhin sind die Daten zum Tonsteinstandort aufgrund der im Vorhaben VerSi gewählten Vorgehensweise generischer Natur. Die Tabelle in Anhang 3 soll vielmehr insbesondere im Hinblick auf ihre Struktur als beispielhafte Vorlage für einen späteren operativen Standortvergleich dienen.

Bei der globalen Standortcharakterisierung sollten überdies folgende Aspekte berücksichtigt werden:

- Bei der Einschätzung der Prognostizierbarkeit der Standorteigenschaften sollte die erdgeschichtliche Entwicklung der Standortregion und des Wirtsgesteins mit einbezogen werden. Beispielsweise ist eine solche geologische Formation positiv zu bewerten, deren erdgeschichtliche Entwicklung für eine homogene und gleichförmige Ausbildung der Materialeigenschaften spricht. Hierzu gehören Schichtenfolgen in landferner, durchweg mariner Tonsteinfazies, die außer einer

stetigen, epirogen bedingten weiträumigen Subsidenz möglichst keinen syn- oder postgenetischen tektonischen Vorgängen unterworfen war und von der aus geologischen Erwägungen generell davon auszugehen ist, dass weder Mächtigkeitsschwankungen, noch Fazieswechsel oder Störungen auftreten können. Im Fall von Salzstöcken sind beispielsweise solche Strukturen im Hinblick auf ihre Charakterisierbarkeit positiv zu bewerten, die eine vergleichsweise einfache Randsenkentektonik und einen einfachen Internaufbau aufweisen sowie eine geringe Salzvorlage besitzen, die darauf hinweist, dass der Salzstockaufstieg weitestgehend abgeschlossen ist.

- Für die Prognose der Entwicklung des Endlagerstandortes und des Wirtsgesteins über den Nachweiszeitraum sollte retrospektiv die Entwicklungsgeschichte der letzten 10er Millionen Jahre des Standortes in seiner regionalen und überregionalen Einbindung herangezogen werden. Die Prognose der Standortentwicklung gelingt umso zuverlässiger, je gleichmäßiger die Entwicklungsgeschichte abgelaufen ist, sofern dieses Gleichmaß für den zukünftigen Entwicklungsverlauf begründet angenommen werden kann.

11 **Verfahrensschritt 5: Ermittlung der Robustheit der rückhaltenden Sicherheitsfunktionen**

11.1 **Übersicht**

Die Ermittlung der Robustheit der rückhaltenden Sicherheitsfunktionen (RSF) stellt den zentralen und gleichzeitig den aufwändigsten Verfahrensschritt der verbalargumentativen Abwägungsmethodik zum Endlagersystemvergleich dar. Wie bereits im Vorangegangenen erwähnt, ist die Robustheit der rückhaltenden Sicherheitsfunktionen beider Endlagersysteme das entscheidende Abwägungskriterium. Die Robustheit beinhaltet in der hier verwendeten Definition (Kap. 2.3) mehrere heterogene Bewertungsaspekte. Diese werden im Verfahrensschritt ⑤ einer systematischen Abfolge von Prüfungs- und Bewertungsschritten unterzogen.

Die Robustheitsbewertung erfolgt komponentenweise. Hierbei werden nur die rückhaltenden Sicherheitsfunktionen (RSF), jene Sicherheitsfunktionen, die primär zur Erfüllung der übergeordneten Anforderung „Radionuklideinschluss“ an ein Endlagersystem dienen, anhand ihrer charakteristischen Parameter bewertet. Die integritätsbewahrenden Sicherheitsfunktionen (ISF) tragen zwar ebenfalls zur Robustheit eines Endlagersystems bei, jedoch in der Weise, dass durch sie die jeweils korrespondierende rückhaltende Sicherheitsfunktion gegenüber äußeren Einwirkungen „geschützt“ wird, also in ihrer Wirkung weitgehend unbeeinträchtigt bleibt. Der Robustheitsbeitrag, den die jeweiligen ISF durch die Schutzwirkung gegenüber der korrespondierenden RSF liefern, wird infolgedessen bei der Bewertung der Robustheit der RSF im Arbeitsschritt 5c mit berücksichtigt. Eine separate Bewertung der ISF findet daher nicht statt.

Verfahrensschritt ⑤ gliedert sich in 5 Teilschritte, die im nachfolgenden Arbeitsschritte genannt werden. Die Untersuchung der Robustheit der rückhaltenden Sicherheitsfunktionen erfolgt in den ersten 4 Arbeitsschritten auf der Basis der zugehörigen RSF-Parameter, im 5. Arbeitsschritt werden diese Einzelbewertungen auf die Ebene der zugehörigen Sicherheitsfunktion aggregiert. Im Verfahrensschritt ⑤ erfolgt damit anhand der verschiedenen Robustheitskriterien dreimal (5b–5d) eine Robustheitsbewertung. In Analogie zur Vorgehensweise bei der Relevanzwichtung erfolgt die Robustheitseinstufung der Parameter der rückhaltenden Sicherheitsfunktionen auch im Verfahrensschritt ⑤ entlang von Ordinalskalen, da quantitative Maßstäbe, nach denen die Robustheit „gemessen“ werden könnte, zumindest nicht durchgängig vorhanden sind. Bei die-

sem Ranking ist, wie bereits in Kap. 9 beschrieben, lediglich eine Ordnungsaussage möglich, wobei die Abstände zwischen den einzelnen Rangplätzen nicht bekannt sind. Im vorliegenden Fall erfolgte die Einteilung in 5 Robustheitsklassen (5 = sehr hohe Robustheit bis 1 = sehr geringe Robustheit).

Diese Einstufungen erfolgen im Wesentlichen auf Grundlage von Expertenmeinung, denn die Voraussetzungen für eine "objektive" Quantifizierung der Robustheit werden bei der weit überwiegenden Zahl von Sicherheitsfunktionen auf Grund begrenzten Systemverständnisses und des komplexen nichtlinearen Zusammenwirkens der Eigenschaften des Endlagersystems im Detail nicht gegeben sein. Da mit der Bewertung der Robustheit der Sicherheitsfunktionen und ihrer Parameter weitreichende Konsequenzen für die späteren Robustheitseinstufungen der gesamten Endlagersysteme verbunden sind, bedürfen die Robustheitseinstufungen jeweils der sorgfältigen Begründung.

Die Struktur der Abwägungsmethodik zur Bewertung der Robustheit ist in den Struktur-schemata in den Abbildungen 8 und 9 dargestellt. Im Folgenden wird ein Überblick über die Methodik zur Bewertung der Robustheit der rückhaltenden Sicherheitsfunktionen gegeben, detaillierte Ausführungen und Anwendungsbeispiele enthalten die jeweiligen Unterkapitel zu den einzelnen Arbeitsschritten.

Im **Arbeitsschritt 5a** (Kap. 11.2) werden die wesentlichen Parameter und ggf. auch Prozesse¹, durch die die Wirkung einer rückhaltenden Sicherheitsfunktion (RSF) charakterisiert wird, identifiziert und aufgelistet. Hintergrund ist (wie bereits in Kap. 6 dargelegt), dass sich Sicherheitsfunktionen als Ganzes nicht primär einer Robustheitsbewertung unterziehen lassen, da sie zunächst nur die qualitativ-verbale Beschreibungen der Umsetzung sicherheitsgerichteter Anforderungen an die einzelnen Systemkomponenten darstellen. Beispielsweise lassen sich Sicherheitsfunktionen nicht selbst charakterisieren oder prognostizieren sondern nur ihre Parameter. Diese Parameter werden im Nachfolgenden als RSF-Parameter bezeichnet. Die Robustheitsbewertung erfolgt dann in den nachfolgenden Arbeitsschritten (5b bis 5d) für jeden RSF-Parameter separat. Die Robustheitsbewertung der Sicherheitsfunktionen erfolgt nach Aggregieren der entlang verschiedener Robustheitskriterien durchgeführten Parameterbewertungen im letzten Arbeitsschritt 5e.

¹ Nachfolgend werden die Ausführungen nur auf die Eigenschaft „Parameter“ bezogen. Prozesse, wie zum Beispiel die Konvergenz werden bei der Robustheitsbewertung durch ihre Leitparameter repräsentiert.

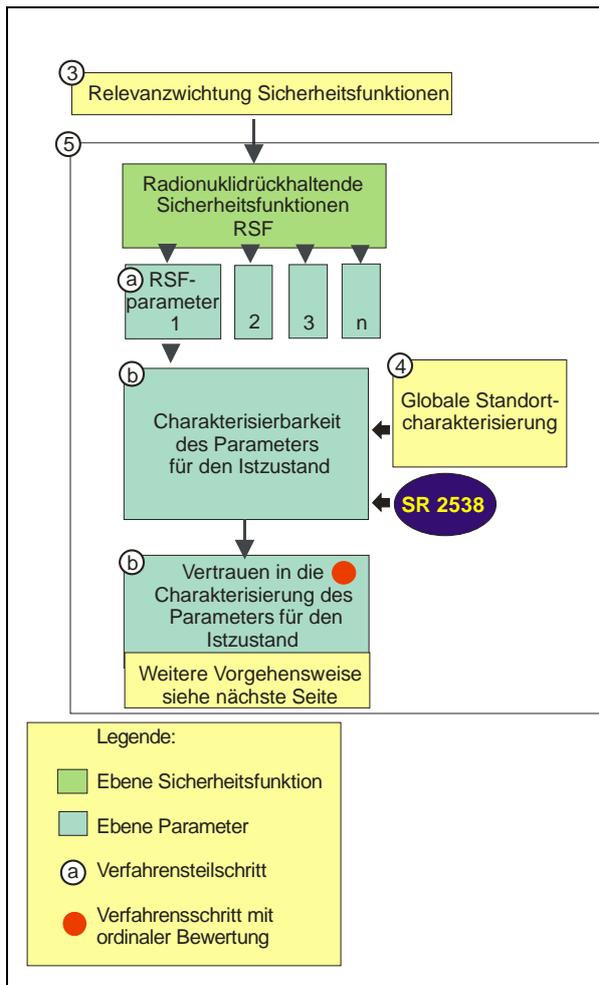


Abb. 8: Arbeitsschritte zur Ermittlung des Vertrauens in die Charakterisierung zum Ist-Zustand¹.

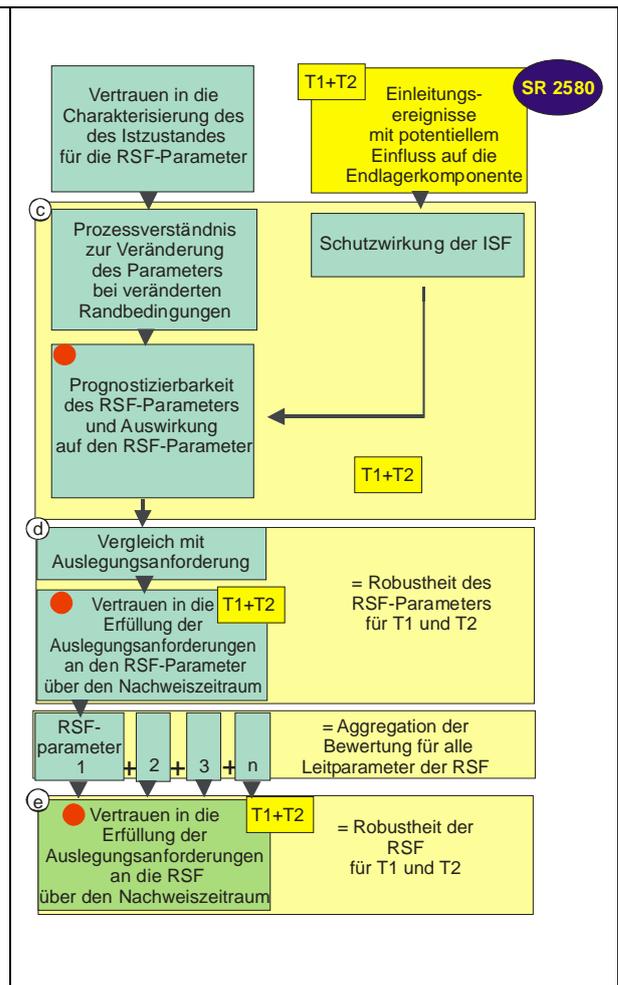


Abb. 9: Arbeitsschritte zur Bewertung der Prognostizierbarkeit und der Systemrobustheit einschließlich der Aggregation der Robustheitsbewertungen zu den RSF-Parametern auf die Ebene der zugehörigen Sicherheitsfunktion.

Im **Arbeitsschritt 5b** (Kap. 11.3) wird die Charakterisierbarkeit des RSF-Parameters für den derzeitigen Zeitpunkt (Ist-Zustand) als erstes Kriterium für die Robustheit bewertet. Für die natürliche Komponente ewG wird beispielsweise in drei Teilschritten untersucht, wie gut der Parameter aufgrund der Aussagekraft der gewählten Untersuchungsmethode, der Standortverhältnisse (im Hinblick auf die Heterogenität der geologischen Struktu-

¹ Anmerkung: Im Fall des ewG erfolgt eine zusätzliche Aufgliederung in Untersuchungsmethode, Standortverhältnisse und Untersuchungsaufwand.

ren und des Grades der natürlichen Streuungen der Parameter) sowie des zur Charakterisierung des Parameterwertes betriebenen Untersuchungsaufwandes bestimmt werden konnte. Bei diesem Arbeitsschritt wurde auf die Ergebnisse zur Aussagekraft übertägiger Erkundungsmaßnahmen, die im VerSi-Teilvorhaben 3607R02538 („Planerische Grundsatzfragen zur Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen“ /GRS 10a/) zurückgegriffen. Bei technischen und geotechnischen Komponenten erfolgt die Bewertung hingegen in einem Schritt. Hierbei wird untersucht, wie gut der Parameter aufgrund der Aussagekraft der gewählten Untersuchungsmethode zum Nachweis der Einhaltung der Auslegungsanforderungen, des Standes von Wissenschaft und Technik bei der Konzeption und Erstellung der technischen bzw. geotechnischen Komponente und im Hinblick auf die Komplexität des Aufbaus der technischen bzw. geotechnischen Komponente bestimmt werden kann. Das Ergebnis des Arbeitsschrittes 5b ist das auf einer Ordinalskala mit den Rangklassen 1 bis 5 bewertete Vertrauen in die Charakterisierung des RSF-Parameters zum Ist-Zustand.

Im **Arbeitsschritt 5c** (Kap. 11.4) wird die Robustheit der RSF-Parameter anhand weiterer Kriterien, die die Entwicklung der zu vergleichenden Endlagersysteme über den Nachweiszeitraum von 1 Mio. Jahre betreffen, bewertet. Diese Kriterien sind Prognostizierbarkeit und Systemrobustheit. Die **Prognostizierbarkeit** setzt sich prinzipiell aus zwei Unteraspekten zusammen:

Zunächst bestehen mehr oder weniger große **Unsicherheiten bei der Vorhersage der Endlagersystementwicklung** (Prognoseunsicherheit). Diese Form der Unsicherheit wird allerdings bereits im Rahmen der standortbezogenen Szenarienentwicklung abgehandelt und in Form von Einwirkungsereignissen, die hinsichtlich ihrer Eintrittswahrscheinlichkeiten in die Gruppen der wahrscheinlichen, der weniger wahrscheinlichen und der auszuschließenden Entwicklungen eingeteilt werden. Diese Informationen werden dem vergleichenden Abwägungsverfahren vorgegeben. Im vorliegenden Fall wurde auf die Ergebnisse des VerSi-Teilvorhabens 3607R02580 („Entwicklung von Szenarien“ /GRS 10b/) zurückgegriffen.

Die zweite Form von Unsicherheiten, die bei der Prognose der Veränderung eines Parameterwertes über lange Nachweiszeiträume auftritt, betrifft das **Prozessverständnis**. Als reziprokes Robustheitsmaß wird hier die Unsicherheit, wie sich der Parameterwert selbst bei einer bekannten Änderung der äußeren Randbedingungen ändert, untersucht und bewertet.

Ein weiterer Robustheitsaspekt ist die **Systemrobustheit**, die Unempfindlichkeit des Endlagersystems gegenüber veränderten Randbedingungen, die sich aus der Standortentwicklung ergeben (z. B. die Reaktion auf Inlandeisüberfahung). In Arbeitsschritt 5c wird die Systemrobustheit ebenfalls reziprok, d. h. als Ausmaß der Veränderung des Parameterwertes infolge innerer und äußerer Einwirkungen auf das Endlagersystem bewertet. Eine hohe Systemrobustheit ist für eine Systementwicklung dann gegeben, wenn die Änderung des Parameterwertes klein ist oder stets zur „sicheren Seite“ hin erfolgt, d. h. die Änderung des Parameterwertes sich auf die Radionuklidrückhaltung innerhalb der betrachteten Endlagerkomponente positiv auswirkt.

Prozessverständnis und Systemrobustheit lassen sich bei der Robustheitsbewertung methodisch nicht trennen, da die Ermittlung der ereignisbedingten Auswirkungen auf den Wert des RSF-Parameters als Maß für die Systemrobustheit immer von Unsicherheiten auf Seiten des Prozessverständnisses überlagert wird. Daher werden beide Robustheitskriterien in Arbeitsschritt 5c gemeinsam bewertet. Die integritätsbewahrenden Sicherheitsfunktionen (ISF) tragen ebenfalls zur Robustheit eines Endlagersystems bei, jedoch in der Weise, dass durch sie die jeweils korrespondierende rückhaltende Sicherheitsfunktion gegenüber äußeren Einwirkungen „geschützt“ wird, also in ihrer Wirkung weitgehend unbeeinträchtigt bleibt. Der Robustheitsbeitrag, den die jeweiligen ISF durch die Schutzwirkung gegenüber der korrespondierenden RSF liefern, wird infolgedessen bei der Bewertung der Robustheit der RSF im Arbeitsschritt 5c mit berücksichtigt, die ISF werden – wie bereits erwähnt - jedoch selbst keiner Robustheitsbewertung unterzogen.

Die Bewertung der Robustheitskriterien erfolgt für jeden RSF-Parameter in Analogie zur Relevanzwichtung (s. Kapitel 9) getrennt für die beiden Wirkungszeiträume $t < 10.000$ Jahre (instationäre Übergangsphase) und > 10.000 Jahre (stationäre Langzeitphase). Das Ergebnis des Arbeitsschrittes 5c ist das auf einer Ordinalskala mit den Rängen 1 bis 5 bewertete Prognostizierbarkeit des RSF-Parameters und der ereignisbedingten Auswirkungen, getrennt für die beiden Wirkungszeiträume $t < 10.000$ Jahre (instationäre Übergangsphase) und > 10.000 Jahre (stationäre Langzeitphase).

Im **Arbeitsschritt 5d** (Kap. 11.4) erfolgt die Gesamtbewertung der Robustheit des jeweils betrachteten RSF-Parameters, wobei zunächst im ersten Teilschritt alle Bewertungen entlang der Robustheitskriterien in den vorangegangenen Arbeitsschritten 5b und 5c, im Rahmen eines verbal-argumentativen Abwägungsprozesses aggregiert werden. Der alleinige Einbezug der oben angeführten Robustheitsaspekte ist für die Bewertung

der Gesamtrobustheit eines sicherheitsgerichteten Parameters und damit auch der zugehörigen Sicherheitsfunktion allerdings noch nicht hinreichend aussagekräftig. So besteht beispielsweise die Möglichkeit, dass bei einem Parameter trotz einer unsicherheitsbedingt hohen Wertebandbreite die Auslegungsanforderungen sicher eingehalten werden, weil selbst bei Extremwerten, die im Hinblick auf die Radionuklidrückhaltung prinzipiell ungünstig wären, die Auslegungsanforderungen immer noch sicher eingehalten werden können. Daher wird im nächsten Teilschritt geprüft, in welchem Verhältnis die Lage der Parameterspannweite die aus den oben angeführten Aspekten resultiert, zu den **auslegungsbedingten Anforderungen** steht, die sich aus dem Sicherheitskonzept zum jeweiligen Endlagersystems ergeben. Das Ergebnis des **Arbeitsschritts 5d** ist die Bewertung des Vertrauens in die Erfüllung der Auslegungsanforderungen an den RSF-Parameter über den jeweiligen Wirkungszeitraum $t < 10.000$ Jahre (instationäre Übergangsphase) bzw. > 10.000 Jahre (stationäre Langzeitphase) für die jeweils zugrunde gelegten Szenarien.

Im letzten Schritt, dem **Arbeitsschritt 5e** (Kap. 11.5) werden die Robustheitsbewertungen der RSF-Parameter aus Schritt 5d dann in einem verbal-argumentativen Abwägungsprozess zu einer Gesamtrobustheit der betrachteten rückhaltenden Sicherheitsfunktion aggregiert. Hierbei ist auch zu berücksichtigen, dass die verschiedenen Parameter eventuell einen unterschiedlichen Beitrag zur Erfüllung der Sicherheitsfunktion liefern. Das Ergebnis ist die Gesamtrobustheit einer rückhaltenden Sicherheitsfunktion, ausgedrückt als Vertrauen in die Erfüllung der Auslegungsanforderungen an die die rückhaltende Sicherheitsfunktion charakterisierenden Eigenschaften über den Nachweiszeitraum, getrennt für die beiden Wirkungszeiträume $t < 10.000$ Jahre (instationäre Übergangsphase) und > 10.000 Jahre (stationäre Langzeitphase).

Zur Demonstration und Illustration der Durchführung der verbal-argumentativen Abwägungsmethodik im Verfahrensschritt 5 wurde die Bewertung der Robustheit exemplarisch anhand zweier Einwirkungsereignisse („*Gasbildung mit Druckerhöhung im Porenraum*“ für den Zeitraum $t < 10.000$ a bzw. „*Kaltzeit mit 700 m Inlandeisüberdeckung und Rinnenbildung infolge Schmelzwassererosion*“ für den Zeitraum $t < 10.000$ a) für die Parameter der rückhaltenden Sicherheitsfunktionen der Komponenten

- Behälter
- Versatz in den Einlagerungsbereichen
- Abdämmung der Einlagerungsbereiche (Gorleben) bzw. Verschlüsse der

Einlagerungsstrecken (Tonsteinstandort)

- Versatz in den Restgrube
- Schachtverschlüsse und Streckenabdichtungen zum Infrastrukturbereich (Gorleben)
- Einschlusswirksamer Gebirgsbereich ewG

durchgeführt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit liegen diese Bewertungen in separaten Dokumenten vor, die diesem Erläuterungsband in digitaler Form auf einer CD-ROM /GRS 10e bis GRS 10j/ beiliegen.

11.2 Verfahrensschritt 5a: Identifizierung der die relevanten Sicherheitsfunktionen charakterisierenden Parameter

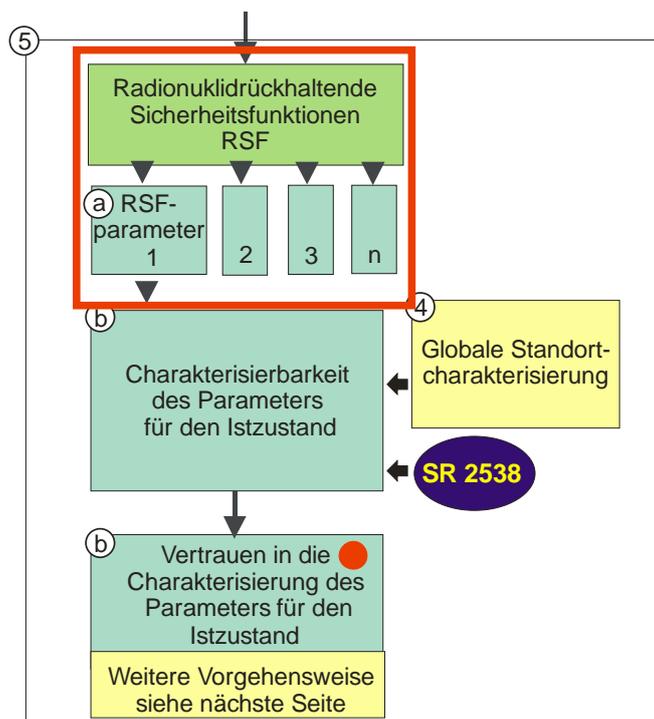


Abb. 10: Aufgliederung der rückhaltenden Sicherheitsfunktionen in zugehörige Parameter

Sicherheitsfunktionen selbst lassen sich, wie bereits einleitend erwähnt, nicht primär einer Robustheitsbewertung unterziehen, da es sich bei ihnen lediglich um qualitativ-verbale Beschreibungen von globalen Qualitätseigenschaften der einzelnen Systemkomponenten handelt, die der Umsetzung der Anforderungen aus den Sicherheitskon-

zepten der Endlagersysteme dienen. Die Sicherheitswirkung einer Sicherheitsfunktion wird im Einzelnen durch charakteristische Parameter, die der Sicherheitsfunktion zuzuordnen sind, umgesetzt. So kann die Bewertung der Charakterisierbarkeit, Prognostizierbarkeit und Systemrobustheit einer Sicherheitsfunktion nicht ohne Rückgriff auf eine entsprechende vorangehende Bewertung ihrer einzelnen Parameter erfolgen. Eine Notwendigkeit des Übergangs auf die Parameterebene ergibt sich aus der angestrebten konkreten Auseinandersetzung mit den realen Systemverhältnissen, die durch Parameter beschrieben werden. Hierbei handelt es sich um die sicherheitstechnisch wichtigen Eigenschaften der Endlagersysteme bzw. um aus den "Primäreigenschaften" abgeleitete sicherheitstechnisch relevante Größen.

Ein weiterer Vorteil des Übergangs auf die Parameterebene ist, dass sich die Ergebnisse der Robustheitsbewertung der RSF-Parameter im Rahmen einer verbalargumentativen Abwägungsmethodik mit den entsprechenden Ergebnissen von numerischen Langzeitsicherheitsanalysen vergleichen lassen. Durch Langzeitsicherheitsanalysen ist es möglich, die Relevanz von sicherheitsgerichteten Modelleingangsparametern durch Sensitivitätsanalysen aber auch ihre Robustheit gegenüber den unterstellten Szenarien rechnerisch zu ermitteln.

In Vorbereitung der Robustheitsbewertung werden aus den oben genannten Gründen für die rückhaltenden Sicherheitsfunktionen (RSF) jeder Komponente die charakteristischen Parameter identifiziert und aufgelistet. Zur Absicherung der Vollständigkeit der wesentlichen Parameter rückhaltender Sicherheitsfunktionen bedient man sich zweckmäßigerweise der im Vorfeld der Sicherheitsanalysen für den jeweiligen Standort entwickelten FEP Listen. FEP steht für *features, events, processes* (Eigenschaften, Ereignisse und Prozesse). Hilfreich bei der Identifizierung der materiellen Eigenschaften der RSF sind die FEP Listen, z. B. diejenigen, die im Projekt *Isibel* für Steinsalz /ISI 07/ oder im Rahmen des Vorhabens VerSi im Teilprojekt 3607R02580 „Szenarientwicklung“ für beide betrachteten Endlagersysteme entlang der einzelnen Sicherheitsfunktionen zusammengestellt wurden /GRS 10b/. Entscheidend hierbei sind die *features*, sofern es sich um sicherheitsgerichtete Parameter handelt, während *events* eher zur Ableitung von Ereignisabläufen zur Systementwicklung verwendet werden.

Die Auflistung der RSF und der zugehörigen Parameter erfolgt tabellarisch. Im vorliegenden Bericht sind die für die Sicherheitsfunktionen charakteristischen Parameter komponentenweise für jede rückhaltende Sicherheitsfunktion im Anhang 4 tabellarisch

aufgelistet. Ein Beispiel für die Ableitung von RSF-Parametern für den ewG ist in Abb. 11 dargestellt.

Lfd. Nr. SF/ Teilsystem/ Komponente	Rückhaltende Sicherheitsfunktion	Wesentliche Eigenschaften und Prozesse
Einschlusswirk- samer Gebirgs- bereich		
49	Begrenzung / Verzögerung von Lösungsbewegung und Radionuklidtransport	Permeabilität einschl. 2-Phasen-Parameter Kapillardruck- rel. Permeabilität, Porosität, Diffusivität (Porendiffusionskoeffizienten), Ausdehnung des Wirtsgesteins um das Endlagerbergwerk, für die die charakteristischen Eigenschaften der Sicherheitsfunktion gelten
52	Verzögerung der Radionuklidausbreitung durch Sorption	Temperatur verfügbare / zugängliche Oberfläche Eigenschaften der Oberflächen (Ladung, Bindungsmöglichkeiten) Komplexierung des Radionuklids (Aquo-, Karbonat-, Chlorid-, etc.), Spezifikation, Lösungszusammensetzung, Ionenstärke, pH, Kinetik Konkurrenzreaktionen mit anderen Elementen, Redoxpotential (Kolloidbildung), Ausdehnung des Wirtsgesteins um das Endlagerbergwerk, für die die charakteristischen Eigenschaften der Sicherheitsfunktion gelten

Abb. 11: Rückhaltende Sicherheitsfunktionen und zugehörige Parameter für die Komponente einschlusswirksamer Gebirgsbereich

Im obigen Beispiel wird die Sicherheitsfunktion „Begrenzung / Verzögerung von Lösungsbewegung und Radionuklidtransport“ (des ewG) durch die Parameter Gebirgspermeabilität, Porosität (Gesamt- / effektive), Porendiffusionskoeffizienten ($D_e \cdot n_a$) sowie die Ausdehnung des Wirtsgesteins um das Endlagerbergwerk, für die die charakteristischen Eigenschaften der Sicherheitsfunktion gelten, charakterisiert. Während die ersten drei Parameter die Qualitätseigenschaften des ewG im Hinblick auf die Radionuklidrückhaltung charakterisieren, bezeichnet der letzte Parameter den Raum innerhalb dessen das Wirtsgestein diese Qualitätseigenschaften aufweist. Gebirgspermeabilität, Porosität und Diffusivität stehen mit dem Parameter „Ausdehnung des Wirtsgesteins um das Endlagerbergwerk, für die die charakteristischen Eigenschaften der Sicherheitsfunktion gelten“ in gegenseitiger Abhängigkeit, da die Radionuklidrückhaltung im ewG sowohl von der Qualität der rückhaltenden Eigenschaften (hier: Gebirgspermeabilität, Porosität und Diffusivität) als auch von seiner Ausdehnung abhängt. So ist z. B. der Parameter „Ausdehnung des Wirtsgesteins um das Endlagerbergwerk, für die die charakteristischen Eigenschaften der Sicherheitsfunktion gelten“ insoweit mit der Diffusivität gekoppelt, als dass

die Porendiffusionskoeffizienten maßgeblich die rechnerisch ermittelte Ausdehnung des ewG bestimmen.

Ergebnis dieses Verfahrensschrittes ist die Ermittlung und Auflistung der charakteristischen Parameter einer rückhaltenden Sicherheitsfunktionen (RSF)

11.3 Verfahrensschritt 5b: Ermittlung des Vertrauens in die Charakterisierung des Ist-Zustandes der die RSF charakterisierenden materiellen Eigenschaften (Parameter)

Ziel dieses Arbeitsschrittes ist es, Aussagen darüber zu treffen, mit welcher Zuverlässigkeit die RSF-Parameter bestimmt werden können. Die Charakterisierbarkeit der Parameter bezieht sich dabei ausschließlich auf den Zeitpunkt der Messung bzw. bei technischen oder geotechnischen Komponenten auf den Zeitpunkt der Erstellung (Ist-Zustand). Unberücksichtigt bleibt, welchen möglichen Veränderungen die jeweils betrachtete Eigenschaft infolge veränderter Randbedingungen durch potentielle Entwicklungen des Endlagersystems in ferner Zukunft unterliegen könnte. Dies ist Gegenstand des Arbeitsschrittes 5c. Bei technischen und geotechnischen Komponenten wird bei der Bewertung der Charakterisierbarkeit jedoch auch der Kenntnisstand (z. B. Labor oder in situ-Versuche) zur Entwicklung der Komponente bis zum Erreichen des erforderlichen Endzustandes (z. B. Versatzkompaktion) bewertet.

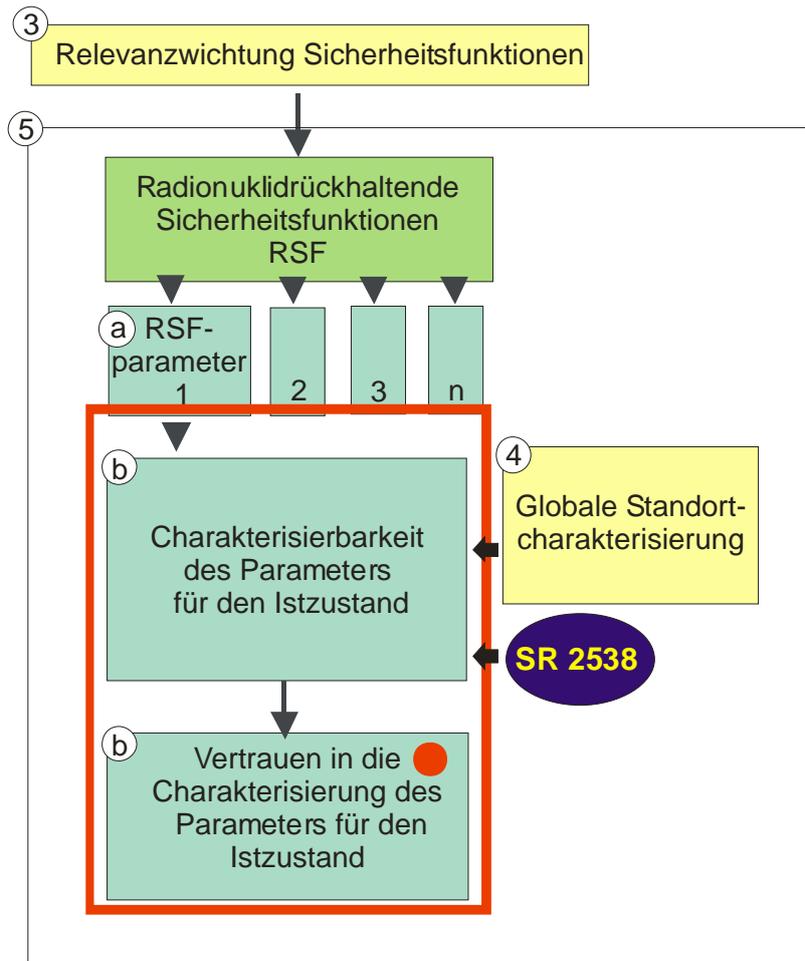


Abb. 12: Teilschritte zur Ermittlung des Vertrauens in die Charakterisierung eines RSF-Parameters für den Ist-Zustand¹.

Es wird bei der Vorgehensweise je nach Art der Endlagerkomponente differenziert.

Bei den RSF-Parametern von **technischen oder geotechnischen Komponenten** erfolgt die Bewertung der Charakterisierbarkeit in einem Arbeitsschritt. Hierzu wird untersucht, wie gut der Parameter aufgrund

- der Aussagekraft der gewählten Untersuchungsmethode zum Nachweis der Einhaltung der Auslegungsanforderungen,
- des Standes von Wissenschaft und Technik bei der Konzeption und Erstellung der technischen bzw. geotechnischen Komponente

¹ Ergebnisinput aus SR 2538: VerSi-Teilvorhaben „Untersuchung aktueller planerischer Grundsatzfragen zur Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen“

- und im Hinblick auf die Komplexität des Aufbaus der technischen bzw. geotechnischen Komponente

bestimmt werden kann.

Beispiel Löslichkeitsgrenzen im Versatz Tonstein

Im Gegensatz zum Salz muss im Tonstein davon ausgegangen werden, dass Porenwasser immer vorhanden ist. Es stellen sich durch Behälter-Korrosion und Oxidation von Pyrit und anderen Fe(II)-Phasen im Bentonitversatz reduzierende Bedingungen ein. Der Prozessablauf hängt maßgeblich davon ab, wie schnell die Wassersättigung vonstattengeht.

Die Löslichkeitsgrenzen sind von 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 Redox- Prozesse, verändert sich auch seine Löslichkeitsgrenze. So nimmt die Löslichkeitsgrenze von Uran durch die Reduktion von U(VI) zu U(IV) ab.

Die Porenwasserchemie des Tonsteins kann nicht direkt gemessen werden, sondern wird über verschiedene Extraktionsmethoden wie z. B. Zentrifugation, Auslaugen mit Wasser und Auspressung aus dem Tonstein entfernt. Dabei verändert sich durch Verschiebung des thermodynamischen Gleichgewichtes die Chemie des Porenwassers. Die Erfassung der hydrochemischen Parameter der Porenlösungen erfolgt durch pH- und Eh- Messungen, ICP-MS (Kationen), Säulenchromatographie, sowie ICP-AAS. Hierbei handelt es sich um erprobte Nachweisverfahren auf dem Stand von Wissenschaft und Technik. Der ursprüngliche Chemismus sowie die thermodynamischen Löslichkeitsgrenzen werden über geochemischen Modellrechnungen bestimmt. Diese Modellrechnungen sind für Endlagerformationen im Tonstein bereits durchgeführt worden (Opalinuston Callovo-Oxfordian).

Es ist zu berücksichtigen, dass sich im Endlager unterschiedliche hydrochemische Milieus ausbilden. In Abfallnähe wird das geochemische Milieu durch Redoxreaktionen von Fe^0/Fe_3O_4 , Fe^{2+}/Fe_3O_4 , $Fe^{2+}/\text{Grüner Rost}$ und H_2/H_2O bestimmt. Etwas weiter von der Abfallmatrix und dem Behälter entfernt werden an der Grenze vom Tonstein zum Versatzmaterial Sekundärphasen ausgefällt. Hier kann es zur Bildung von Carbonaten und

Gips kommen. Das Sulfat hierfür wird aus der Oxidation des Pyrits bereitgestellt, die Ca-Ionen können aus möglichen Betonausbauten stammen. Dieses System ist im Opalinuston bei einem pH-Wert von 6,9-7,8 gepuffert. Da sowohl die Behälter-Korrosion als auch die Prozesse an der Versatzmaterial-/Tonsteingrenze saure bis neutrale pH-Bedingungen schaffen ist hier die Löslichkeitsgrenze der einzelnen Actiniden hoch.

Die Unsicherheiten liegen in den thermodynamischen Daten sowie in den Extraktionsmethoden. Durch sinnvolle Kombination der einzelnen Extraktionsmethoden kann das Vertrauen in die gewonnenen Daten gesteigert werden. Das Upscaling ist für einen Tonsteinstandort für die Vorgänge an der Versatzmaterial/Tonstein Grenze möglich, da von homogenen Bedingungen ausgegangen werden kann. Die Vorhersage des lokalen geochemischen Milieus in Abfallnähe ist bei der Korrosion der Behälter dagegen weniger einfach, da einzelne Bereiche unterschiedlich hydratisieren können.

Wenn auch die Charakterisierbarkeit im Hinblick auf die „wahre“ Höhe der Löslichkeitsgrenzen für Radionuklide als eher weniger gut einzustufen ist, so lassen die Versuche jedoch mit hoher Sicherheit eine Aussage hinsichtlich maximaler Löslichkeiten von Radionukliden zu.

Das Gesamtergebnis der Bewertungen für den Parameter Löslichkeitsgrenzen lautet: „Das Vertrauen in die Charakterisierung der Löslichkeitsgrenzen im Bentonitversatz für den Istzustand wird als hoch (Einstufung: 4) eingeschätzt.“

Gesamteinstufung der Charakterisierbarkeit: 4

Beim **ewG** als natürlicher Endlagerkomponente muss die Untersuchung der Robustheitskriterien aufgrund der räumlichen Heterogenität differenzierter vorgenommen werden. Die Bewertung wird hier in mehreren Teilschritten vorgenommen. Im Einzelnen wird untersucht, wie gut der Parameter aufgrund der Aussagekraft der gewählten Untersuchungsmethode, der Standortverhältnisse im Hinblick auf die Heterogenität der geologischen Strukturen und des Grades der natürlichen Streuungen der Parameter sowie des zur Charakterisierung des Parameterwertes betriebenen Untersuchungsaufwandes, bestimmt werden kann. Hierbei stehen sowohl

- die Genauigkeit und Repräsentanz der entsprechenden Messmethoden und Nachweisverfahren,
- die Komplexität der natürlichen Komponenten ewG oder weiteres Wirtsgestein im

Hinblick auf die Übertragbarkeit der Messergebnisse auf die Standortverhältnisse (räumliche Upscaling) der Parametergröße

- als auch der zu dem Endlagersystem bisher betriebene Aufwand bei der Erhebung des Parameterwertes (Untersuchungsumfang der Erkundung)

im Mittelpunkt der Betrachtung. Nach jedem Teilschritt erfolgt eine Bewertung zum jeweiligen Aspekt der Charakterisierbarkeit auf einer ordinalen Rangskala, die von 1 (sehr niedrig) bis 5 (sehr hoch) reicht. Die Bewertung des Vertrauens in die Charakterisierung des Ist-Zustandes der RSF-Parameter des ewG erfolgt anhand verschiedener Bewertungskriterien, die in den folgenden Abschnitten erläutert werden.

11.3.1 Teilschritt a): Charakterisierbarkeit der Parametergröße in Abhängigkeit von der Untersuchungsmethode

Bei Teilschritt a) geht es darum, die Untersuchungsmethode, die zur Ermittlung eines Parameterwertes zum Einsatz gelangt ist, bezüglich ihrer Qualität, d. h. Messgenauigkeit bzw. -zuverlässigkeit einzuschätzen und - hierauf fußend - eine ordinale Zuverlässigkeitsbewertung von 1 (unzuverlässig / wenig geeignet) bis 5 (hohe Zuverlässigkeit / Genauigkeit) vorzunehmen. Einzubeziehen ist hierbei auch die Art der Probengewinnung, die Frage, ob die Versuche in situ oder im Labor durchgeführt werden sowie Überlegungen zur Repräsentanz der Messwerte für das räumliche Volumen, welches durch den Messwert in seinen Eigenschaften charakterisiert werden soll (räumliches Upscaling). Weiterhin gilt es zu prüfen, ob verschiedene Messverfahren, die bezüglich der räumlichen Auflösung und der Messgenauigkeit unterschiedliche Aussagen erlauben, sinnvoll kombiniert wurden. Für den Tonsteinstandort wurde hierbei auf die Ergebnisse zur Aussagekraft übertägiger Untersuchungsmethoden aus dem VerSi-Teilvorhaben 3607R02538 /GRS 10a/ zurückgegriffen.

Beispiel: Ermittlung der Gebirgspermeabilität des ewG Tonstein

Es wird davon ausgegangen, dass in Bohrlöchern, die zum Zwecke der Erkundung abgeteuft wurden, mehrere Packertests pro Bohrloch durchgeführt werden. Der Vorteil dieser Methode liegt darin, dass die Permeabilität des intakten Gesteinsverbandes in einem (je nach Gebirgsdurchlässigkeit) mehr oder weniger großen in situ-Bereich gemessen werden kann. Nachteile der Druckpackertests sind neben etwaigen Umläufigkeiten nahe der Packermanschetten Porendurchmesseraufweitungen aufgrund von hohen Packer-

*drücken 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. Dies ergibt sich auch im Vergleich mit der rechnerisch zur Erhaltung erhöhter Drücke conater Wässer (Opalinuston) erforderlichen Permeabilität. Aus den oben genannten Gründen wird die Charakterisierbarkeit der Parametergröße Gebirgspermeabilität des ewG durch die Untersuchungsmethode „Packertests“ als **relativ hoch** angesehen.*

Einstufung: 4

11.3.2 Teilschritt b): Räumliche Charakterisierbarkeit der Parametergröße

Ziel ist die Bewertung der Standortverhältnisse im Hinblick auf die räumliche Homogenität der geologischen Struktur und des lithologischen Aufbaus. Hierbei ist die räumliche Repräsentativität eines Parameters für einen jeweiligen Standort zu bewerten und festzustellen, ob bei gleichem Untersuchungsaufwand die Repräsentativität an den zu vergleichenden Standorten gleich groß ist. Anders ausgedrückt: Es ist festzustellen, welcher jeweilige Untersuchungsaufwand an den zu vergleichenden Standorten zu einer vergleichbaren Repräsentativität führt. Beispielsweise ist qualitativ zu bewerten, wie groß der Standortbereich ist, der durch eine Messung repräsentiert wird (räumliches Upscaling). Indikatoren für diese Einordnung wurden im Methodenschritt „Globale Standortcharakterisierung“ (Verfahrensschritt 4, s. Kap. 10) angegeben. Das Ergebnis ist eine ordinale Bewertung der Standortverhältnisse von 1 (sehr hohe Heterogenität = sehr schlecht charakterisierbar) bis 5 (sehr hohe Homogenität = sehr einfach charakterisierbar).

Beispiel: Ermittlung der Gebirgspermeabilität des ewG Tonstein

*Das Wirtsgestein des Tonsteinstandortes und damit auch der ewG ist gekennzeichnet durch vollmarine, landferne Beckenfazies ohne Einlagerung von Deltaschüttungen, geringe Sedimentationsraten und geringe Mächtigkeitsschwankung des Wirtsgesteins. Es bestehen keine Hinweise auf für das Norddeutsche Becken übermäßige tektonische oder thermale Beanspruchung. Ein hoher Smektit-Anteil hat zur Verheilung von etwaigen ehemaligen Trennflächensystemen geführt. Diese Eigenschaften führen beim Tonsteinstandort zur Einschätzung **sehr guter Charakterisierbarkeit** im Hinblick auf die Gebirgspermeabilität.*

11.3.3 Teilschritt c): Aussagesicherheit aufgrund des Untersuchungsaufwandes unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus Teilschritt b)

Ziel dieses Arbeitsschrittes ist es, die Ergebnisse aus dem vorangegangenen Arbeitsschritt b) an dem für die Messungen des Parameters tatsächlich betriebenen Untersuchungsaufwand zu spiegeln. Bei diesen Betrachtungen spielen die räumliche Auflösung der Messverfahren, die Anzahl der Probennahmen bzw. Messpunkte oder Bohransatzpunkte und ihre räumliche Anordnung eine wesentliche Rolle. Generell ist unter Berücksichtigung der Standortverhältnisse (siehe Teilschritt b) und des Untersuchungsprogrammes die Frage zu beantworten, welche Inhomogenitäten auftreten könnten, die potentiell zu einer (im Sinne der Radionuklidrückhaltung ungünstigen) Abweichung vom gemessenen Parameterwert führen, ohne dass sie während der Untersuchung erfasst werden. Im Ergebnis erfolgt eine ordinale Bewertung der Aussagesicherheit von 1 (sehr geringe Aussagesicherheit) bis 5 (sehr hohe Aussagesicherheit).

Beispiel: Ermittlung der Gebirgspermeabilität des ewG Tonstein

Ausgegangen wird von einem übertägigen Untersuchungsprogramm, bei dem zur Ermittlung der Gebirgspermeabilität 5 Bohrungen in das Wirtsgestein abgeteuft werden, in denen jeweils mehrere Packertests zur Durchlässigkeitsuntersuchung durchgeführt werden. Weiterhin werden an Kernproben jeder Bohrung etwa 10 Durchlässigkeitsuntersuchungen im Labor durchgeführt. Außerdem wird vom Vorliegen von Ergebnissen einer 3D-Seismik zur Erkundung der strukturellen Homogenität des Wirtsgesteins ausgegangen.

Zu beantworten ist die Frage, welche potentiell permeabilitätserhöhenden Inhomogenitäten angesichts der Standortverhältnisse (siehe Teilschritt b) aufgrund des Bohrlochabstandes und des Auflösungsgrades der 3D-Seismik auftreten können, ohne detektiert worden zu sein.

Im Ergebnis dieser Prüfung wird festgestellt, dass die vertikale Permeabilität bei dem gegebenen Untersuchungsaufwand und dem gewählten Messverfahren angesichts der homogenen Standortverhältnisse (siehe Teilschritt b) zuverlässig beschrieben werden kann. Es ist zwar vorstellbar, dass dabei kleinräumige, in sich abgeschlossene Inhomo-

genitäten, die sich durch Schwankungen der Korngrößen oder des Mineralbestandes im m bis m-10er m-Bereich auszeichnen, nicht erfasst werden. Diese sind jedoch hydraulisch im Hinblick auf die Gebirgspermeabilität nicht relevant. Größere Inhomogenitäten können aufgrund der Standortverhältnisse ausgeschlossen werden. Eine hydraulische Wirksamkeit kleinerer Störungen sollte aufgrund des Smektit-Anteils (plastische Wiederverheilung) und des Überlagerungsdruckes auszuschließen sein. Aufgrund der flachen Lagerung ist ausgeprägte Schieferigkeit nicht anzunehmen.

Oben genannte Umstände führen beim Tonsteinstandort zur der Einschätzung einer **hohen Aussagesicherheit** zur Gebirgspermeabilität bezogen auf den Untersuchungsaufwand und die Standortverhältnisse.

Einstufung: 4

11.3.4 Aggregation der Bewertungen aus den Teilschritten a) bis c)

Im letzten Teilschritt zur Bewertung der Charakterisierbarkeit des RSF-Parameters des ewG geht es darum, die Einzelbewertungen zur Charakterisierbarkeit, die in den Teilschritten a) bis c) vorgenommen wurden, zu einer Gesamtaussage zum Vertrauen in die Charakterisierbarkeit der Parametergröße zum Ist-Zustand zusammenzufassen (Bewertungsaggregation).

Zu beachten ist, dass der Teilschritt c) bereits eine Aggregation mit Teilschritt b) beinhaltet. Zusammengefasst werden muss daher nur die Bewertung des Teilschritts a) mit der des Teilschritts c). Für diesen Aggregationsschritt kann keine pauschale Wichtung der Einzelbewertung vorgegeben werden, vielmehr muss sie in jedem Einzelfall durch begründete Abwägungen auf Basis von Expertenmeinungen verbal-argumentativ erfolgen. Meistens gibt dabei die „schlechteste“ Teilbewertung den Ausschlag bei der Gesamtbewertung (Prinzip: eine Kette ist so stark wie ihr schwächstes Glied).

Beispiel: Ermittlung der Gebirgspermeabilität des ewG Tonstein

*Das Gesamtergebnis der beispielhaft für den Parameter Gebirgspermeabilität des ewG des Tonsteinstandorts unter Berücksichtigung der Gesichtspunkte von a) bis c) durchgeführten Bewertung lautet: „Das Vertrauen in die Charakterisierung der Gebirgspermeabilität für den Ist-Zustand wird insgesamt als **hoch** eingeschätzt“. Ausschlaggebend waren*

hierfür die Bewertungen zur Untersuchungsmethode und zum Untersuchungsaufwand (Teilschritte a und c).

Einstufung: 4

Ergebnis des Verfahrensschrittes 5b ist eine begründete Bewertung des Vertrauens in die Charakterisierung der die RSF charakterisierenden Parameter für den Ist-Zustand auf einer ordinalen Rangskala (1 - 5).

11.4 Verfahrensschritt 5c: Ermittlung der Prognostizierbarkeit der RSF-Parameter und der einwirkungsbedingten Auswirkungen auf den RSF-Parameter

Nachdem in den vorherigen Verfahrensschritten für den jeweils betrachteten RSF-Parameter das Vertrauen in die Charakterisierung ihres Ist-Zustandes, d. h. zum heutigen Zeitpunkt begründet und ordinal bewertet wurde, geht es in den nächsten Verfahrensschritten vereinfacht ausgedrückt darum, wie sicher die Voraussage der Veränderung des betrachteten RSF-Parameters über einen langen Zeitraum (Größenordnung 1 Mio. Jahre) eingeschätzt wird (Prognostizierbarkeit) und welchen Auswirkungen der RSF-Parameter infolge der internen und/oder externen Einwirkungen auf die Endlagersysteme ggf. ausgesetzt ist (Maß für die Systemrobustheit). Hierzu bedarf es im Vorfeld einiger näherer Erläuterungen und Definitionen:

11.4.1 Erläuterungen und Prämissen

11.4.1.1 Prognosen und Unsicherheiten

Die Entwicklung, die das Endlagersystem im Laufe des Nachweiszeitraumes nehmen wird, ist mit vielen Ungewissheiten behaftet. In der Szenarienentwicklung wird der Unwissenheit Rechnung getragen und potenzielle Entwicklungen des Endlagersystems (Szenarien) identifiziert. Ein Szenario beschreibt eine postulierte Entwicklung des Endlagersystems und seiner Sicherheitsfunktionen, die durch eine Kombination relevanter Faktoren spezifiziert ist, welche das Endlagersystem charakterisieren oder dieses beeinflussen. Nach dem der Entwicklung der Abwägungsmethodik zugrunde liegenden Verständnis enthält ein Szenario die Vorgabe von internen und/oder externen Einwirkungsereignissen und einer denkbaren Kombination das Endlagersystem charakterisierender

FEP (*features, events* und *processes*). Die Prognose der Entwicklung des Endlagersystems (Szenario) entlang der Zeitachse kann nur mittels Langzeitsicherheitsanalysen erfolgen.

Für die hier vorgestellte Abwägungsmethodik wird unterstellt, dass bei einem späteren operativen Endlagersystemvergleich bereits für jeden der zu vergleichenden Standortkandidaten eine umfassende Szenarientwicklung vorliegt, die Bestandteil der Standortcharakterisierung ist. Weiterhin wird davon ausgegangen, dass die Auswirkungen (Konsequenzen) der Szenarien auf das Endlagersystem und damit auf den Einschluss bzw. den Radionuklidtransport im Endlagersystem durch begleitende Sicherheitsanalysen auf der Basis von numerischen Rechenverfahren ermittelt wurden.

Im Rahmen der Szenarientwicklung erfolgen mit der Identifizierung der Szenarien deren Bewertung hinsichtlich der Intensität, der Unsicherheiten hinsichtlich ihres Eintretens sowie ihre Einordnung in Wahrscheinlichkeitsklassen (Eintrittswahrscheinlichkeit). Hierbei wird unterschieden nach wahrscheinlichen und nach weniger wahrscheinlichen Szenarien. In der Regel werden im Rahmen der Szenarientwicklung Szenarien ähnlichen Ablaufs zu Gruppen zusammengefasst und ein für die jeweilige Gruppe repräsentatives Szenario zur weiteren Behandlung identifiziert.

Die Szenarientwicklung liefert auch Erkenntnisse darüber, welche internen oder externen Ereignisse Einfluss auf die Endlagerentwicklung nehmen und wie sie auf das Endlagersystem einwirken. Hierbei lassen sich Aussagen zur **Prognostizierbarkeit** dieser Einwirkungsereignisse ableiten. Einwirkungsereignisse werden je nach Einschätzung ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit in wahrscheinliche und weniger wahrscheinliche Fälle klassifiziert.

Beispiel:

Prognoseunsicherheiten bezüglich einer Inlandeisüberfahung des Standortes mit Bildung von Schmelzwassererosionsrinnen:

1. Prognosen zur klimatischen Entwicklung der Erde insbesondere hinsichtlich des periodischen Auftretens von Kaltzeiten, stützen sich auf die heute gebräuchliche Milankowitsch-Theorie, die als Ursache Variationen der Schiefe der Erdachse und deren Präzision sowie Abweichungen in der Erdumlaufbahn in Betracht zieht. Abgesehen von der Frage, ob die Milankowitsch-Theorie in Zukunft gültig ist (so ist es nicht nachgewiesen, ob in Zukunft überhaupt Kaltzeiten mit extremen Auswirkungen wie Inlandsvereisung

auftreten werden), können Eintrittszeit, Dauer und Intensität zukünftiger Kaltzeiten mit Inlandvereisung nicht genau vorausgesagt werden. So kann keine belastbare Klimavorhersage für Zeiträume deutlich länger als 100.000 a geführt werden. Daher unterstellt man bei Standortprognosen das Eintreten der kaltzeitbedingten Auswirkungen der letzten 800.000 Jahre und wählt im Regelfall die Elsterkaltzeit als auswirkungsintensivste Inlandvereisung als Referenzkaltzeit. Aus dieser Vorgehensweise resultieren jedoch erhebliche Unsicherheiten. So ist es beispielsweise nicht auszuschließen, dass in Zukunft Kaltzeiten auftreten, deren Auswirkungen die der Elsterkaltzeit noch übertreffen.

2. Auch die Lage zukünftiger Schmelzwassererosionsrinnen ist unbekannt. Da die Verbreitung der Rinnen sich kaum an Untergrundstrukturen sondern nahezu allein der (heute völlig unbekannt) Lage von Gletscherspalten folgt, bleibt die Frage, ob die zu vergleichenden Standorte von dieser Form kaltzeitlicher Einwirkung betroffen werden können oder nicht, praktisch offen. Beispielsweise ist, da die lagebestimmenden Faktoren unbekannt sind, eine erneute Rinnenbildung am Standort Gorleben genauso wahrscheinlich ist wie eine (erstmalige) Rinnenbildung in anderen Regionen Norddeutschlands.

3. Hinsichtlich der Erosionstiefe der Rinnenstrukturen bestehen ebenfalls erhebliche Unsicherheiten. Anhand der Verteilung von pleistozänen Rinnen mit verschiedenen Erosionsrinnen wurde innerhalb des Vorhabens VerSi eine Wahrscheinlichkeit zum Auftreten einer Rinnenstruktur mit einer bestimmten Tiefenreichweite abgeschätzt. Hierzu wurde durch eine Flächenkartierung der Rinnenstrukturen durchgeführt und die Flächenverhältnisse von eiszeitlichen Rinnen mit einer Erosionstiefe > 250 m unter Geländeoberkannte zur Gesamtfläche des durch Rinnen geprägten Gebietes im norddeutschen Raum ermittelt. Hierbei wurde errechnet, dass Gesamtfläche von 90.000 m² die Flächenanteile der Rinnen, deren Basis tiefer als > 250 m unter GOK liegt, bei ca. 4 % liegen. Hieraus wurde abgeleitet, dass eine Rinnenbildung mit Erosionstiefen **bis 250 m** als wahrscheinliches Ereignis zu betrachten ist. Rinnen mit Erosionstiefen über 250 m unter GOK werden als weniger wahrscheinlich betrachtet. Hinsichtlich des Verlaufs der Rinnenstrukturen wurde festgelegt, dass diese sich nach den Ausrichtungen des gebildeten Rinnensystems der Elster-Kaltzeit orientiert. Bei dieser Vorgehensweise bestehen naturgemäß erhebliche Unsicherheiten, vor allem dahingehend, ob Rinnenbildungen der vergangenen 400.000 a repräsentativ für den Prognosezeitraum von 1 Mio. a sind.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass sich keine sicheren Angaben über den genauen Verlauf und Teufe zukünftig angelegter Rinnen machen lassen. Genauso

wenig lässt sich eine Ausweitung bereits vorhandener Rinnen ausschließen. Daher müssen bei der Bewertung der Robustheit der Sicherheitsfunktionen des ewG prinzipiell alle Rinnentiefen von 0 bis 500 m u. GOK ins Auge gefasst werden, wobei zu berücksichtigen ist, dass das Auftreten tiefer Rinnen weniger wahrscheinlich ist als bei Flächen. Diese Vorgehensweise impliziert allerdings, dass zukünftige Kaltzeiten keine stärkeren Auswirkungen haben werden als die der pleistozänen Kaltzeiten.

Prämisse der hier vorgestellten Methodik ist, dass aus den Ergebnissen der Szenarientwicklung nur die Einwirkungsereignisse, d. h. äußere oder innere Einwirkungen (inklusive der Würdigung von Prognoseunsicherheiten im obigen Sinne) dem Abwägungsverfahren als äußere oder innere Randbedingungen zu Grunde gelegt werden. Die Würdigung weiterer Unsicherheiten (Charakterisierbarkeit, Prozessverständnis) sowie die Untersuchung der Auswirkungen auf die RSF und ihre Parameter ist dann Aufgabe der Arbeitsschritte 5b und 5c.

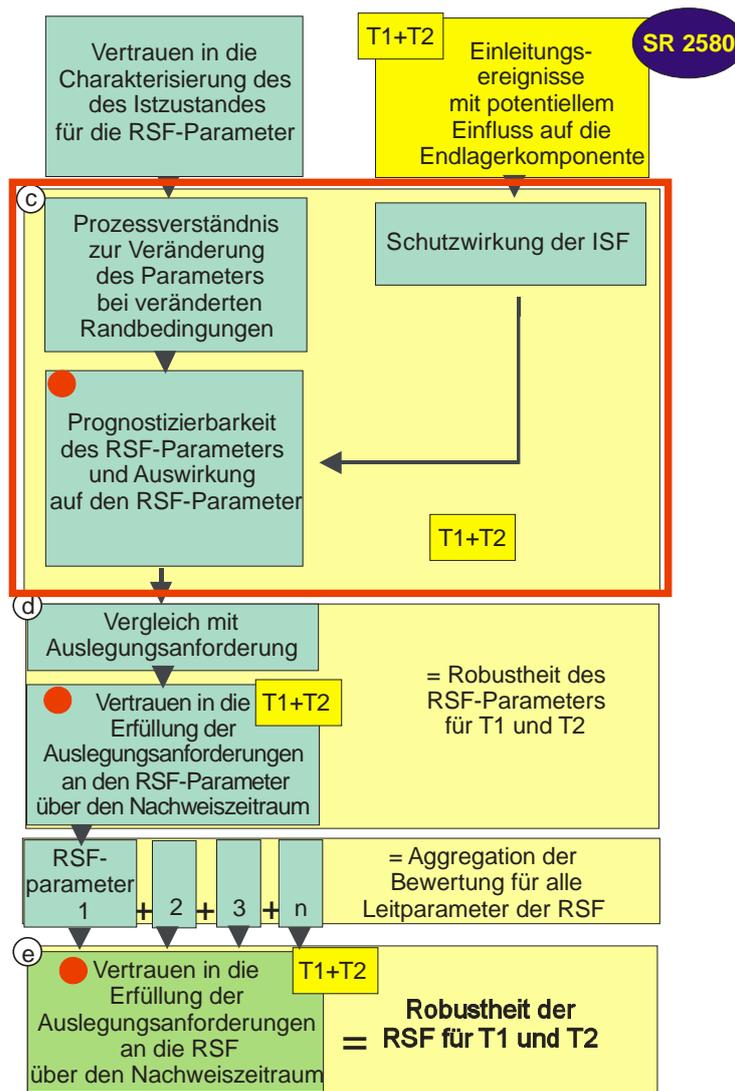


Abb. 13: Teilschritte zur Ermittlung der Prognostizierbarkeit eines RSF-Parameters und der Auswirkungen auf den RSF-Parameter durch interne und/oder externe Einwirkungen. SR 2580: Ergebnisse des VerSi-Teilvorhabens „Szenarienermittlung“

Es werden dem vergleichenden Abwägungsverfahren, wie oben angeführt, die dem Abwägungsprozess vorangegangenen Szenarientwicklung und den Prognoseunsicherheiten durch die Einordnung - des Szenarios einerseits und den daraus abgeleiteten Einwirkungsereignissen andererseits - in Wahrscheinlichkeitsklassen als Randbedingung vorgegeben. Die Konsequenzen aus Prognoseunsicherheiten werden damit implizit als Eingangsbedingung in das Abwägungsverfahren aufgenommen. Folglich dürfen diese Prognoseunsicherheiten im Rahmen des Abwägungsverfahrens nicht als Robustheitskriterium bei der Bewertung der RSF-Parameter gewürdigt werden.

Besteht die Situation, dass ein Einwirkungsereignis nur eines der zu vergleichenden Endlagersysteme betrifft, bei dem anderen jedoch definitiv ausgeschlossen werden kann, so kann prinzipiell in zweierlei Weise verfahren werden:

1. Das Ereignis wird formal beiden Endlagersystemen zu Grunde gelegt. Im Fall des Standorts, bei dem das Einwirkungsereignis ausgeschlossen werden kann, wird im Arbeitsschritt 5c pauschal eine „extrem hohe“ Robustheit gegenüber Auswirkungen der Systementwicklungen bescheinigt (Einstufung in die ordinale Rangklasse 5). Im Verfahrensschritt 6 (Kap. 12) wird das nicht betroffene Endlagersystem bei der Korrelation Relevanz-Robustheit in diesem Fall dann keine Robustheitsschwächen aufweisen. Aufgrund „robustheitsmäßiger Unauffälligkeit“ wäre das Endlagersystem für dieses Einwirkungsereignis für die weitere Bewertung im letzten Verfahrensschritt 7 irrelevant.
2. Das Ereignis wird nur dem Endlagersystem zugrunde gelegt, welches potentiell betroffen ist. Im Verfahrensschritt 6 wird bei der Korrelation Relevanz-Robustheit überprüft, ob die Sicherheitsfunktionen nur des betroffenen Endlagersystems bei dem durch das Ereignis definierten Einwirkungsereignis Robustheitsschwächen aufweisen, die dann entsprechend der weiteren Vorgehensweise untersucht und bewertet werden.

Beide Vorgehensweisen führen zum gleichen Ergebnis. Methode 2 erscheint als logischer und im Sinne der Nachvollziehbarkeit als vorteilhafter. Prinzipiell ist jedoch nur wichtig, dass im Abwägungsprozess einheitlich verfahren wird.

11.4.1.2 Prozessverständnis

Die zweite Form von Unsicherheiten, die bei der Prognose der Veränderung eines Parameterwertes über lange Nachweiszeiträume auftritt, betrifft das Prozessverständnis. Durch diesen Begriff wird der Kenntnisstand zur Veränderung eines Parameterwertes bei bekannten Änderungen äußerer Randbedingungen (infolge interner oder externer Einwirkungen) bezeichnet. Selbst wenn die Entwicklung des Endlagersystems über einen Zeitraum von 1 Mio. Jahre exakt bekannt wäre, so bestünde immer noch die Unsicherheit, wie sich der Parameterwert selbst bei einer bekannten Änderung der äußeren Randbedingungen ändert. Dies liegt zum Beispiel daran, dass Prozesse, die bei einer bestimmten Einwirkung auf das Endlagersystem oder einige seiner Komponenten einsetzen, nicht genau bekannt sind. Hieraus ergeben sich Unsicherheiten im Hinblick auf das Ausmaß der Änderung des Parameterwertes. Im Extremfall ist es sogar unklar, ob

sich der Parameterwert in eine (bezogen auf die Radionuklidrückhaltung innerhalb der jeweiligen Komponente) positive oder negative Richtung entwickelt.

Daher ist zusätzlich zu überprüfen und zu bewerten, wie gut das Prozessverständnis zu der betrachteten Parametergröße ist. Ausgedrückt als reziprokes Robustheitsmerkmal: Es ist die Unsicherheit abzuschätzen, die dem Prozessverständnis zur Reaktion des betrachteten Parameterwertes auf eine bestimmte Änderung der äußeren Randbedingung zu Grunde liegt.

Beispiel:

Im Vorhaben VerSi werden beim Verschlusskonzept zum Standort Gorleben Streckenabdichtungen aus Salzbeton vorgesehen, die zur Abdichtung der Richtstrecken gegen den Infrastrukturbereich dienen. Salzbeton unterliegt bekanntermaßen der Korrosion beim Kontakt mit kalium- oder magnesiumhaltigen Lösungen. Selbst bei bekanntem Volumen und bekannter Zusammensetzung der angreifenden Kali-Lösung resultieren aus Korrosionsversuchen im Labor oder aus geochemischen Modellrechnungen deutliche Unterschiede hinsichtlich des Ablaufs und damit der Geschwindigkeit der Korrosion, die eine zunehmende Erhöhung der Permeabilität der Abdichtungen bewirkt. Die Ursache ist, dass der genaue Abbaumechanismus der CSH-Phasen des Zements sowie die Rolle von Nachhydratationseffekten nicht vollständig bekannt sind. Im Ergebnis kann die prognostizierte Permeabilitätserhöhung pro ausgetauschtes Porenvolumen der Salzbetonabdichtung um ca. eine Größenordnung variieren.

11.4.1.3 Systemrobustheit

Im Gegensatz dazu beinhaltet der Aspekt der **Systemrobustheit** keinerlei Merkmale „menschlicher Unzulänglichkeit“. Systemrobustheit bedeutet vielmehr die Unempfindlichkeit des Endlagersystems gegenüber veränderten Randbedingungen (Einwirkungsereignissen), die sich aus der Standortentwicklung (z. B. Inlandeisüberfahung) oder endlagerinduzierten Prozessen (z. B. Gasdruckaufbau) ergeben. Die „Gutmütigkeit“ der Reaktion der Sicherheitsfunktionen eines Endlagersystems gegenüber äußeren Einflüssen (z. B. Rinnenerosion während kaltzeitlicher Ereignisse) ist als systemimmanentes Robustheitsmerkmal völlig unabhängig von den im vorangegangenen beschriebenen Robustheitsmerkmalen Charakterisierbarkeit und Prozessverständnis.

Veränderte externe/interne Randbedingungen (Einwirkungsereignisse) können dazu führen, dass sich die RSF charakterisierenden Parameterwerte gegenüber dem Ist-Zustand verändern. In Arbeitsschritt 5c wird die Systemrobustheit reziprok, d. h. als Ausmaß der Veränderung des Parameterwertes bewertet. Eine hohe Systemrobustheit ist dann gegeben, wenn die Änderung des Parameterwertes stets nur gering ist oder zur „sicheren Seite“ hin erfolgt, der Beitrag des Parameters zur übergeordneten Anforderung Radio-nuklidrückhaltung also nicht verringert wird.

In Arbeitsschritt 5c wird ebenfalls hinterfragt, ob und in welchem Maße eine Einflussnahme der Einwirkungsereignisse auf die rückhaltenden Sicherheitsfunktionen des ewG möglich ist. Dabei wird den realen Standortgegebenheiten Rechnung getragen. Diese Vorgehensweise trägt den wirksamen ISF ausreichend Rechnung.

Beispiel:

Parameter „Ausdehnung des Wirtsgesteins um das Endlagerbergwerk, für die die charakteristischen Eigenschaften der Sicherheitsfunktion gelten“

ewG Tonstein, Zeitraum > 10.000 a,

Szenario Kaltzeit mit 700 m Inlandeisüberdeckung und Rinnenbildung infolge Schmelzwassererosion

- *Wahrscheinliches Ereignis: Rinnenbildung < 250 m Tiefe:*

*Das Ereignis hat keinen Einfluss auf die Ausdehnung des Wirtsgesteins um das Endlagerbergwerk, für die die charakteristischen Eigenschaften der Sicherheitsfunktion gelten. Hintergrund ist, dass oberhalb des Wirtsgesteins ca. 250 m Deckgebirge anstehen, die das Wirtsgestein vor Erosion im Zuge der Rinnenbildung schützen. Die Schutzwirkung der integritätsbewahrenden Sicherheitsfunktion des Deckgebirges „Schutz des ewG vor Erosion und Subrosion“ verhindert sämtliche Auswirkungen auf den Parameter. Das für diese Aussage erforderliche Prozessverständnis wird als ausreichend hoch angesehen. Die Auswirkungen der Systementwicklungen werden als **sehr gering** eingestuft.*

Einstufung der Auswirkungen der Systementwicklungen: 5

11.4.1.4 Zusammenhang Charakterisierbarkeit, Prozessverständnis und Systemrobustheit

Die Auswirkungen dieser verschiedenen, die Robustheit eines RSF-Parameters beeinflussenden Aspekte können bildlich folgendermaßen verdeutlicht werden:

Der Idealfall bestünde darin, die betrachtete Parametergröße in jedem infinitesimal kleinen Kontrollvolumen eindeutig zu charakterisieren und die einzige tatsächliche ablaufende Systementwicklung über die nächsten 1 Mio. Jahre genau vorherzusagen. Diese Möglichkeit ist in der Realität verständlicherweise nicht gegeben, da bei beiden Aussagen immer mehr oder weniger große Unsicherheiten auftreten.

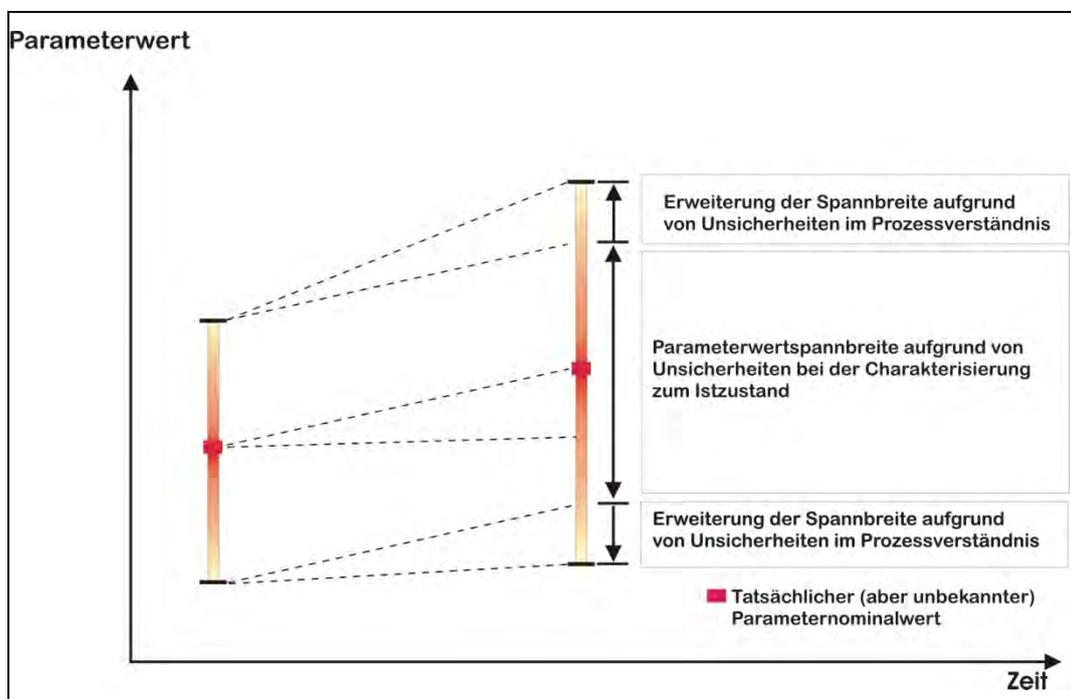


Abb. 14: Schematische Darstellung der Auswirkungen von Unsicherheiten bei Charakterisierung und Prognose (Prozessverständnis) der durch interne oder externe Einwirkungen hervorgerufenen Parameteränderungen.

Bildlich ließe sich die Konsequenz dieser Unsicherheiten bezüglich Charakterisierung und Prozessverständnis bei einem Parameterwert folgendermaßen skizzieren:

- Unsicherheiten bei der Charakterisierung des Ist-Zustandes (Kap. 11.3) führen (z. B. bei der Bestimmung der Permeabilität des Wirtsgesteins im ewG) zu einer bestimmten Parameterwertspannweite (linke Spannweite in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Diese ist abhängig von der

Repräsentativität und Qualität der Untersuchungsmethoden, der „Einfachheit/Schwierigkeit“ der Standortcharakterisierung (Homogenität/Heterogenität) und des Untersuchungsumfanges (Anzahl und Lage der Bohrungen, Anzahl der Versuche an Gesteinsproben etc.).

- Diese Spannweite wird durch die Unsicherheiten aufgrund der Veränderungen der äußeren Randbedingungen, die sich aus der Systementwicklung während der nächsten 1 Mio. Jahre ergeben, abermals überlagert und im Regelfall vergrößert (rechte Spannweite **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Die Erweiterung der „Unschärfe des Parameterwertes“ resultiert sowohl aus den Unsicherheiten der Systementwicklung als auch aus den Unsicherheiten zur Veränderung des Parameterwertes bei genau definierten externen Randbedingungen, „wenn man genau wüsste was passiert“ (Unsicherheiten beim Prozessverständnis, Gegenstand des Arbeitsschrittes 5c). Diese beiden Aspekte werden im Rahmen der vorliegenden Methodenerläuterung unter den Begriff der Prognostizierbarkeit zusammengefasst.
- Demgegenüber drückt sich die **Systemreaktion** als Maß für die Systemrobustheit auf veränderte externe Randbedingung als Verringerung oder Vergrößerung des Parameterwertes selbst, nicht aber in Form einer weiteren Vergrößerung der unsicherheitsbedingten Parameterspannweite aus („Shift“ in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

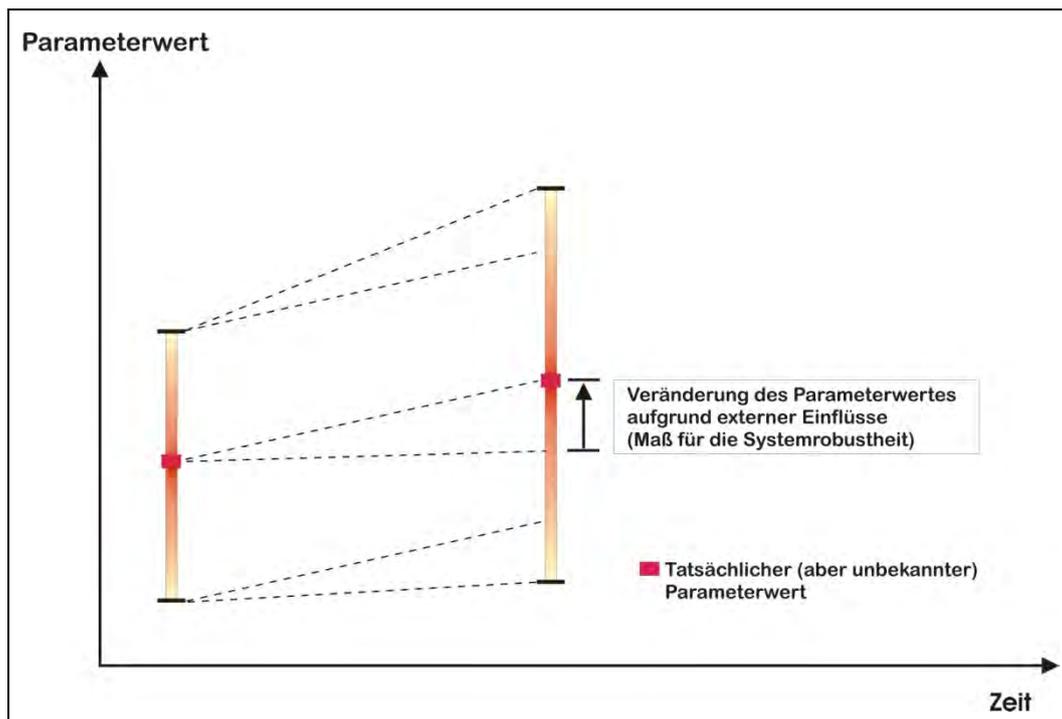


Abb. 15: Schematische Darstellung der Veränderung eines Parameterwertes infolge veränderter externer Randbedingungen als Maß für die Systemrobustheit.

Trotz der unterschiedlichen Natur der beiden Robustheitsmerkmale ist es nicht möglich, die Systemrobustheit isoliert von Prognoseunsicherheiten aufgrund „menschlicher Unzulänglichkeit“ zu bewerten, da letztere die Bewertung der Systemrobustheit naturgemäß „überlagert“. Zur Verdeutlichung: Die genaue Reaktion eines Endlager-systems (und damit auch der Veränderung des jeweilig betrachteten Parameters) bei veränderten äußeren Randbedingungen kann nicht separat eingeschätzt werden, da die Prognose bezüglich der Art und des Ausmaßes der äußeren Randbedingungen ebenso wie das Prozessverständnis mit Unsicherheiten behaftet ist. Diese Unsicherheiten lassen sich bei der Bewertung der Systemrobustheit nicht „abtrennen“. Daher besteht die einzige Möglichkeit darin, Prognoseunsicherheit und Systemrobustheit in einem gemeinsamen Arbeitsschritt, dem Verfahrensschritt 5c, zu untersuchen.

11.4.2 Methodische Vorgehensweise

Auch der Verfahrensschritt 5c gliedert sich in mehrere Teilschritte:

1. Festlegung von Einwirkungsereignissen

Zunächst werden alle durch die Szenarienentwicklung identifizierten auf die Endlagersysteme einwirkenden Ereignisse (Einwirkungsereignisse) der Abwägungsmethodik zugrunde gelegt. Betrachtet werden nur wahrscheinlich und weniger wahrscheinliche Einwirkungsereignisse. Unrealistische Systementwicklungen, d. h. unwahrscheinliche Ereignisse oder *what-if*-Betrachtungen bleiben unberücksichtigt, da diese die Ergebnisse des Endlagersystemvergleichs verzerren und daher vergleichsmethodisch unzulässig sind. Die vergleichsrelevanten Einwirkungsereignisse werden allen Endlagerkomponenten zugrunde gelegt und im Hinblick auf ihre jeweiligen Auswirkungen untersucht. Wenn keine Auswirkung auf die betrachtete Endlagerkomponente besteht, so ist eine entsprechend hohe Einstufung bezüglich der Systemrobustheit (i.d.R. Einstufung in die Robustheitsklasse 5) vorzunehmen. Ein Ausschluss aus der weiteren Betrachtung ist dagegen methodisch nicht zulässig, da gerade die fehlende Auswirkung ein Maß für die Systemrobustheit einer Komponente ist.

Bei der Auswahl von Einwirkungen sind, ähnlich wie bei der Relevanzwichtung der Sicherheitsfunktionen im Verfahrensschritt 3, die beiden Wirkungszeiträume ($t < 10.000 \text{ a}$ / $t > 10.000 \text{ a}$) zu unterscheiden. Für die „schnellwirkenden“ geotechnischen und technischen Barrieren aus wirtsgesteinsfremdem Material (siehe Kap. 9) ist bei der Auswahl nur der erste Wirkungszeitraum ($t < 10.000 \text{ Jahre}$) zu betrachten. Es handelt sich um die Komponenten

- Behälter
- Schachtverschlüsse und
- Streckenabdichtungen zum Infrastrukturbereich (Gorleben)

Bei allen anderen Komponenten sind beide Wirkungszeiträume zu betrachten.

Bei der Demonstration der Durchführung der verbal-argumentativen Abwägungsmethodik war es im Vorhaben VerSi – wie bereits im Vorangegangenen erwähnt - aufwandsbedingt nicht möglich, sämtliche denkbaren Einwirkungsereignisse, die eine potentielle Einwirkung auf die zu vergleichenden Endlagersysteme haben

können, der exemplarischen Robustheitsbewertung zugrunde zu legen. Zur Demonstration und Illustration der Methodenanwendung wurde die Bewertung der Robustheit der Parameter der rückhaltenden Sicherheitsfunktionen daher exemplarisch auf zwei beispielhafte Einwirkungsereignisse beschränkt:

- „Gasbildung mit Druckerhöhung im Porenraum“ für den Zeitraum $t < 10.000$ a und
- „Kaltzeit mit 700 m Inlandeisüberdeckung und Rinnenbildung infolge Schmelzwassererosion“ für den Zeitraum $t > 10.000$ a.

Diese werden im Nachfolgenden kurz beschrieben:

Beispiel:

Gasbildung mit Druckerhöhung im Porenraum (Zeitraum $t < 10.000$ a)

Insbesondere in der frühen Phase nach Endlagerverschluss können hohe Gasbildungs-raten auftreten. Zur Begrenzung des Gasdruckes ist ein Gasfluss aufgrund höherer Permeabilität sowohl im Versatz als auch in der Auflockerungszone von sicherheitstechnischer Bedeutung.

Unterstellt wird eine Druckentwicklung von Fluiden (Gas, Lösung) im Porenraum des Versatzes und am Rand des ewG, die bei Druckerhöhung zu einer Reduzierung der Konvergenzraten des ewG und bei Überschreitung von Grenzwerten zur Ausbildung von Sekundärpermeabilitäten führt, Hydrofrac muss nicht unterstellt werden, selbst beim Hydrofracen kommt es nicht zu einer Erhöhung des Lösungstransportes.

Es erfolgt ein Druckaufbau im Porenraum des Versatzes und an den Konturen des Endlagerbergwerks zum ewG, der zu einer Reduzierung der Konvergenzraten des Tonsteins und bei Überschreitung von Grenzwerten zur Ausbildung von Sekundärpermeabilitäten führt.

Die zu erwartende Druckerhöhung aufgrund der Gasbildung (Raten und Volumen) ist derart, dass eine relevante Erhöhung der Permeabilität für Lösung nicht zu erwarten ist. Ebenso 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. Gegebenenfalls kann ein Druckniveau erreicht werden, bei dem 2-Phasenströmung einsetzt. Die druckbedingten Permeabilitätserhöhungen sind jedoch so gering, dass keine nennenswerten Transportbewegungen zu unterstellen sind. Bei

Überschreiten des Gaseindringdruckes bilden sich Sekundärpermeabilitäten aus, die den Gastransport auf Mikroklüften ermöglichen und so zum Druckabbau beitragen.

Dieses Ereignis stellt eine interne Einwirkung auf das Endlagersystem dar, wobei es durch Korrosion der im Endlagerbergwerk enthaltenen Metalle zur Gasentwicklung kommt. Das Einwirkungsereignis Gasentwicklung wird in der Szenarienentwicklung als wahrscheinliches Ereignis eingestuft.

Beispiel:

Kaltzeit mit 700 m Inlandeisüberdeckung und Rinnenbildung infolge Schmelzwassererosion (Zeitraum $t > 10.000$ a)

Als beispielhaftes Einwirkungsereignis für den Zeitraum $t < 10.000$ a wird der Prozess der Rinnenbildung infolge Schmelzwassererosion bei der Überfahrung der Standorte durch mehrere 100 m mächtige Inlandeisvorstöße zu Grunde gelegt. Dieses Ereignis hat unter den Kaltzeitereignissen die größte Tiefenwirkung.

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 Rinnenbildung erfolgt bevorzugt am Gletscherrand an der Grenze zwischen dilatantem und kompressiblem Bereich. Die Ausmaße der in der Elstereiszeit entstandenen Rinnen im Norddeutschen Raum schwanken in ihrer Breite von wenigen Metern bis einigen Kilometern und in ihrer Tiefe ebenfalls von einigen Metern bis einigen hundert Metern. Die maximalen Tiefenauswirkungen werden mit über 500 m angeführt. Offensichtlich ist die Ausbildung kaltzeitlicher Rinnen lediglich an die Lage der Gletscherspalten gebunden, ein Zusammenhang der Verbreitung und Tiefe von Erosionsrinnen einerseits und der Beschaffenheit des Gesteins (z. B. den Festigkeitseigenschaften) andererseits ist dagegen nicht deutlich zu erkennen.

Da sich keine sicheren Angaben über den genauen Verlauf und Teufe zukünftig angelegter Rinnen machen lassen, wurden im Rahmen des Vorhabens VerSi auch aus Gründen der Vergleichbarkeit der Ergebnisse der vorliegenden verbal-argumentativen Abwägungsmethodik einerseits und den Ergebnissen der vergleichenden Sicherheits-

analysen auf der Basis numerischer Rechnungen andererseits zu diesem Ereignis folgende Festlegungen getroffen:

1. Das Auftreten der (ersten) Kaltzeit erfolgt zu einem Zeitpunkt > 100.000 a
2. Die maximale Mächtigkeit der Inlandeisbedeckung des Standortes beträgt 700 m
3. Das Auftreten von Schmelzwassererosionsrinnen mit Tiefen < 250 wird als wahrscheinliches Ereignis angesehen
4. Das Auftreten von Schmelzwassererosionsrinnen mit Tiefen > 250 wird als weniger wahrscheinliches Ereignis angesehen
5. Die maximal mögliche Erosionstiefe beträgt 350 m

2. Bewertung von Prozessverständnis und der Auswirkungen aufgrund von internen und/oder externen Einwirkungen

Im nächsten Schritt wird für den betrachteten RSF-Parameter überprüft, ob sich die Einwirkungen aus Teilschritt 1 auf seinen Wert auswirken können. Ist dies der Fall, so ist die Intensität der Einwirkung auf den RSF-Parameter unter Berücksichtigung der am Standort vorliegenden schützenden Komponenten abzuschätzen. Weiterhin ist abzufragen, wie gut das Prozessverständnis zur Beurteilung der Veränderung des Parameterwertes ist. Beide Robustheitskriterien werden in Arbeitsschritt 5c gemeinsam wie folgt bewertet:

- Bei einer Reihe von RSF-Parametern einer Komponente kann a priori ausgeschlossen werden, dass überhaupt Einflüsse bestehen. In diesem Fall ist der Ausschluss von Auswirkungen fachlich zu begründen und es ist darzulegen, dass für diese Aussage ein ausreichendes Prozessverständnis besteht. Der Parameter wird folglich aufgrund der sehr geringen Auswirkungen bezüglich seiner Robustheit in die höchste Robustheitsklasse 5 eingestuft. (Beispiel: fehlender Einfluss der Inlandeisauflast auf die Sorptionsparameter des ewG).
- In Fällen, bei denen ein weniger gutes Prozessverständnis vorliegt, kann die Parameterreaktion auf äußere Einwirkungen teilweise nur schwer abgeschätzt werden. In diesen Fällen gibt dies den Ausschlag für eine geringere Einstufung der Parameterrobustheit (Beispiel: theoretisches Verständnis zum Kompaktionsverhalten von Salzgrus).
- Daneben tritt auch der Fall auf, dass sich ereignisbedingte Auswirkungen auf den Parameterwert aufgrund eines hohen Prozessverständnisses zwar sehr gut prognostizieren lassen, die Auswirkungen auf den Parameterwert jedoch potenziell zu einer deutlichen Verminderung der Radionuklidrückhaltung der

Komponente führen können. Damit liegen Hinweise auf eine entsprechend geringe Systemrobustheit vor. Auch in diesem Fall führt dies zu einer geringen Einstufung der Parameterrobustheit (Beispiel: Auswirkungen tiefer Schmelzwassererosionsrinnen auf den Parameter „Ausdehnung des Wirtsgesteins um das Endlagerbergwerk, für die die charakteristischen Eigenschaften der Sicherheitsfunktion des ewG gelten“).

Bei Ereignissen, die hinsichtlich ihres Auftretens in wahrscheinliche und weniger wahrscheinliche Fälle differenziert wurden, ist eine Fallunterscheidung durchzuführen (s. Beispiel unten).

3. Ordinale Bewertung

Im letzten Schritt erfolgt die ordinale Einstufung unter Einbeziehung der vorangegangenen verbal-argumentativen Bewertung auf einer ordinalen Rangskala von (1 bis 5) im Hinblick auf die Prognostizierbarkeit des RSF-Parameter und der einwirkungsbedingten Auswirkungen auf den RSF-Parameter.

Beispiel

ewG Salzstandort Gorleben

Parameter: „Ausdehnung des Wirtsgesteins um das Endlagerbergwerk, für die die charakteristischen Eigenschaften der Sicherheitsfunktion des ewG gelten“

Kaltzeit mit 700 m Inlandeisüberdeckung und Rinnenbildung infolge Schmelzwassererosion (Zeitraum $t > 10.000$ a)

Das Prozessverständnis ist hoch: Ab einer Rinnentiefe von mehr als 250 m reduziert sich bei jedem weiteren Meter Erosionstiefe die Ausdehnung des Wirtsgesteins oberhalb des ewG um 1 Meter.

Zur Beurteilung der Auswirkungen muss eine Fallunterscheidung hinsichtlich der Eintrittswahrscheinlichkeit und der Intensität des Ereignisses erfolgen:

Wahrscheinliches Ereignis: Rinnenbildung < 250 m Tiefe

Das Ereignis hat Einfluss auf die Ausdehnung des Wirtsgesteins um das Endlagerbergwerk. Aufgrund der schwankenden Mächtigkeit des Deckgebirges (im Mittel ca. 250 m)

wird die Mächtigkeit des Wirtsgesteins (Hauptsalz der Staßfurt-Folge) durch die Schmelzwassererosion lokal reduziert. Zusätzlich kommt es durch Subrosion zu einer weiteren Reduktion des Wirtsgesteins im Zehner Meter Bereich. Es verbleiben jedoch mindestens 400 m unbeeinflusstes Wirtsgestein im Hangenden des Endlagerbergwerks. Das für diese Aussage erforderliche Prozessverständnis wird als ausreichend hoch angesehen. Die Auswirkungen der Systementwicklungen werden als sehr gering eingestuft.

Einstufung der Auswirkungen der Systementwicklungen: 5

Weniger wahrscheinliches Ereignis: Rinnenbildung > 250 m Tiefe

Das Ereignis hat Einfluss auf die Ausdehnung des Wirtsgesteins um das Endlagerbergwerk. Ab einer Rinnentiefe von mehr als 250 m beginnt die Erosion des Wirtsgesteins. Zusätzlich kommt es durch Subrosion zu einer weiteren Reduktion des Wirtsgesteins im Zehner Meter Bereich. Bei der im Vorhaben VerSi vorgegebenen maximalen Rinnentiefe von 350 m werden weitere 100 m des Wirtsgesteines ausgeräumt, was jedoch insgesamt weniger als 25 % der Mächtigkeit des Wirtsgesteins oberhalb des Endlagerbergwerks entspricht. Das für diese Aussage erforderliche Prozessverständnis wird als ausreichend hoch angesehen. Die Auswirkungen der Systementwicklungen werden als gering eingestuft.

Einstufung der Auswirkungen der Systementwicklungen: 4

Wichtig ist, dass sich die Bewertungen in Arbeitsschritt 5c allein auf das Prozessverständnis und die einwirkungsbedingten Auswirkungen auf den betrachteten Parameter konzentrieren. Die Bewertung der Auswirkungen darf noch nicht mit Blick auf die Auslegungsanforderung erfolgen, diese Bewertung ist dem nachfolgenden Arbeitsschritt 5d vorbehalten. Beispiel: Die Auswirkung von Schmelzwassererosionsrinnen auf den Parameter „Ausdehnung des Wirtsgesteins um das Endlagerbergwerk, für die die charakteristischen Eigenschaften der Sicherheitsfunktion des ewG gelten,“ ist allein auf die Reduktion der Mächtigkeit des Wirtsgesteins (nicht der Mächtigkeit des ewG !) oberhalb des Endlagerbergwerks vorzunehmen. Wie die Auswirkungen auf den ewG, der eine Auslegungsgröße darstellt, zu beurteilen sind, wird erst in Arbeitsschritt 5d geprüft.

Ergebnis des Verfahrensschrittes 5c ist die begründete Bewertung des Prozessverständnisses zum RSF-Parameter und die Bewertung der Auswirkungen der Systementwicklungen auf einer ordinalen Bewertungsskala (1-5), jeweils für die beiden Zeiträume $t < 10.000$ a und $t > 10.000$ a.

11.4 Verfahrensschritt 5d: Ermittlung des Vertrauens in die Erfüllung der Auslegungsanforderungen an die RSF-Parameter über den Nachweiszeitraum (Gesamtrobustheit des RSF-Parameters)

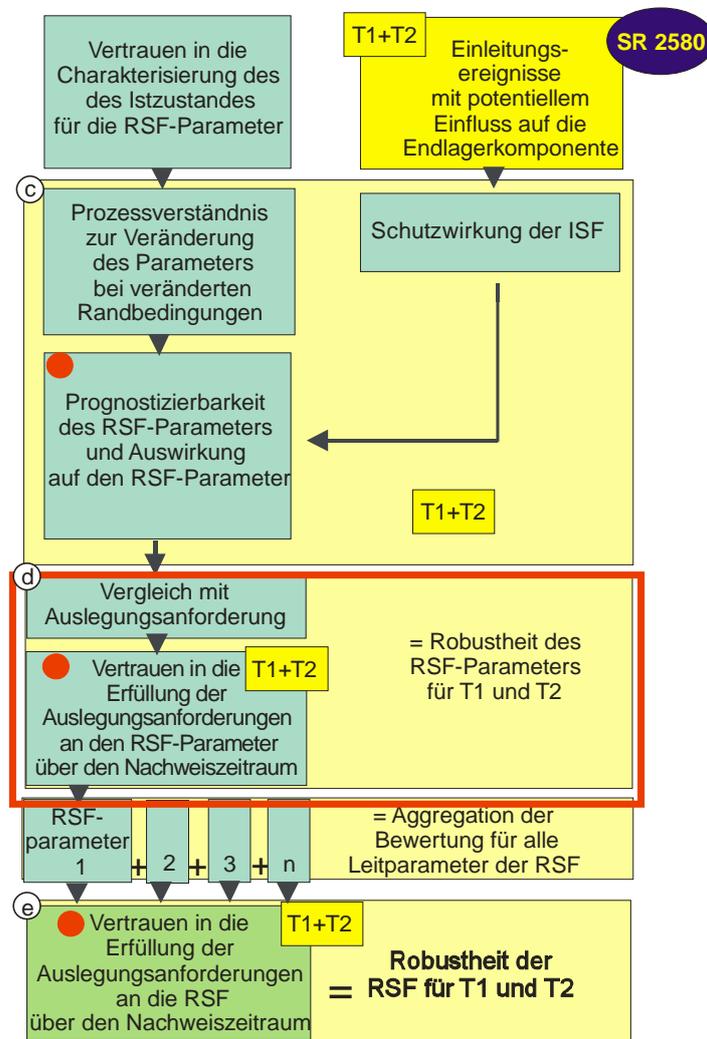


Abb. 16: Teilschritte zur Ermittlung des Vertrauens in die Erfüllung der Auslegungsanforderungen an die RSF-Parameter über den Nachweiszeitraum.

Im **Arbeitsschritt 5d** erfolgt die Gesamtbewertung der Robustheit des jeweils betrachteten RSF-Parameters, getrennt für die beiden Zeiträume $t < 10.000$ a und $t > 10.000$ a. Hierzu werden zunächst die Ergebnisse aus den Arbeitsschritten 5b und 5c aggregiert.

Im nächsten Teilschritt wird geprüft, in welchem Verhältnis die Lage der Parameterspannweite, die aus den oben angeführten Aspekten resultiert, zu den sicherheitskonzeptionell bedingten **Auslegungsanforderungen** steht. Schematisch wird dies in Abb. 17 verdeutlicht.

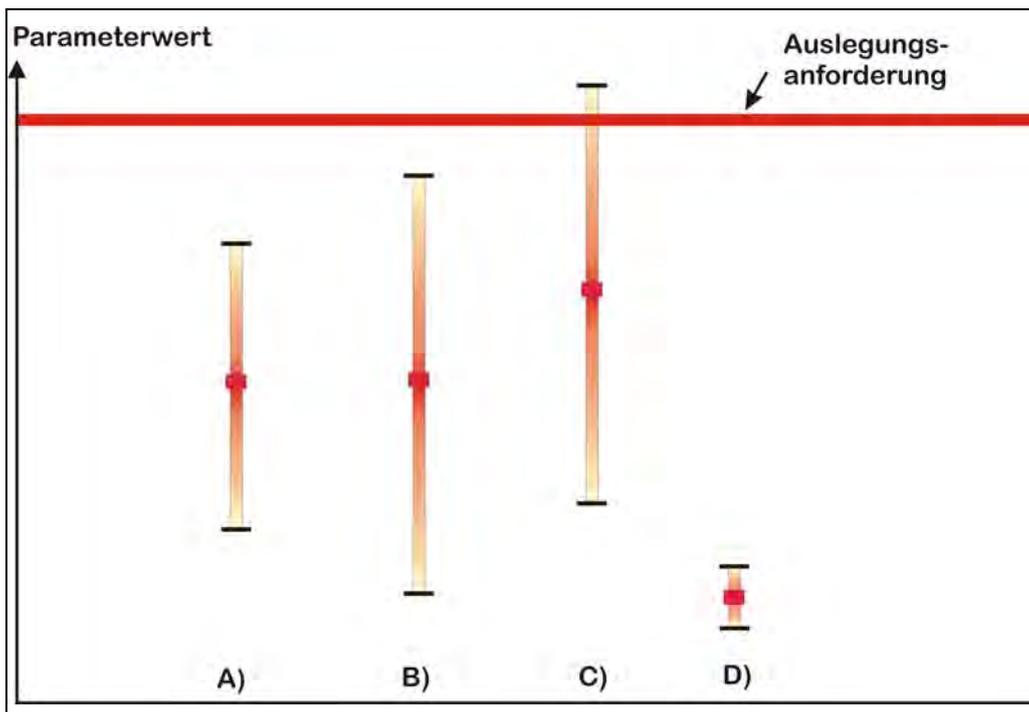


Abb. 17: Verhältnis Parameterwert und –spannweite zur Auslegungsmindestanforderung.

Die Parameterspannweite, die im Fall A) aus Unsicherheiten bei der **Charakterisierung** des Parameterwertes zum Ist-Zustand (Arbeitsschritt 5b) resultiert, weist selbst im oberen Extremwertbereich einen deutlichen Abstand zu dem Grenzparameterwert auf, der sich aus den Auslegungsanforderungen ergibt.

Diese Marge verkleinert sich, wenn zusätzlich Unsicherheiten bezüglich des **Prozessverständnisses** im Arbeitsschritt 5c mit in die Betrachtung einbezogen werden (Fall B).

Kommt es nun aufgrund geringer **Systemrobustheit** unter veränderter Randbedingung zu einer Veränderung des Parameterwertes zur „ungünstigen Seite“ hin, wird der Abstand zur Auslegungsanforderung abermals verkleinert oder führt wie im Fall C) im oberen Extremwertbereich zu einer Überschreitung des gemäß den Auslegungsanforderungen einzuhaltenden Parameterwertes. Bei einem realen Vergleich von Endlagersystemen sollte diese Situation zumindest für die Gruppe der wahrscheinlichen Szenarien auszuschließen sein. Für den Fall, dass trotz Einhaltung quantitativer Schutzziele die Auslegungsanforderungen nicht erfüllt werden, wäre zu hinterfragen, ob letztere nicht zu strikt festgesetzt wurden. Bei weniger wahrscheinlichen Szenarien wäre eine Verletzung der Auslegungsanforderungen für den Fall zulässig, dass die resultierenden Radionuklidfreisetzungen unterhalb der Schutzziele in /BMU 10/ für diese Szenariengruppe blieben. In jedem Fall wäre die betrachtete Parametergröße jedoch trotzdem als wenig robust einzustufen.

Den Idealfall stellt der Fall D) dar. Hierbei ist die unsicherheitsbedingte Parameter-spannweite äußerst gering. Selbst der obere Wertebereich liegt weit unterhalb des gemäß den Auslegungsanforderungen maximal zulässigen Parameterwertes.

Der Arbeitsschritt 5d gliedert sich in zwei Teilschritte:

1. Aggregation der Ergebnisse der vorangegangenen Robustheitsbewertungen

Im ersten Teilschritt werden sowohl die Auswirkungen von einwirkungsbedingten Einflüssen auf den Parameterwert (5c) als auch der Einfluss von Unsicherheiten bei Charakterisierbarkeit (5b) und dem Prozessverständnis (5c) auf die Parameterbandbreite in ihrer Gesamtheit berücksichtigt. Die Ergebnisse aus den Arbeitsschritten 5b und 5c werden dazu zunächst kurz wiederholt. Im Rahmen eines verbal-argumentativen Abwägungsprozesses werden diese Ergebnisse dann aggregiert. Soweit die Robustheitsbewertungen in den Arbeitsschritten 5b und 5c unterschiedlich ausgefallen sind, muss begründet werden, welche Robustheitsbewertung den Ausschlag für die aggregierte Bewertung gegeben hat. Im Regelfall gibt das Ergebnis mit der niedrigeren Robustheit den Ausschlag, in begründeten Einzelfällen kann jedoch davon abgewichen werden.

Beispiel:

Einschlusswirksamer Gebirgsbereich Tonsteinstandort

Parameter: Ausdehnung des Wirtsgesteins um das Endlagerbergwerk, für die die cha-

*rakteristischen Eigenschaften der Sicherheitsfunktion des ewG gelten
Zeitraum $t < 10.000$ a.*

*Ergebnis der Bewertungen zum Arbeitsschritt 5b war, dass das Vertrauen in die Charakterisierung der Ausdehnung des Wirtsgesteins für die die charakteristischen Eigenschaften der Sicherheitsfunktion des ewG gelten, für den Ist-Zustand insgesamt als hoch (Einstufung: 4) eingeschätzt werden kann. Auswirkungen des Beispielerignisses für den Zeitraum $t < 10.000$ a (Gasbildung mit Druckerhöhung im Porenraum) auf die Ausdehnung des Wirtsgesteins konnten sicher ausgeschlossen werden (Einstufung: 5). Hieraus ergibt sich zunächst eine aggregierte Einstufung, dass das Vertrauen in den Parameterwert angesichts der guten Charakterisierbarkeit und auszuschließenden ereignisbedingten Auswirkungen insgesamt als **hoch** (Einstufung: 4) angesehen wird. Ausschlaggebend hierfür sind die Bewertungen aus 5b.*

2. Vergleich mit den Auslegungsanforderungen

In diesem Teilschritt erfolgt die Spiegelung der aggregierten Ergebnisse aus den Teilschritten 5b und 5c an den Auslegungsanforderungen an die RSF-Parameter. Es wird überprüft, in welcher Relation die Parameterspannweiten (Resultat aus Unsicherheiten bei Charakterisierung und beim Prozessverständnis) unter Einbeziehung der Verschiebung der Parameterspannweite infolge der Auswirkungen von Einwirkungsereignissen zu den Auslegungskennzahlen (quantitativ) oder qualitativen Anforderungen, die sich aus dem zugehörigen Sicherheitskonzept ergeben, stehen.

Im Arbeitsschritt 5d wird auch den Eintrittswahrscheinlichkeiten von Einwirkungsereignissen Rechnung getragen. Bei Ereignissen, die in wahrscheinliche und weniger wahrscheinliche Fälle differenziert wurden, ist eine Fallunterscheidung durchzuführen (s. Beispiel weiter unten). Hierbei werden zunächst beide Wahrscheinlichkeitsgruppen getrennt bewertet. In einem nachfolgenden Schritt werden die Einzelergebnisse zu einer Gesamtbewertung der Parameterrobustheit aggregiert. Dabei ist zu berücksichtigen, dass Ereignisse, die seitens der Szenarienermittlung als weniger wahrscheinlich eingestuft wurden, mit einem entsprechend geringerem Gewicht bei der Bewertung des Vertrauens in die Einhaltung der Auslegungsanforderungen eingehen. Gleiches gilt, wenn ein und dasselbe Ereignis hinsichtlich der Intensität der Einwirkungen in wahrscheinliche und weniger wahrscheinliche Ausprägungen differenziert wurde.

Bei der praktischen Vorgehensweise ist zunächst die Auslegungsanforderung an den RSF-Parameter zu benennen. Danach ist zu überprüfen, ob angesichts der Parameter-spannweite und deren Verschiebung (Shift), die in den Schritten 5b und 5c zumindest qualitativ untersucht wurde, die Auslegungsanforderungen sicher eingehalten werden. Prinzipiell können dabei folgende Fälle auftreten:

1. Kann eine Auslegungsanforderung nicht erfüllt werden, so ist die betrachtete Parametergröße prinzipiell als wenig robust einzustufen (Einstufung in die ordinalen Rangklassen 1 oder 2). Dies gilt auch dann, wenn im ersten Teilschritt die aggregierte Bewertung der Ergebnisse aus den Arbeitsschritten 5b und 5c ein hohes Vertrauen in den Parameterwert ergeben hat (siehe nachfolgendes Beispiel im Fall von Erosionsrinnentiefen > 250 m).
2. Wird die Auslegungsanforderung eingehalten, so ist zu beurteilen, wieweit der Abstand (im Hinblick auf die Radionuklidrückhaltung) „ungünstigster“ Parameterwerte im oberen Extremwertbereich zu der Mindestanforderung an den Parameterwert stehen. Wenn selbst ungünstige Parameterwerte einen weiten Abstand zu dieser Mindestanforderung aufweisen, ist der Parameter aufgrund der hohen Sicherheitsreserve als (sehr) robust einzustufen (Einstufung in die Rangklassen 4 oder 5). Dies gilt selbst dann, wenn im ersten Teilschritt die aggregierte Bewertung der Ergebnisse aus den Arbeitsschritten 5c und 5d ein nur mäßiges Vertrauen in den Parameterwert ergeben hat (siehe nachfolgendes Beispiel im Fall von Erosionsrinnentiefen < 250 m).

Beispiel:

Einschlusswirksamer Gebirgsbereich Tonsteinstandort,

Parameter: Ausdehnung des Wirtsgesteins um das Endlagerbergwerk, für die charakteristischen Eigenschaften der Sicherheitsfunktion des ewG gelten

Zeitraum $t > 10.000$ a (Kaltzeit mit 700 m Inlandeisüberdeckung und Rinnenbildung infolge Schmelzwassererosion)

Ergebnis der Bewertungen zum Arbeitsschritt 5b war, dass das Vertrauen in die Charakterisierung der Ausdehnung des Wirtsgesteins für die die charakteristischen Eigenschaften der Sicherheitsfunktion des ewG gelten, für den Ist-Zustand insgesamt als hoch (Einstufung: 4) eingeschätzt werden kann. Bei der Beurteilung der Auswirkungen des Beispielerignisses für den Zeitraum $t > 10.000$ a (Kaltzeit mit 700 m Inlandeisüberdeckung und Rinnenbildung infolge Schmelzwassererosion) muss bezüglich der Eintritts-

wahrscheinlichkeit bestimmter Rinnentiefen folgende Fallunterscheidung durchgeführt werden:

A) Wahrscheinliches Ereignis Rinnentiefe <250 m:

Das Ereignis hat keinen Einfluss auf die Ausdehnung des Wirtsgesteins um das Endlagerbergwerk, für die die charakteristischen Eigenschaften der Sicherheitsfunktion gelten. Hintergrund ist, dass sich die erosive Wirkung der Rinnenbildung bei diesem Ereignis auf das Deckgebirge (ca. 250 m Mächtigkeit) beschränkt und das Wirtsgestein und damit auch der ewG hierdurch nicht betroffen sind. Die Auswirkungen der Systementwicklungen wurden im Arbeitsschritt 5c folglich als sehr gering eingestuft. Hieraus ergibt sich zunächst eine aggregierte Einstufung, dass das Vertrauen in den Parameterwert angesichts der guten Charakterisierbarkeit und auszuschließenden kaltzeitbedingten Auswirkungen insgesamt als **hoch** (Einstufung: 4) angesehen wird. Ausschlaggebend hierfür sind die Bewertungen aus 5b.

Zentrale Auslegungsanforderung an den Parameter ist, dass bei den gegebenen rückhaltenden Eigenschaften der anderen Parameter (Gebirgspermeabilität, Porendiffusionskoeffizienten, Sorptionsparameter) eine Mindestmächtigkeit des Wirtsgesteins oberhalb des Endlagerbergwerks von 130 m nicht unterschritten wird, damit das am oberen Rand des ewG zugrunde gelegte Geringfügigkeitskriterium eingehalten wird.

Unter Berücksichtigung der Sicherheitsreserve, die durch 60 m weiteres Wirtsgestein oberhalb des ewG gebildet wird, wird eingeschätzt, dass (trotz gewisser Unsicherheiten bei der Charakterisierung) die Auslegungsanforderung an die Ausdehnung des Wirtsgesteins für die die charakteristischen Eigenschaften der Sicherheitsfunktion des ewG gelten, mit sehr großer Sicherheit eingehalten werden können.

Dies führt zu einem sehr hohen Vertrauen, dass die Auslegungsanforderungen an die Ausdehnung des Wirtsgesteins für die die charakteristischen Eigenschaften der Sicherheitsfunktion des ewG gelten, für den Zeitraum $t > 10.000$ a bei Rinnentiefen < 250 m erfüllt werden und der Parameter als sehr robust angesehen werden kann.

Teil-Einstufung: 5

B) Weniger wahrscheinliches Ereignis Rinnentiefe >250 m:

Das Ereignis hat Einfluss auf die Ausdehnung des Wirtsgesteins um das Endlagerbergwerk, für die die charakteristischen Eigenschaften der Sicherheitsfunktion gelten. Ab einer Rinnentiefe von mehr als 250 m beginnt die Erosion des Wirtsgesteins. Bei der im Vorhaben VerSi vorgegebenen maximalen Rinnentiefe von 350 m werden im Bereich der Rinne das gesamte Deckgebirge und das oberhalb des ewG befindliche weitere Wirtsgestein ausgeräumt. Zusätzlich werden noch 40 m des zum ewG gehörigen Wirtsgesteins erodiert. Somit kann ab Rinnentiefen von 310 m (Oberkante des ewG) das für die Abschätzung des ewG verwendete Geringfügigkeitskriterium nicht mehr eingehalten werden. Aufgrund der vollständigen Erosion des weiteren Wirtsgesteins oberhalb des ewG stehen keinerlei weitere Sicherheitsreserven zur Verfügung.

Hieraus ergibt sich, dass das Vertrauen in die Einhaltung der Auslegungsanforderung an die Ausdehnung des Wirtsgesteins für die charakteristischen Eigenschaften der Sicherheitsfunktion des ewG gelten, im Fall von Rinnentiefen > 310 m sehr gering ist.

Teil-Einstufung: 1

C) Gesamttaggregation

Fasst man beide (extrem unterschiedliche) Bewertungen aus A) und B) zusammen, so ist zunächst zu berücksichtigen, dass die Erfüllung der Auslegungsanforderungen der wahrscheinliche und die Nichterfüllung der weniger wahrscheinliche Fall ist. Insofern fällt die Bewertung etwas positiver aus als bei der isolierten Betrachtung des Ereignisses unter B). Dennoch muss festgestellt werden, dass es insgesamt nicht sicher ist, ob die für eine Radionuklidrückhaltung erforderliche Ausdehnung des ewG über den gesamten Nachweiszeitraum erhalten bleibt. Aus diesem Grund kann keine positive Bewertung der Robustheit des Parameters „Ausdehnung des Wirtsgesteins für die charakteristischen Eigenschaften der Sicherheitsfunktion des ewG gelten“ vorgenommen werden.

Hieraus ergibt sich, dass das Vertrauen in die Einhaltung der Auslegungsanforderung an die Ausdehnung des Wirtsgesteins, für die die charakteristischen Eigenschaften der Sicherheitsfunktion des ewG gelten, trotz der guten Charakterisierbarkeit wegen der starken Auswirkungen im Fall der weniger wahrscheinlichen

Ausprägung des Ereignisses für den Zeitraum $t > 10.000$ a insgesamt als gering angesehen wird.

Einstufung der Gesamtrobustheit des RSF-Parameters für $t > 10.000$ a: 2

3. Wenn keine hohe Sicherheitsmarge zu den auslegungsbedingten Anforderungen besteht, jedoch deren Erfüllung sichergestellt ist, sollte bei der Parametergesamtbewertung normalerweise das Ergebnis des ersten Teilschritts, d. h. der aggregierten Bewertung der Ergebnisse aus den Arbeitsschritten 5b und 5c den Ausschlag geben.

Beispiel:

Einschlusswirksamer Gebirgsbereich Tonsteinstandort,

Parameter: Diffusivität

Zeitraum $t < 10.000$ a

Die generelle Anforderung an den ewG bezüglich der Diffusivität sind möglichst niedrige 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 Bestimmung der Mindestausdehnung des ewG. Für einen ewG mit einer Mächtigkeit oberhalb des Endlagerbergwerks von 130 m ergibt sich je nach dem am oberen Rand des ewG angesetzten Kriterium für die Radionuklidhaltung eine Anforderung an den Porendiffusionskoeffizient für nicht retardierende Anionen etwa in der Höhe $D_p < 1 \times 10^{-11} \text{ m/s}$. Die Diffusivität ist eine im Hinblick auf Ausdehnung des ewG extrem sensitive Größe. Zum Beispiel hat eine Erhöhung der Porendiffusionskoeffizienten um ca. eine halbe Größenordnung eine Erweiterung der Ausdehnung der erforderlichen Mindestmächtigkeit des ewG um das Endlager um mehrere 10 er m zur Folge.

Aufgrund dieser relativ hohen Anforderung an die Porendiffusionskoeffizienten wird der Abstand zwischen dem oberen Bereich der unsicherheitsbedingten Parameterwertspannweite und der bei gegebener ewG-Mächtigkeit erforderlichen Porendiffusionskoeffizienten als gering eingeschätzt. Aufgrund des geringen „Spielraums“ fallen somit die Unsicherheiten bei der Charakterisierbarkeit auf die Gesamtbewertung der Robustheit der Parametergröße stark ins Gewicht. Folglich wird eingeschätzt, dass die Auslegungsanforderung an die Diffusivität („nur“) mit großer Sicherheit eingehalten wird.

Dies führt zu einem hohen Vertrauen, dass die Auslegungsanforderungen an die Diffusivität für den Zeitraum $t < 10.000$ a erfüllt werden und der Parameter als robust angesehen werden kann.

Einstufung der Gesamtrobustheit des RSF-Parameters für $t < 10.000$ a: 4

Ergebnis des Verfahrensschrittes 5d ist die begründete Bewertung des Vertrauens, dass die Auslegungsanforderungen an den Parameter für den jeweiligen Betrachtungszeitraum $t < 10.000$ a bzw. $t > 10.000$ a erfüllt werden (dies entspricht der Gesamtbewertung der Robustheit des RSF-Parameters) auf einer ordinalen Bewertungsskala (1-5).

11.5 **Verfahrensschritt 5e: Ermittlung der Robustheit der rückhaltenden Sicherheitsfunktion (RSF)**

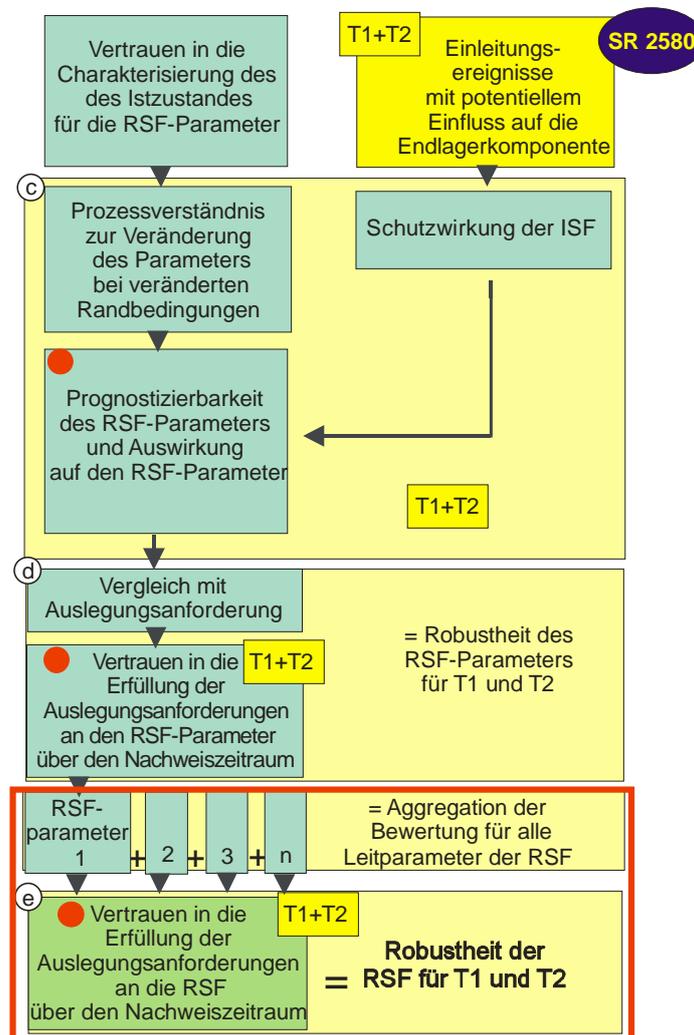


Abb. 18: Teilschritte zur Ermittlung der Robustheit der rückhaltenden Sicherheitsfunktion über den Nachweiszeitraum.

Im letzten Schritt, dem **Arbeitsschritt 5e** werden die Robustheitsbewertungen der die RSF charakterisierenden Parameter aus Schritt 5d in einer verbal-argumentativen Abwägung zur Robustheit der betrachteten rückhaltenden Sicherheitsfunktion aggregiert. Das Ergebnis ist die Robustheit einer rückhaltenden Sicherheitsfunktion einer Endlager-systemkomponente, ausgedrückt als „Vertrauen in die Wirksamkeit der rückhaltenden Sicherheitsfunktionen über den Nachweiszeitraum“, getrennt für die beiden Wirkungszeiträume $t < 10.000$ Jahre (instationäre Übergangsphase) und > 10.000 Jahre (stationäre Langzeitphase).

Aus Gründen der Übersichtlichkeit sollten zunächst die RSF-Parameter, die die rückhaltende Sicherheitsfunktion charakterisieren, aufgelistet und die Ergebnisse der Robustheitseinschätzungen aus Arbeitsschritt 5d rekapituliert werden. Danach erfolgt die Aggregation der Robustheitsbewertung der RSF-Parameter. Diesbezüglich können folgende Fälle unterschieden werden:

1. Weisen alle Parameter einen ähnlichen wichtigen Beitrag zur Erfüllung der Sicherheitsfunktion auf, weil die RSF-Parameter physikalisch gekoppelte Größen darstellen, kann aufgrund der engen Verflechtung von Abhängigkeiten per se keine Kompensation besserer oder schlechterer Parameterbewertungen erfolgen. Entscheidend für die Gesamtbewertung ist der Parameter, zu dem das geringste Vertrauen in die Erfüllung der Auslegungsanforderungen besteht.

Beispiel:

Ermittlung der Robustheit der RSF

„Begrenzung/Verhinderung von Lösungsbewegung und Radionuklidtransport“

Zugehörige Parameter sind:

- *Gebirgspermeabilität*
- *Porosität*
- *Diffusivität*
- *Ausdehnung des Wirtsgesteins um das Endlagerbergwerk, für die die charakteristischen Eigenschaften der Sicherheitsfunktion gelten*

Einschlusswirksamer Gebirgsbereich Tonstein:

Zeiträume < 10 000a

Die in Arbeitsschritt 5d durchgeführte Aggregation der Charakterisierbarkeit, des Einflusses von ereignisbedingten Auswirkungen ergab im Vergleich zu den Auslegungsanforderungen, dass für den Zeitraum < 10.000 Jahre bei den Parametern Gebirgspermeabilität, Porosität und Ausdehnung des Wirtsgesteins um das Endlagerbergwerk, für die die charakteristischen Eigenschaften der Sicherheitsfunktion gelten, ein sehr hohes Vertrauen in die Erfüllung der Auslegungsanforderungen über den Nachweiszeitraum besteht. Gegenüber dem Parameter Diffusivität wurde dieses Vertrauen als „hoch“ eingeschätzt.

Prinzipiell weisen alle Parameter einen ähnlichen wichtigen Beitrag zur Erfüllung der Sicherheitsfunktion auf, wobei Gebirgspermeabilität und Porosität physikalisch gekoppelte Größen darstellen. Gebirgspermeabilität, Porosität und Diffusivität stehen mit dem Parameter „Ausdehnung des Wirtsgesteins um das Endlagerbergwerk, für die die charakteristischen Eigenschaften der Sicherheitsfunktion gelten“ in gegenseitiger Abhängigkeit, da die Radionuklidrückhaltung im ewG sowohl von der Qualität der rückhaltenden Eigenschaften (hier: Gebirgspermeabilität, Porosität und Diffusivität) als auch von seiner Ausdehnung abhängt. So ist z.B. der Parameter „Ausdehnung des Wirtsgesteins um das Endlagerbergwerk, für die die charakteristischen Eigenschaften der Sicherheitsfunktion gelten“ insoweit mit der Diffusivität gekoppelt, als dass die Porendiffusionskoeffizienten maßgeblich die rechnerisch anhand eines definierten Geringfügigkeitskriteriums ermittelte Ausdehnung des ewG bestimmen. Aufgrund der engen Verflechtung von Abhängigkeiten ist eine Kompensation besserer oder schlechterer Bewertungen von Parametern nicht möglich. Entscheidend für die Gesamtbewertung ist vielmehr der Parameter, zu dem das geringste Vertrauen in die Erfüllung der Auslegungsanforderungen besteht. Somit ist die „geringere“ Bewertung für die Diffusivität entscheidend für die Bewertung der Gesamtrobustheit der Sicherheitsfunktion.

Die Gesamtrobustheit, ausgedrückt als Vertrauen in die Wirksamkeit der rückhaltenden Sicherheitsfunktionen „Begrenzung/Verzögerung von Lösungsbewegung und Radionuklidtransport“ im ewG über den Nachweiszeitraum, wird für den Wirkungszeitraum $t < 10.000$ Jahre (instationäre Übergangsphase) als hoch eingeschätzt.

Einstufung: Die RSF ist für den Zeitraum < 10.000 Jahre robust. Einstufung: 4

2. Weisen alle Parameter unterschiedlich wichtige Beiträge zur Erfüllung der Sicherheitsfunktion auf, so ist dies im Rahmen einer verbal-argumentativen Relevanzwichtung zu würdigen. Auch hier kann methodisch-bedingt keine Kompensation besserer oder schlechterer Parameterbewertungen erfolgen. Vielmehr müssen die Robustheitsbewertungen derjenigen Parameter, die einen höheren Beitrag an der Erfüllung der rückhaltenden Sicherheitsfunktion leisten, bei der Aggregation auf die Gesamtrobustheit der Sicherheitsfunktion dominant einfließen.
3. Einige Sicherheitsfunktionen werden nur durch einen RSF-Parameter charakterisiert. In diesem Fall erübrigt sich die oben thematisierte Abwägung. Für die Gesamtbewer-

tung der Robustheit der Sicherheitsfunktion wird die Robustheitsbewertung des Parameters aus Arbeitsschritt 5d übernommen.

Beispiel:

Ermittlung der Robustheit der RSF

„Verzögerung der Radionuklidausbreitung durch Sorption“

Versatz Tonstein:

Zeiträume <10 000a

Die in Arbeitsschritt 5d durchgeführte Aggregation der Charakterisierbarkeit, des Einflusses aufgrund des Einwirkungsereignisses Gasdruckentwicklung ergab im Vergleich zu den Auslegungsanforderungen, dass für den Zeitraum $t < 10.000$ Jahre bei dem Parameter „Sorptionseigenschaften“ ein hohes Vertrauen in die Erfüllung der Auslegungsanforderungen über den Nachweiszeitraum besteht.

Die Gesamtrobustheit, ausgedrückt als Vertrauen in die Wirksamkeit der rückhaltenden Sicherheitsfunktionen „Verzögerung der Radionuklidausbreitung durch Sorption“ im Bentonitversatz über den Nachweiszeitraum, wird für den Wirkungszeitraum $t < 10.000$ Jahre (instationäre Übergangsphase) dementsprechend als hoch eingeschätzt.

Einstufung: Die RSF ist für den Zeitraum < 10.000 Jahre robust. Einstufung: 4

Ergebnis des Verfahrensschrittes 5e ist die begründete Bewertung des Vertrauens in die Wirksamkeit der rückhaltenden Sicherheitsfunktionen als Maß für ihre Robustheit, getrennt für den jeweiligen Betrachtungszeitraum $t < 10.000$ a bzw. $t > 10.000$ a.

Mit dem Arbeitsschritt 5e ist die Robustheitsbewertung der rückhalten Sicherheitsfunktionen abgeschlossen. Im Regelfall liegen für jede RSF 4 Robustheitsbewertungen vor:

1. Robustheit der RSF für den Tonsteinstandort für den Wirkungszeitraum $t < 10.000$ a
2. Robustheit der RSF für den Tonsteinstandort für den Wirkungszeitraum $t > 10.000$ a

3. Robustheit der RSF für den Steinsalzstandort Gorleben für den Wirkungszeitraum $t < 10.000$ a
4. Robustheit der RSF für den Steinsalzstandort Gorleben für den Wirkungszeitraum $t > 10.000$ a

In einigen Fällen existiert eine Sicherheitsfunktion nur bei einem Endlagersystem (Beispiel: Die RSF „Verzögerung der Radionuklid­ausbreitung (im ewG) durch Sorption ist nur für den Tonsteinstandort relevant). In diesen Fällen liegen nur zwei Robustheitsbewertungen (eben für den Tonsteinstandort) vor.

Die Robustheitsbewertungen der RSF bilden zusammen mit den entsprechenden Relevanzwichtungen aus Verfahrensschritt 3 die Grundlage für die Ermittlung der Gesamtrobustheit der Endlagersysteme in den letzten Verfahrensschritten 6 und 7.

12 **Verfahrensschritt 6: Korrelation Relevanz-Robustheit**

Ziel des Verfahrensschrittes 6 ist es, für den Vergleich der Gesamtrobustheit der Endlagersysteme systematisch Hinweise auf mögliche „Robustheitsschwächen“ bei den jeweiligen rückhaltenden Sicherheitsfunktionen zu identifizieren (Negativselektion). Hierzu werden die Ergebnisse des Verfahrensschrittes 3 (Relevanzwichtung der rückhaltenden Sicherheitsfunktionen, Kap. 9) und des Verfahrensschrittes 5 (Robustheit der rückhaltenden Sicherheitsfunktionen Kap. 11) zueinander in Beziehung gesetzt. Bei Verfahrensschritt 6 geht es allerdings noch nicht um eine „Endbewertung“ der Endlagersysteme, sondern zunächst darum, Anhaltspunkte für relevanzgewichtete Robustheitsdefizite, die im Verfahrensschritt 7 genauer analysiert werden, zu gewinnen.

Methodisch werden zunächst die Ergebnisse der Relevanzwichtung den Robustheitsbewertungen für jede RSF, jedes Einwirkungsereignis und für beide Wirkungszeiträume (zweckmäßigerweise in tabellarischer Form) einander gegenübergestellt (s. Abb. 19).

Im nächsten Schritt erfolgt die Korrelation zwischen Relevanz und Robustheit. Im Grundsatz wird dabei von folgendem Grundsatz ausgegangen: Bei einem idealen Endlagersystem weisen alle rückhaltenden Sicherheitsfunktionen eine **bezogen auf ihre Relevanz angemessene Robustheit** auf. Das Endlagersystem ist in diesem Fall „unauffällig“ und weist keine Robustheitsdefizite auf. Im Einzelnen bedeutet dies folgendes:

- Bei einer rückhaltenden Sicherheitsfunktion, die als sehr relevant (Einstufung 5, d. h. als unverzichtbar im Sinne der Ausführungen zu Verfahrensschritt 3, s. Kap. 9) eingestuft wurde, bestehen entsprechend hohe Erwartungen an die Robustheit. Diese gelten dann als erfüllt, wenn die Bewertung der Sicherheitsfunktion in Arbeitsschritt 5e mindestens zu einer ordinalen Einstufung als „robust“ (Einstufung: 4) geführt hat. Ein Unterschied in der Bewertung Relevanz-Robustheit von lediglich einer ordinalen Klassenstufe wird wegen subjektiver Unsicherheiten bei den Einstufungen von Relevanz und Robustheit in den vorangegangenen Arbeitsschritten als nicht signifikant angesehen. Dies bedeutet: Bei rückhaltenden Sicherheitsfunktionen, die als „sehr relevant“ eingestuft wurden, macht es für den Vergleich keinen Unterschied, ob eine Einstufung in Form einer „sehr hohen Robustheit“ (Einstufung 5) oder „nur“ einer „hohen Robustheit“ (Einstufung 4) vorliegt. Geringere Einstufungen der Robustheit der RSF (Einstufungen < 4) geben dagegen einen Hinweis auf mögliche Robustheitsschwächen des Endlagersystems, denen im Verfahrensschritt 7 gezielt nachgegangen wird.

Entsprechendes gilt für rückhaltende Sicherheitsfunktionen deren Relevanz geringer als 5 eingestuft wurden. Auch hier gilt die Erwartung einer bezüglich der Relevanz angemessenen Robustheitseinstufung. Der Zusammenhang zwischen Relevanzeinstufung und dem Erwartungswert der Robustheit wird in folgender Tabelle verdeutlicht.

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

Abb. 19: Matrix zur Ableitung von Robustheitsdefiziten (rote Zahlen) einer Sicherheitsfunktion aus ihrer Relevanz und der Einordnung ihrer Robustheit

Robustheitseinstufungen von rückhaltenden Sicherheitsfunktionen, die **höher** als die erwartete Mindesteinstufung liegen, führen zu **keinem** „Robustheitsgewinn“ des betrachteten Endlagersystems. Die Gesamtrobustheit eines Endlagersystems wird also nicht dadurch gesteigert, dass bei einer rückhaltenden Sicherheitsfunktion mittlerer Relevanz eine sehr hohe Robustheit konstatiert wurde. Es findet somit im Einklang mit vergleichstheoretischen Anforderungen keinerlei Verrechnung (Kompensation) zwischen Robustheitsbewertungen, die über der erwarteten Mindesteinstufung liegen, mit Robustheitseinstufungen, die darunter liegen, statt.

Um im Rahmen des Verfahrensschrittes 6 mathematische Operationen z. B. mit Hilfe von Tabellenkalkulationsprogrammen zu ermöglichen, sollten bei der Einstufung von Relevanz und Robustheit auch diejenigen Sicherheitsfunktionen, die bei einem der beiden Endlagersystemen sicherheitskonzeptionell keine Rolle spielen (z. B. die RSF „Verzögerung der Radionuklid­ausbreitung durch Sorption“ im Salzgrusversatz Gorleben) oder in einem der betrachteten Wirkungszeiträume nicht relevant sind (z. B. die RSF „Begrenzung/Verhinderung des Lösungszutritts zum Abfallprodukt infolge Dichtwirkung der Behälterwandungen“ im Zeitraum $t > 10.000$ a) formal eine ordinale Rangklasse von 1 zugeordnet werden. Dies empfiehlt sich insbesondere dann, wenn eine Vielzahl von Sicherheitsfunktionen bewertet wurde und/oder eine große Anzahl von Szenarien in die Bewertung einbezogen wurde. Im vorliegenden Fall wurde die ordinale Rangklasse der Robustheitsbewertung einer RSF von der entsprechenden ordinalen Rangklasse der Relevanz subtrahiert. Differenzen < -1 werden als Indikatoren für, im Weiteren genauer zu analysierende Robustheitsdefizite eines Endlagersystems gewertet.

Prinzipiell können im Arbeitsschritt 6 die Robustheitsbewertungen für die beiden Wirkungszeiträume $t < 10.000$ a und $t > 10.000$ a aggregiert werden. Sollte bei einem der beiden Wirkungszeiträume ein Robustheitsdefizit identifiziert worden sein, so ist dies für den gesamten Nachweiszeitraum ausschlaggebend. So sollte beispielsweise eine Sicherheitsfunktion, die für beide Wirkungszeiträume als relevant eingestuft wurde, auch für beide Zeiträume eine ihrer Relevanz entsprechend hohe Robustheitsbewertung aufweisen, um im Rahmen des Endlagersystemvergleichs „robustheitsmäßig unauffällig“ zu gelten. Eine derartige Aggregation kann beispielsweise aus Gründen der Übersichtlichkeit sinnvoll sein, wenn der Robustheitsbewertung eine Vielzahl an Szenarien zugrunde gelegt wurde. Eine frühe Aggregation z. B. im vorangegangenen Verfahrensschritt 5 ist dagegen nicht zu empfehlen, da in diesem Fall Informationen, die möglicherweise bei der Ergebnisanalyse in Verfahrensschritt 7 erheblich sind, durch Aggregation verloren gehen.

In Arbeitsschritt 6 findet keine Berücksichtigung ggf. redundanter rückhaltenden Sicherheitsfunktionen statt. Sicherheitsfunktionen werden dann als redundant bezeichnet, wenn bei vollständigem Ausfall einer der beiden Sicherheitsfunktionen die andere (komplementäre) Sicherheitsfunktion die sicherheitsgerichtete Wirkung (Radionuklidrückhaltung) des ausgefallenen Pendants innerhalb des jeweiligen Betrachtungszeitraums ($t < 10.000$ a und $t > 10.000$ a) *vollständig* übernehmen kann. Hintergrund ist, dass diesem Aspekt bereits bei der Relevanzwichtung in Verfahrensschritt 3 Rechnung getragen wurde (s. Kap. 9.2). Eine erneute Würdigung im Rahmen der Korrelation zwischen den

Bewertungen zu Relevanz und Robustheit einer rückhaltenden Sicherheitsfunktion in Verfahrensschritt 6 ist daher methodisch nicht zulässig.

Komponente A RSF-Nr.	Relevanz der Sicherheitsfunktion				Auswertung Differenz der ordinalen Rangzahlen: Robustheit - Relevanz Ergebnisse < -1 sind ein Hinweis auf wenig robuste Komponenten											
					Ereignis 1				Ereignis 2				Ereignis 3			
					ELA 1	ELA 2	ELA 1	ELA 2	ELA 1	ELA 2	ELA 1	ELA 2	ELA 1	ELA 2	ELA 1	ELA 2
					< 10 ka		> 10 ka		< 10 ka		> 10 ka		< 10 ka		> 10 ka	
RSF 1	1	1	5	5								-2				
RSF 2	1	n	5	4												
RSF 3	5	5	5	5								-2				
RSF 4	1	1	5	5				-2				-2				-2
RSF ..	4	4	4	4												
RSF n	4	4	4	4								-2				

Abb. 20: Schematische Darstellung einer Relevanz-Robustheitskorrelation mit Hinweisen auf systematische Robustheitsdefizite

Bei der tabellarischen Identifikation potenzieller Robustheitsschwächen können ggf. bestimmte „Muster“ auftreten, die (soweit nicht innerhalb des Verfahrensschrittes 5 bereits identifiziert) Hinweise auf systematische Robustheitsdefizite einer rückhaltenden Sicherheitsfunktion geben können. Das in Abb. 20 illustrierte Beispiel könnte folgendermaßen interpretiert werden:

1. Bei RSF 4 weist das Endlagersystem 2 eine durchgängige Robustheitsschwäche für den Zeitraum $t > 10.000$ a auf, die unabhängig von dem betrachteten Einwirkungsereignis ist. Es ist vorstellbar, dass in diesem Fall generelle Defizite im Prozessverständnis zu wesentlichen, die RSF 4 charakterisierenden Parametern bzw. sicherheitsgerichteten Prozessen zu diesem Ergebnis geführt haben.

2. *Im Fall des Einwirkungsereignisses 2 weist das Endlagersystem 2 durchgängig eine potentielle Robustheitsschwäche für den Zeitraum $t > 10.000$ a auf. Möglicherweise wurde das entsprechende Einwirkungsereignis nicht bei der Aufstellung des Sicherheitskonzeptes berücksichtigt, so dass die Schutzwirkung der zugehörigen integritätsbewahrenden Sicherheitsfunktionen zu schwach ausfällt.*

Die oben angeführten Muster von Robustheitsschwächen traten bei der beispielhaften Anwendung der verbal-argumentativen Abwägungsmethodik bei den innerhalb des Vorhabens VerSi zu vergleichenden Endlagersystemen allerdings nicht auf.

Im vorliegenden Fall der beispielhaften Anwendung der verbal-argumentativen Abwägungsmethodik wurden auf der Grundlage der Bewertungen in den Verfahrensschritten 3 und 5 potentielle Robustheitsdefizite bei folgenden rückhaltenden Sicherheitsfunktionen identifiziert (s. Anhang 5):

- **RSF Nr. 19:** „Begrenzung/Verhinderung von Lösungsbewegung und Radionuklidtransport“ im **Streckenversatz der Einlagerungsbereiche** des **Steinsalzstandortes** Gorleben für den Wirkungszeitraum $t > 10.000$ a
- **RSF Nr. 26:** „Begrenzung/Verhinderung von Lösungsbewegung und Radionuklidtransport“ **Abdämmungen zu den Einlagerungsbereichen** des **Steinsalzstandortes** Gorleben für den Wirkungszeitraum $t < 10.000$ a
- **RSF Nr. 31:** „Begrenzung/Verhinderung von Lösungsbewegung und Radionuklidtransport“ im **Streckenversatz der Restgrube** des **Steinsalzstandortes** Gorleben für den Wirkungszeitraum $t > 10.000$ a
- **RSF Nr. 41:** „Begrenzung/Verhinderung von Lösungsbewegung und Radionuklidtransport“, **Schachtverschlüsse und Streckenabdichtungen** des **Steinsalzstandortes** Gorleben für den Wirkungszeitraum $t < 10.000$ a
- **RSF Nr. 49:** „Begrenzung/Verhinderung von Lösungsbewegung und Radionuklidtransport“ im ewG des **Tonsteinstandortes** für den Wirkungszeitraum $t > 10.000$ a

Diese potentiellen Robustheitsdefizite werden in Verfahrensschritt 7 weiter analysiert.

13 Verfahrensschritt 7: Ergebnisanalyse

Ziel des letzten Verfahrensschrittes ist die Bewertung der im vorangegangenen Verfahrensschritt zunächst formal identifizierten Robustheitsdefizite. Der Begriff Robustheitsdefizit ist dabei als Abweichung des betrachteten Systems von einem Endlagersystem mit idealer Robustheit zu verstehen. Es erfolgt eine Analyse, welche Einzelaspekte zu einer (bezogen auf ihre Relevanz) kritischen Robustheitseinschätzung beigetragen haben. Weiterhin werden die Auswirkungen der Robustheitsdefizite auf die generelle Anforderung an die Endlagersysteme, den Radionuklideinschluss zu bewirken, sowie die Ursachen der Robustheitsdefizite im Hinblick auf ihre Behebbarkeit untersucht.

Im Verfahrensschritt 7 wird keine Kompensation der identifizierten Robustheitsschwächen im Sinne einer Verrechnung vorgenommen. Dies bedeutet, dass es beispielsweise nicht zielführend ist, dasjenige Endlager als Favorit herauszustellen, welches weniger Robustheitsdefizite als das andere aufweist. Auch ist es vergleichsunerheblich, ob die in Kap. 12 ermittelten Differenzen (Robustheit-Relevanz) bei -2 oder niedriger liegen. Endziel des verbal-argumentativen Abwägungsverfahrens ist es dem Entscheider die Ergebnisse des Abwägungsverfahrens soweit in einer vergleichsweise einfachen Form aufbereitet und interpretiert zur Verfügung zu stellen, dass er seine Endabwägung einbringen und eine begründete Entscheidung treffen kann.

Es ist dabei nicht zu besorgen, dass sich der Entscheider im späteren operativen Standortvergleich einer unüberschaubaren Anzahl von gegeneinander abzuwägenden Robustheitsdefiziten gegenüber sieht. Im Fall der hier beispielhaft durchgeführten Robustheitsbewertung traten zwar bei immerhin 5 Sicherheitsfunktionen Robustheitsdefizite auf, es ist jedoch zu erwarten, dass sich in einem späteren operativen Auswahlverfahren eine geringere und in jedem Fall überschaubare Anzahl an Robustheitsdefiziten ergeben wird. Hintergrund ist, dass wenn unterstellt werden muss, dass beide Endlagersysteme prinzipiell genehmigungsfähig sind (siehe diesbezügliche Ausführungen in Kap. 4), die Anzahl an Sicherheitsfunktionen mit Robustheitsdefiziten zumindest nicht höher ausfällt, als im vorliegenden Fall.

13.1 Vorgehensweise

Die Ergebnisanalyse im Verfahrensschritt 7 gliedert sich in 4 Teilschritte. Die Durchführung dieser Teilschritte wird im Nachfolgenden am Beispiel des ewG des Tonsteines il-

lustriert. Die Bewertung der Kompartimente für den Salzstandort Gorleben, bei denen Robustheitsdefizite identifiziert wurden, sind in Anhang 6 enthalten.

1. Reflektion der durchgeführten Robustheitsbewertungen

Zunächst werden die Einschätzungen zur Robustheit, die formal zur Identifikation eines potentiellen Robustheitsdefizits einer Sicherheitsfunktion (Kap. 12) geführt haben, rekapituliert. Insbesondere die Begründung, in dem Teilarbeitsschritt im Verfahrensschritt 5, wo eine geringe Robustheitsbewertung erfolgt ist, die letztlich zum oben genannten Ergebnis geführt hat, sollte zusammenfassend dargestellt werden.

Beispiel: Einschlusswirksamer Gebirgsbereich des Tonsteinstandortes

Zu der Endlagersystemkomponente einschlusswirksamer Gebirgsbereich wurde für den Tonsteinstandort für den Zeitraum > 10.000 Jahre ein Robustheitsdefizit bei folgender Sicherheitsfunktion identifiziert:

RSF Nr. 49: „Begrenzung/Verhinderung von Lösungsbewegung und Radionuklidtransport“ **im ewG des Tonsteinstandortes** für den Wirkungszeitraum $t > 10.000 \text{ a}$

Im Hinblick auf die beispielhafte Robustheitseinschätzung entlang der Methodik des Verfahrensschrittes 5 wird auf den ausführlichen Begleitbericht /GRS 10j/ (Bewertung der charakteristischen Parameter der rückhaltenden Sicherheitsfunktionen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs) verwiesen. Die geringe Robustheitseinschätzung, die bei der oben genannten Sicherheitsfunktion letztlich zur Identifikation eines Robustheitsdefizites führte, betraf den RSF-Parameter:

„Ausdehnung des Wirtsgesteins um das Endlagerbergwerk, für die charakteristische Eigenschaften der Sicherheitsfunktion des ewG gelten“

Durch diesen Parameter wird ausgedrückt, dass bei einem geeigneten Wirtsgestein günstige physikalische (und im Hinblick auf die Sorption geochemische) Eigenschaften auch in einem Bereich vorliegen, dessen Abmessungen für die geforderte Radionuklidrückhaltung ausreichen. Wie bereits in Kap. 10 erwähnt, sollte als Wirtsgestein eine solche geologische Formation oder ggf. nur ein Teil davon gewählt werden, wo geeignete, möglichst homogene Materialeigenschaften derart vorliegen, dass der ewG hierin sicher positioniert werden kann. Das Wirtsgestein sollte durch ausreichend großes Volumen mit Materialeigenschaften, die innerhalb des ewG gefordert werden, charakterisiert

sein. Diese Anforderung wird durch den oben angeführten Parameter adäquat ausgedrückt.

Das Robustheitsdefizit wurde bei der oben genannten rückhaltenden Sicherheitsfunktion für den Zeitraum $t > 10.000$ a im Zusammenhang mit dem für diesen Zeitraum beispielhaft angesetzten Einwirkungsereignis „Kaltzeit mit 700 m Inlandeisüberdeckung und Rinnenbildung infolge Schmelzwassererosion“ identifiziert.

Für die im Vorhaben VerSi als weniger wahrscheinliches Ereignis festgelegte Ausprägung von Rinnentiefen > 250 bis 350 m wurde in Arbeitsschritt 5d für den Tonsteinstandort eine sehr geringe Robustheit (Einstufung: 1) konstatiert. Dies wurde mit Blick auf die Auswirkungen des Ereignisses folgendermaßen begründet: „Ab einer Rinnentiefe von mehr als 250 m beginnt die Erosion des Wirtsgesteins. Bei der im Vorhaben VerSi vorgegebenen maximalen Rinnentiefe von 350 m werden im Bereich der Rinne das gesamte Deckgebirge und das oberhalb des ewG befindliche weitere Wirtsgestein ausgeräumt. Zusätzlich werden noch 40 m des zum ewG gehörigen Wirtsgesteins erodiert. Aufgrund der vollständigen Erosion des weiteren Wirtsgesteins oberhalb des ewG stehen keinerlei weitere Sicherheitsreserven zur Verfügung.“

Die Unsicherheiten seitens des Prozessverständnisses sind in diesem Fall gering: Ab einer Rinnentiefe von mehr als 250 m reduziert sich bei jedem weiteren Meter Erosionstiefe die Ausdehnung des Wirtsgesteins oberhalb des Endlagerbergwerks um 1 Meter. Ab einer Rinnentiefe von mehr als 310 m reduziert sich bei jedem weiteren Meter Erosionstiefe die Ausdehnung des ewG oberhalb des Endlagerbergwerks um 1 Meter.

Somit kann ab Rinnentiefen von 310 m (Oberkannte des ewG) das für die Abschätzung der Mächtigkeit des ewG im Rahmen der Methodenentwicklung verwendete Geringfügigkeitskriterium nicht mehr eingehalten werden. Ausschlaggebend für die überschlägige Ermittlung der Mindestausdehnung des ewG war die Bedingung, dass an seinem oberen Rand die Konzentration eines idealen, nicht sorbierenden Tracers (stellvertretend für nicht oder nur schwach sorbierende Radionuklide) nach 1 Mio. a maximal das 10^{-6} der Ausgangskonzentration im Einlagerungsbereich des Endlagers beträgt.

Angesichts der Tatsache, dass einerseits das Ereignis bei Rinnentiefen > 250 m gemäß den Vorgaben im Vorhaben VerSi eine weniger wahrscheinliche Entwicklung darstellt und andererseits die Robustheitsbewertung für „wahrscheinliche“ Rinnentiefen bis 250 m sehr positiv ausfiel (Einstufung: 5) wurde bei der Aggregation der Robustheitsbewertung

beider Fälle eine etwas höhere Gesamteinstufung (Einstufung: 2) für den betreffenden RSF-Parameter vorgenommen. So war zu berücksichtigen, dass die Einhaltung der Auslegungsanforderungen (Einhaltung einer Mindestmächtigkeit des ewG oberhalb des Endlagerbergwerks von 130 m) der wahrscheinliche und die Nichteinhaltung (Rinntiefen > 310 m) der weniger wahrscheinliche Fall ist.

Insgesamt wurde jedoch festgestellt, dass es nicht sicher ist, ob die für eine Radionuklidrückhaltung - gemäß dem oben genannten Kriterium - erforderliche Ausdehnung des ewG über den gesamten Nachweiszeitraum erhalten bleibt. Aus diesem Grund konnte in der Summe keine positive Bewertung der Robustheit des Parameters „Ausdehnung des Wirtsgesteins für die charakteristischen Eigenschaften der Sicherheitsfunktion des ewG gelten“ und ebenso wenig nach der Aggregation der RSF-Parameter zur oben genannten Sicherheitsfunktion erfolgen.

2. Fachliche Diskussion der Problemstellung

Im nächsten Teilschritt werden die fachlichen Hintergründe, die zur Bewertung des Robustheitsdefizites im Verfahrensschritt 5 herangezogen wurden, diskutiert. Ziel ist es, eine Würdigung des aktuellen Standes von Wissenschaft und Technik im Hinblick auf Möglichkeiten zur Korrektur des jeweiligen Robustheitsdefizits im Teilschritt 4 vorzunehmen.

Beispiel: Einschlusswirksamer Gebirgsbereich des Tonsteinstandortes

Zur Bedeutung kaltzeitlicher Rinnensysteme für die Langzeitsicherheit von möglichen Endlagern in Norddeutschland wurde von der BGR Mitte des Jahres 2009 ein Bericht herausgegeben /BGR 09/. Rinnensysteme entstehen durch den Abfluss großer Schmelzwassermengen im Zuge von Inlandeisvergletscherung. Hinsichtlich der Entstehungsmechanismen lassen sich 2 Typen von glazigenen Rinnenbildungen unterscheiden:

a) Eisrandnahe Rinnenbildungen

Diese Rinnensysteme stehen im Zusammenhang mit Eisstauseen, die vor dem Rand der Inlandeisgletscher gelegen sind. Letztere bilden eine Abflusssperre gegenüber Flüssen deren Fließrichtung nach Norden gerichtet ist. Nach /BGR 09/ entstehen diese Rinnen aufgrund tiefgründiger Erosion des Untergrundes nach katastrophalen plötzlichen

Abflüssen großer Wassermassen, infolge des Bruchs von Stauriegeln. Die Ausdehnung dieser Rinnensysteme hat die Dimension von Flusstälern, die Erosionstiefe liegt im 10er Meter-Bereich.

b) Subglaziale Rinnenbildungen

Weitaus größere Tiefenwirkung erreichen subglaziale Rinnensysteme, die aus dem mehreren 100 m tiefen Absturz von Schmelzwassermassen durch große Gletscherspalten resultieren. Die elsterkaltzeitlichen Rinnenbildungen erreichten Dimensionen von bis zu 500 m Tiefe, Längen von bis zu über 100 km und Breiten von mehreren Kilometern /BGR 09/. Sie treten ausschließlich nördlich der vereinfachten heutigen 0m-Isolinie der Quartärbasis auf (vgl. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Bevorzugte Regionen für Rinnenbildungen sind nicht zu erkennen, dennoch haben sie einen relativ einheitlichen Verlauf (NNE-SSW im westlichen und NE-SW im östlichen Norddeutschland). Vergleichbar ausgedehnte und tiefe Rinnensysteme wurden in der nachfolgenden Saale-Kaltzeit und der Weichsel-Kaltzeit in Norddeutschland nicht gebildet, sondern sind nur aus Skandinavien, Polen und dem Baltikum bekannt.

Die Erosionstiefe von subglazialen Rinnen hängt von der Schmelzwassermenge, dem hydrostatischen Druck sowie der Art und Härte des Untergrundes ab. Generell gilt: Je weicher und permeabler die Schichten unterhalb des Inlandeises sind umso stärker ist die Ausbildung der Erosion durch Schmelzwässer. Die erosive Wirkung von subglazialen Rinnensystemen wird dabei (im Gegensatz zu den eisrandnahen Rinnensystemen) auch dadurch verstärkt, dass der Untergrund unterhalb des Inlandeises frei von Permafrost ist.

Generell gilt, dass tiefe Erosionsrinnen bei Tonsteinstandorten vor allem dann auftreten, wenn das Deckgebirge oberhalb des Wirtsgesteins aus unkonsolidierten Quartär- und Tertiärsedimenten bzw. weichen oberkretazischen Mergeln oder Schreibkreiden besteht. Umgekehrt wird in /BGR 09/ davon ausgegangen, dass härtere und geringer permeable kalkige Partien der Oberkreide die unterlagernden tonigen Wirtsgesteine bis zu einem gewissen Grad vor subglazialer Rinnenerosion zu schützen vermögen.

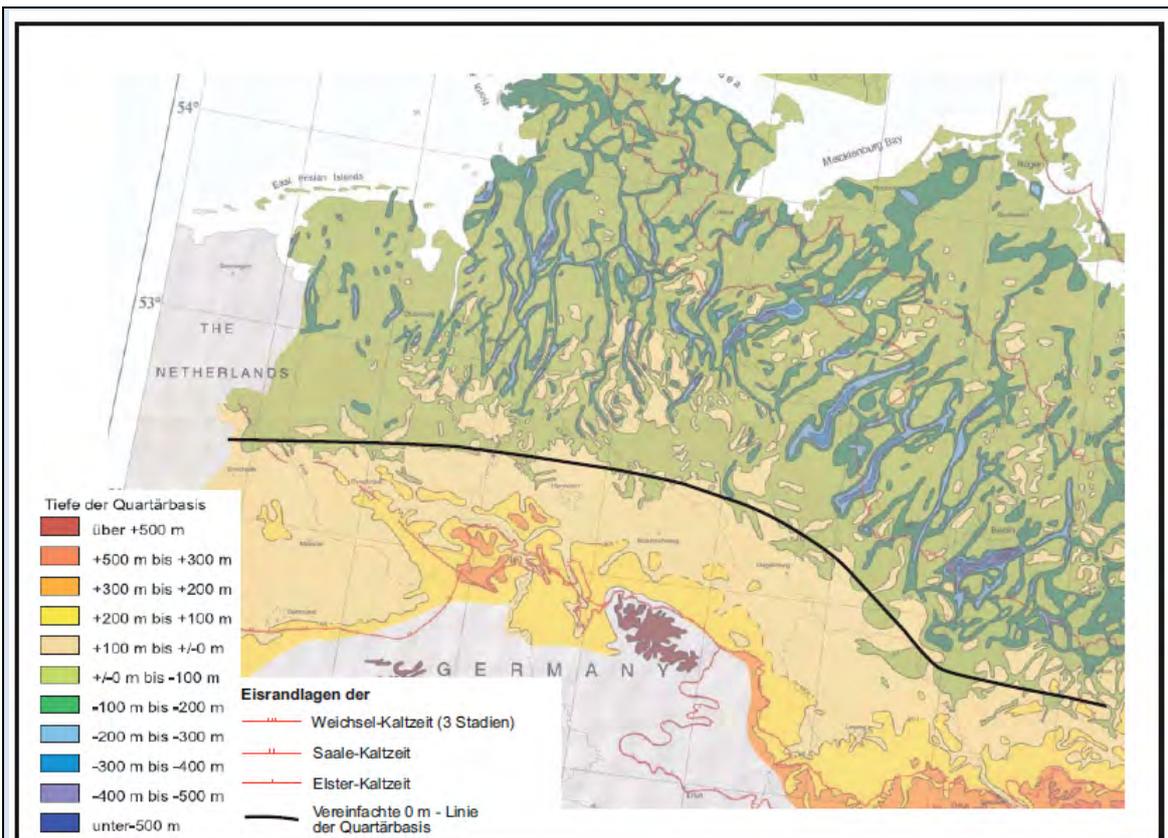


Abb. 21: Verbreitung elsterzeitlicher Rinnensysteme dargestellt durch die Tiefenlage der Quartärbasis. Aus /BGR 09/.

Bezogen auf die Problematik der Rinnenbildung für die Langzeitsicherheit möglicher Endlagerstandorte in Tonsteinen werden in /BGR 09/ folgende weitere Schlüsse gezogen:

- Für die Endlagerung untersuchungswürdige Tonsteinformationen in Deutschland wurden durch die BGR in /BGR 07/ bereits ab einer Tiefe von 300 m ausgewiesen, wobei insbesondere die Tiefe zwischen 300 und 400 m aus gesteinsphysikalischen, technischen und ökonomischen Gründen von größerem Interesse ist. Die Barrierefunktion dieser in relativ geringer Tiefe gelegenen weichen Tongesteinsformationen ist durch subglaziale Schmelzwassererosionsrinnen mit Tiefenwirkungen von bis zu 500 m unmittelbar und insbesondere bei fehlenden harten, kalkigen und gering durchlässigen Oberkreidegesteinen gefährdet.
- Für das zukünftige Klima im Betrachtungszeitraum von einer Million Jahre besteht die Perspektive von zehn möglichen Eiszeiten, die einmal oder mehrfach das Ausmaß der Elsterkaltzeit erreichen können. Daraus ergibt sich, dass erneute Rinnenbildungen mit maximalen Erosionstiefen bis etwa 500 m, zumindest in unkonsolidierten tertiären und

quartären Lockermaterialien, zu unterstellen sind.

Für die im Vorhaben beispielhaft herangezogenen potentiellen Endlagerstandorte Gorleben und den synthetischen Tonsteinstandort bedeutet dies folgendes:

1. Es lassen sich keine sicheren Angaben über den genauen Verlauf und Teufe zukünftig angelegter Rinnen machen. Genauso wenig lässt sich eine Ausweitung bereits vorhandener Rinnen ausschließen. Da die lagebestimmenden Faktoren unbekannt sind bedeutet dies, dass eine erneute Rinnenbildung am Standort Gorleben genauso wahrscheinlich ist wie eine Rinnenbildung in anderen Regionen Norddeutschlands.

2. Im Fall des im Vorhaben VerSi beispielhaft betrachteten synthetischen Tonsteinstandorts würde nur wenig wirksamer Erosionswiderstand von den quartären Ablagerungen sowie von den weicheren z. T. mergelig (z.B. Herbergellen-Mergel) ausgebildeten Schichtenfolgen des Apt bis Cenoman zu erwarten sein. Dagegen würden vor allem die 80 m mächtige Kalksteinfolge des Turon (vgl. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) als oberste mesozoische Schichtenfolge einen gewissen Erosionswiderstand gegenüber Schmelzwassererosion bieten. Aus diesem Grund wären Erosionstiefen von 500 m, die zur Erosion des Endlagerbergwerks führen würden, eher unwahrscheinlich. Die im Vorhaben VerSi definierte maximale Erosionsteufe von 350 m erscheint daher nicht unrealistisch. Dennoch kann insgesamt nicht ausgeschlossen werden, dass höher gelegene Partien des ewG des Tonsteinstandortes von Schmelzwassererosionsereignissen betroffen werden könnten.

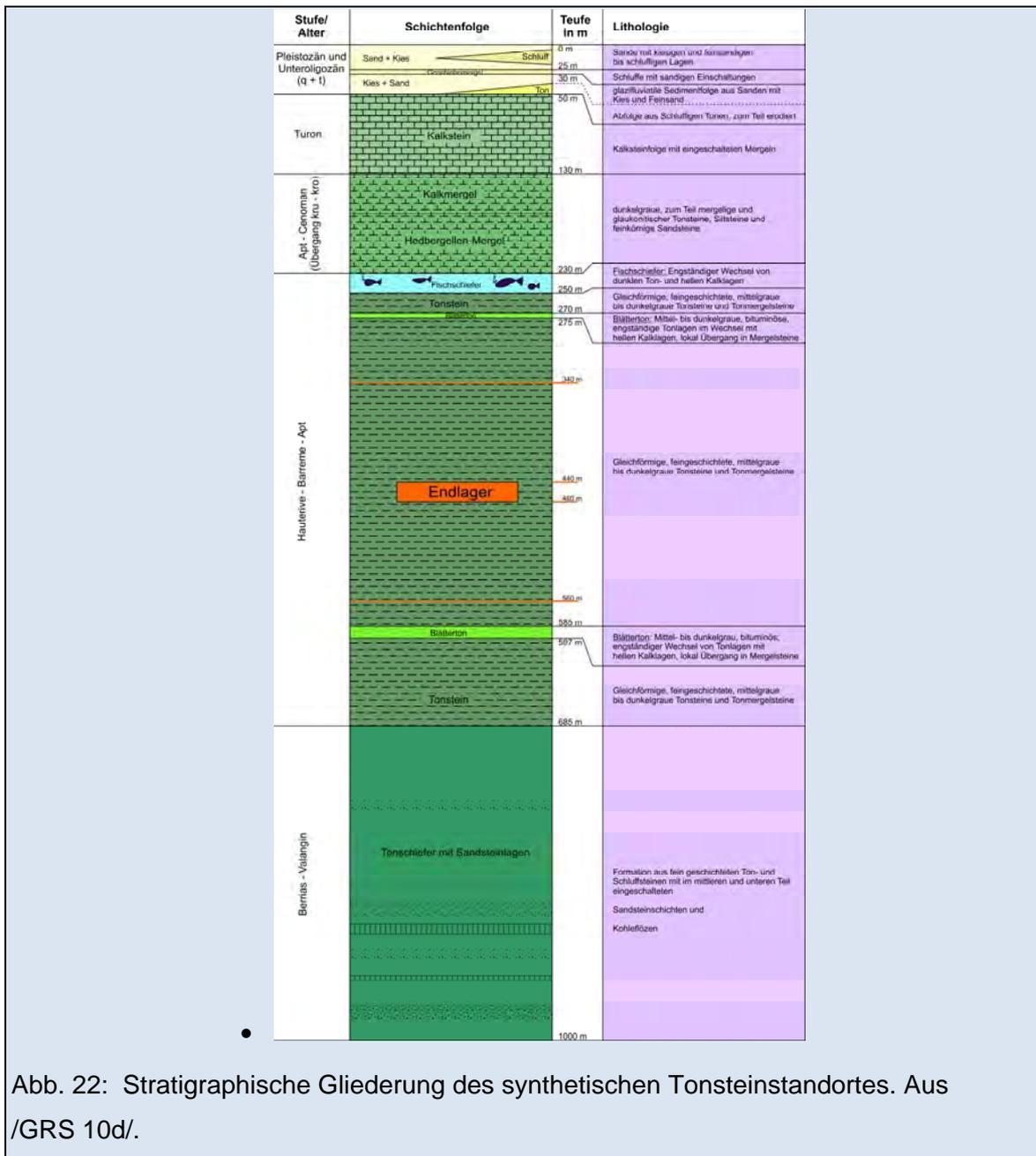


Abb. 22: Stratigraphische Gliederung des synthetischen Tonsteinstandortes. Aus /GRS 10d/.

3. Sicherheitskonzeptionelle Bedeutung

Es wird die Auswirkung von Robustheitsdefiziten rückhaltender Sicherheitsfunktionen unter Beachtung des zugehörigen Wirkungszeitraums auf die Robustheit der Einschlusswirkung des gesamten Endlagersystems untersucht. Hierbei sind die Rolle der Sicherheitsfunktion und ihrer Relevanz im Sicherheitskonzept zu dem jeweiligen Endlagersystem herauszustellen und der Einfluss des Robustheitsdefizits auf das Einschlussvermögen des ELA-Systems zu diskutieren. Hierbei sollte auch auf die Ergebnisse der Relevanzwichtung (siehe Kap. 9) zurückgegriffen werden.

Beispiel: Einschlusswirksamer Gebirgsbereich des Tonsteinstandortes

Wird, wie im Fall des vorliegenden verbal-argumentativen Abwägungsverfahrens, die Robustheitseinstufung allein auf die konzeptionellen Auslegungsanforderungen bezogen, so bleibt fraglich, ob bei (weniger wahrscheinlichen, jedoch nicht ausschließbaren) Rinnentiefen > 310 m die für eine Radionuklidrückhaltung erforderliche Ausdehnung des ewG (definiert im Sinne des obigen Geringfügigkeitskriteriums) über den gesamten Nachweiszeitraum erhalten bleibt. Eine andere Frage ist, ob hieraus eine Verletzung radiologischer Schutzziele resultiert. Dies ist nur anhand der Ergebnisse von Langzeitsicherheitsanalysen zu klären. Die im parallel verlaufenden VerSi-Teilvorhaben WS 2044 durchgeführten Rechnungen zu diesem Szenario ergaben keine über das Maß der Geringfügigkeit hinausgehenden Freisetzungen. Im Hinblick auf die im Vorhaben VerSi zugrunde gelegte Festlegung, dass beide Endlager prinzipiell genehmigungsfähig sind, sollte eine solche Situation auszuschließen sein.

Die Unterschreitung von Geringfügigkeitskriterien allein ist jedoch kein ausschließliches Kriterium für die Robustheit eines Endlagersystems. Selbst ohne Berücksichtigung der Erosion des ewG würde der Verlust sämtlicher, den ewG überlagernder Gesteinsschichten alleine für sich ein Robustheitsdefizit darstellen, da praktisch keine Sicherheitsreserven oberhalb des ewG mehr bestehen. Weiterhin verlieren das Deckgebirge und das oberhalb des ewG angrenzende weitere Wirtsgestein zumindest vorübergehend sämtliche integritätswahrende Sicherheitsfunktionen, die dem Schutz des ewG dienen. Insofern wird die Bewertung einer nur geringen Robustheit (Einstufung: 2) für den ewG des fiktiven Tonsteinstandortes aufrechterhalten.

4. Möglichkeiten der Korrektur des Robustheitsdefizits

Im letzten Teilschritt wird diskutiert, welche Möglichkeiten bestehen, die identifizierten Robustheitsdefizite zu „beheben“. Diese Möglichkeiten bestehen z.B. in einer entsprechenden Optimierung des Endlagerverschlusskonzepts oder in einer Erweiterung des Prozessverständnisses im Rahmen ergänzender F&E-Arbeiten. Ziel ist die Beantwortung der Frage, ob (und wenn ja mit welchem Aufwand und Zeitbedarf) die Robustheit der Charakterisierbarkeit, Prognostizierbarkeit bzw. die Systemrobustheit der betreffenden Sicherheitsfunktion und der sie charakterisierenden RSF-Parameter so gesteigert werden kann, dass sie bei einer erneuten Bewertung eine bezogen auf ihre Relevanz angemessene Robustheit aufweist.

Beispiel: Einschlusswirksamer Gebirgsbereich des Tonsteinstandortes

Eine Steigerung der Robustheit kann hier prinzipiell nur durch eine entsprechend tiefere Positionierung des Endlagersystems erreicht werden, eine Maßnahme, die jedoch aufgrund der begrenzten Ausdehnung des Wirtsgesteins ins Liegende (Liegendgrenze bei 685 m NN) und der erforderlichen Ausdehnung des ewG ins Liegende von ca. 130 m an dem im Vorhaben VerSi verwendeten synthetischen Tonsteinstandort nicht möglich wäre. Es handelt sich somit um ein rein standortspezifisches Robustheitsdefizit, welches nicht durch konzeptionelle Änderungen an der Endlagerauslegung behoben werden kann. Prinzipiell bestünde damit nur die Möglichkeit, auf einen anderen Standort mit tiefer gelegenen Tonsteinvorkommen zurückzugreifen.

Die Endlagertiefe von 450 m u. GOK wurde im Vorhaben VerSi festgelegt, da aus damaliger Sicht, diese geringere Tiefe keinen bergmännischen Ausbau erfordert hätte. Bei einem tiefer gelegenen Endlagerbergwerk im Tonstein können infolge des ggf. erforderlichen Streckenausbaus z.B. durch alkalisches Milieu des Porenwassers im Tonstein infolge Zementkorrosion zusätzliche Probleme durch eine erhöhte Radionuklidmobilität entstehen. Inwieweit diese den gegenüber subglazialen Erosionsereignissen aufgrund größerer Endlagertiefe bestehenden Robustheitsgewinn in Frage stellen, kann an dieser Stelle nicht allgemeingültig beantwortet werden, sondern muss im Einzelfall, d.h. unter Würdigung der jeweiligen standortspezifischen Eigenschaften gegeneinander abgewogen werden.

Im Anhang 6 werden die für den Salzstandort bei den beispielhaften Robustheitsbewertungen identifizierten Robustheitsdefiziten entlang der oben angeführten Teilschritte diskutiert.

13.2 Abschließende Bemerkungen

Aus dem oben angeführten Beispiel des ewG des Tonsteinstandortes und den weiteren, in Anhang 6 beispielhaft geführten Diskussionen wird deutlich, dass Robustheitsdefizite verschiedene Ursachen haben können. Generell kommen 4 Ursachen in Betracht, die im Nachfolgenden im Hinblick auf den Aufwand, der zur Beseitigung der Robustheitsdefizite erforderlich ist diskutiert werden.

1. Defizite im Verständnis sicherheitsrelevanter Prozessabläufe: Als Beispiel kann der nach derzeitigem Kenntnisstand ungewisse Endzustand der erreichbaren hydraulischen Eigenschaften des kompaktierten Salzgrus herangezogen werden. Diese Defizite sind ggf. durch entsprechende F&E-Arbeiten behebbar, wobei die Frage zu stellen ist, ob bei einem operativen Standortvergleich hierzu ausreichend Zeit zur Verfügung steht.

2. Defizite bei der Auslegung des Endlagerkonzeptes, insbesondere bei der Auslegung geotechnischer Barrieren (Versatz, Verschlussbauwerke): Generell liegt die Ursache darin, dass das Verschlusskonzept nicht im Hinblick auf die Standorteigenschaften ausreichend optimiert wurde. Als Beispiel kann der nach derzeitigem Kenntnisstand ungewisse Endzustand der erreichbaren integralen hydraulischen Eigenschaften von Streckenabdichtungen im Salinarkonzept herangezogen werden. Korrekturmöglichkeiten bestehen hier in der Wahl alternativer Baustoffe, einer modifizierten Anordnung der Abdichtungen im Endlagerbergwerk oder in optimierten Einbautechniken um die zugrunde gelegten Auslegungsanforderungen zu erreichen. Dies erfordert entsprechend überarbeitete Nachweise zu den geotechnischen Komponenten.

3. Nicht erfüllbare sicherheitskonzeptionelle Anforderungen: Als Beispiel könnte auch hier der nach derzeitigem Kenntnisstand ungewisse Endzustand der hydraulischen Eigenschaften des kompaktierten Salzgrus herangezogen werden, sofern nicht in absehbarer Zeit durch F&E-Ergebnisse der Nachweis gelingt, dass eine vollständige Kompaktion im Sinne des Erreichens von hydraulischen Eigenschaften, die mit denen des unverritzten Steinsalz vergleichbar sind, erfolgt. In diesem Fall müsste das Sicherheitskonzept so modifiziert werden, dass die sicherheitskonzeptionellen Erwartungen an die Barriereigenschaften der betreffenden geotechnischen Komponente abgeschwächt werden. Dies hätte zur Konsequenz, dass die sicherheitskonzeptionellen Anforderungen entweder zum Teil von einer anderen Barriere mit übernommen werden müssten oder dass die Anforderung an die Einschusswirkung des Endlagersystems insgesamt zu reduzieren wäre. Bezogen auf das oben genannte Beispiel wäre das Konzept des monolithischen (auch gasdichten) Einschusses auf das Konzept des vollständigen bzw. sicheren Einschusses zu reduzieren (vgl. Anhang 6). In jedem Fall wären die begleitenden Langzeitsicherheitsanalysen erneut zu führen und die Vergleichsprozedur unter Hinzuziehung aller Verfahrensbeteiligten zu wiederholen.

4. Standortimmanente Robustheitsdefizite: Als Beispiel kann das exemplarisch identifizierte Robustheitsdefizit des synthetischen Tonsteinstandortes gegenüber tiefen Schmelzwassererosionsrinnen (> 250 m) herangezogen werden. Derartige Robustheits-

defizite können nicht durch Modifikationen des Endlagerkonzeptes behoben werden. Eine Optimierung der geologischen Verhältnisse ist aus naheliegenden Gründen nicht möglich. Prinzipiell besteht nur die Möglichkeit standortspezifische Robustheitsdefizite zu akzeptieren oder auf andere Standorte mit entsprechend geeigneteren Verhältnissen auszuweichen. Aufgrund der nicht behebbaren Robustheitsdefizite kann das Endlagersystem im Tonstein als das weniger robuste der beiden im Zuge der Entwicklung des verbal-argumentativen Vergleichsverfahrens beispielhaft untersuchten Endlagersysteme angesehen werden.

Grundsätzlich ist es allerdings wenig wahrscheinlich, dass in einem späteren operativen Vergleichsverfahren Robustheitsdefizite ähnlicher „Tragweite“ identifiziert werden. Da davon ausgegangen wird, dass die zum Vergleich stehenden Endlagersysteme prinzipiell genehmigungsfähig sind (vgl. Ausführungen in Kap. 4), ist zu erwarten, dass Defizite beim Verständnis zu sicherheitsrelevanten Prozessen durch entsprechende Forschungsaktivitäten zum Zeitpunkt eines zukünftigen Endlagersystemvergleichs bereits beseitigt sind und die Standortauswahlkriterien derart weiterentwickelt wurden, dass Robustheitsdefizite, wie hier im Beispiel des gegenüber der Bildung tiefer Erosionsrinnen wenig robusten Endlagersystems des Tonsteinstandortes nicht auftreten werden.

In diesem Zusammenhang ist weiterhin darauf hinzuweisen, dass die in diesem Bericht auszugsweise zitierte und in den auf der beiliegenden CD-ROM befindlichen Begleitberichten beispielhaft durchgeführten Robustheitsbewertungen der Veranschaulichung der Anwendung der im Vorhaben VerSi entwickelten verbal-argumentativen Abwägungsmethodik dienen. Die exemplarischen Robustheitseinstufungen wurden aufgrund begrenzter Kapazitäten im Vorhaben VerSi von einer kleinen Gruppe von Wissenschaftlern auf der Grundlage des Studiums ausgewählter Literatur durchgeführt. Sämtliche fachlichen Ausführungen, Robustheitseinstufungen und deren Begründungen sind daher als exemplarische Einschätzungen anzusehen und erheben nicht den Anspruch der fachlichen Belastbarkeit, der bei der Anwendung der Abwägungsmethodik in einem späteren Standortauswahlprozess erforderlich wäre. Ziel war es, späteren Anwendern anhand der im Vorhaben VerSi behandelten Endlagersysteme (Steinsalzstandort Gorleben / generischer Tonsteinstandort) die Vorgehensweise bei der Bewertung der Robustheit der Parameter rückhaltender Sicherheitsfunktionen beispielhaft nahe zu bringen.

Abschließend sei angemerkt, dass Robustheitsdefizite nicht mit Sicherheitsdefiziten gleichzusetzen sind. Als eine der grundlegenden Voraussetzungen wurde im Projekt VerSi davon ausgegangen, dass auch in einem späteren operativen Endlagersystem-

vergleich bei keinem der Kandidaten Erkenntnisse vorliegen, die die Einhaltung der Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle gemäß /BMU 10/ in Frage stellen. Hinsichtlich der Untersuchungstiefe zur Langzeitsicherheit der Endlagersysteme wurde unterstellt, dass mindestens von einer Genehmigungsfähigkeit, d. h. einer prinzipiellen Eignung für die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle, ausgegangen werden kann. Gemäß der Definition des Begriffs „Sicherheit“ in Kap. 2.2 kann daher von einem ausreichenden Sicherheitsniveau ausgegangen werden, was die Existenz signifikanter Sicherheitsdefizite ausschließt. Die Robustheit im Sinne der sicherheitsgerichteten Aussagesicherheit und der Unempfindlichkeit der Sicherheitsfunktionen der Endlagersysteme gegenüber Änderungen ihrer Randbedingungen (s. Definition in Kap. 2.3) ist dagegen ein über dieses Sicherheitsniveau herausgehendes Qualitätsmerkmal der Sicherheitsperformance eines Endlagersystems, welches als grundlegendes Vergleichskriterium dem hier vorgestellten verbalargumentativen Abwägungsverfahren zu Grunde gelegt wurde.

14 Literatur

- /AKE 02/ Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte (AKEnd)
Auswahlverfahren Endlagerstandorte - Empfehlungen des AKEnd -
Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte Dezember 2002.
- /APP 09/ Appel, D. & Kreusch, J. :
Grundlagen der Methodik und Anforderungen bei der vergleichenden
Bewertung von Endlagern in verschiedenen geologischen Situationen.-
Abschlussbericht zum VerSi-Vorhaben 3607R02589 : Durchführung
vergleichender Langzeitsicherheitsanalysen für verschiedene geologische
Situationen zur Evaluierung der Methodik und der Instrumentarien.-
Hannover, August 2009.
- /BAL 07/ Baltés, B.; Röhlig, K. & Kind, A.:
Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle
in tiefen geologischen Formationen – Entwurf der GRS -
GRS-A-3358, Köln, Januar 2007¹.
- /BFS 07/ Bundesamt für Strahlenschutz (BfS):
Entwicklung eines synthetischen Tonsteinstandortes. –
Projektinterner Bericht ,Salzgitter, November 2007.
- /BFS 09/ Bundesamt für Strahlenschutz (BfS):
Beispielhafte Untersuchungstiefe für den Tonsteinstandort. –Projektinternes
Memo ,Salzgitter, Oktober 2010.
- /BGR 03/ Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR):
Standortbeschreibung Gorleben – Teil III – Ergebnisse der Erkundung des
Salinars.- Abschlussbericht 9G4121100000, Dezember 2003, Hannover.

¹ Dieser Bericht ist von der GRS im Auftrag des BMU im Rahmen des Vorhabens SR 2523 erstellt worden. Der Auftraggeber behält sich alle Rechte vor. Insbesondere darf dieser Bericht nur mit seiner Zustimmung zitiert, ganz oder teilweise vervielfältigt werden bzw. Dritten zugänglich gemacht werden. Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der Meinung des Auftraggebers übereinstimmen.

- /BGR 07/ Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe(BGR):
Endlagerung radioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen
Deutschlands. Untersuchung und Bewertung von Tongesteinsformationen.--
Bundesanstalt f. Geowiss. u. Rohstoffe 118 S., 44 Abb., 5 Tab.; Berlin.
- /BGR 09/ Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe(BGR):
Eiszeitliche Rinnensysteme und ihre Bedeutung für die Langzeitsicherheit
möglicher Endlagerstandorte mit hochradioaktiven Abfällen in
Norddeutschland.- ISBN 978-3-9813373-3-4, August 2009, Hannover.
- /BMU 10/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU):
Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder
radioaktiver Abfälle.- Berlin, September 2010.
- /DBE 98/ Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe:
Aktualisierung des Konzepts "Endlager Gorleben" Abschlussbericht , Peine
1998.
- /DBE 08/ DBE Technology GmbH:
Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche
Bewertung von Endlagern für HAW: AP5: Nachweiskonzept zur Integrität der
einschlusswirksamen technischen Barrieren.- Peine, April 2008.
- /EUR 99/ Europäische Kommission:
Backfilling and Sealing of Underground Repositories for Radioactive Waste
in Salt (BAMBUS Project) – Final Report. Nuclear Science and Technology,
EUR 19124 EN. Luxemburg: European Communities, 1999.
- /EUR 04/ Europäische Kommission:
Backfilling and Sealing of Underground Repositories for Radioactive Waste
in Salt (BAMBUS II Project) – Final Report. Nuclear Science and
Technology, EUR 20621 EN. Luxemburg: European Communities, 2004.

- /GRS 99/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH:
Eigenschaften von Salzgrus als Versatzmaterial im Wirtsgestein Salz -
Bericht über den Workshop des Bundesamts für Strahlenschutz und des
Projekträgers Entsorgung vom 18. und 19. Mai 1999. GRS-143.
Braunschweig: GRS, 1999.
- /GRS 00/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH:
Experimentelle und theoretische Untersuchung physikalisch-chemischer
Vorgänge beim Laugenzutritt in Einlagerungsstrecken. GRS-164 / SIG-
02/99. Braunschweig: GRS, 2000.
- /GRS 10a/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH:
Autoren: Larue, P. J.; Kock, I.; Seher, H.; Peiffer, F.
Endlagerung im Tonstein, Entwicklung eines synthetischen Tonstein-
standortes, - Teil 1: Randbedingungen und Anforderungen an einem Ton-
steinstandort, Teil 2: Standortcharakterisierung, Teil 3: Endlagerkonzept im
Tonstein, Teil 4: Modellkonzept für ein Endlager im Salz -
Abschlussberichte zum Vorhaben 3607R02538 „planerische
Grundsatzfragen“, GRS-A-3535, Köln, Dezember 2010.
- /GRS 10b/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH:
Autoren: Beuth, T.; Bracke, G.
Darstellung der Arbeiten zur Ableitung von Szenarien -
Abschlussbericht Vorhaben VerSi- 3607R02580 „Szenariientwicklung“,
Köln, Februar 2010.
- /GRS 10c/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH:
Autoren: Rübel, A.; Mönig, J.
Prozesse, Modellkonzepte und sicherheitsanalytische Rechnungen für ein
Endlager im Salz.-
GRS-A-3521, Braunschweig, Oktober 2010.
- /GRS 10d/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH:
Synoptischer Sachstandsbericht, Endlagersysteme Tonstein / Steinsalz.-
Begleitbericht zum VerSi-Teilvorhaben 3607R02589 „Evaluierung“, Köln,
April 2010.

- /GRS 10e/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH:
Bewertung der charakteristischen Parameter der rückhaltenden
Sicherheitsfunktionen der Abfallbehälter
Begleitbericht zum VerSi-Teilvorhaben 3607R02589 „Evaluierung“, Köln,
April 2010
- /GRS 10f/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH:
Bewertung der charakteristischen Parameter der rückhaltenden
Sicherheitsfunktionen des Versatzes in den Einlagerungsbereichen
Begleitbericht zum VerSi-Teilvorhaben 3607R02589 „Evaluierung“,
Köln, April 2010.
- /GRS 10g/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH:
Bewertung der charakteristischen Parameter der rückhaltenden
Sicherheitsfunktionen des Versatzes in der Restgrube
Begleitbericht zum VerSi-Teilvorhaben 3607R02589 „Evaluierung“,
Köln, April 2010.
- /GRS 10h/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH:
Bewertung der charakteristischen Parameter der rückhaltenden
Sicherheitsfunktionen der Verschlüsse (Streckenverschlüsse Tonstein,
Dämme Salzstandort Gorleben)
Begleitbericht zum VerSi-Teilvorhaben 3607R02589 „Evaluierung“,
Köln, April 2010.
- /GRS 10i/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH:
Bewertung der charakteristischen Parameter der rückhaltenden
Sicherheitsfunktionen der Schachtverschlüsse sowie der
Streckenverschlüsse
zum Infrastrukturbereich Salzstandort Gorleben.
Begleitbericht zum VerSi-Teilvorhaben 3607R02589 „Evaluierung“,
Köln, April 2010.

- /GRS 10j/ Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH:
Bewertung der charakteristischen Parameter der rückhaltenden
Sicherheitsfunktionen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs
Begleitbericht zum VerSi-Teilvorhaben 3607R02589 „Evaluierung“,
Köln, April 2010.
- /ISI 10/ Buhmann, D., Keller, S., Krone, J., Lommerzheim, A., Mönig, J., Mrugalla,
S., Weber, J. R. & Wolf, J.:
Nachweis und Bewertung des Isolationszustandes „Sicherer Einschluss“. -
Projekt ISIBEL. in Vorbereitung.
- /LAU 04/ Laux, H. (2004): Entscheidungstheorie.- 6. Auflage, 484 S., Springer Verlag,
Berlin Heidelberg New York.
- /NAG 02/ Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle (NAGRA)
Technischer Bericht 02-05
Project Opalinus Clay - Safety Report
Demonstration of disposal feasibility for spent fuel, vitrified high-level waste
and long-lived intermediate-level waste (Entsorgungsnachweis)
Dezember 2002.
- /SAM91/ Buhmann, D.; Nies, A.; Storck, R.: Analyse der Langzeitsicherheit von
Endlagerkonzepten für wärmeerzeugende radioaktive Abfälle. GSF
Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit GmbH, GSF 27/91,
Neuherberg, 1991.
- /STR 95/ Strassert, G.: Das Abwägungsproblem bei multikriteriellen Entscheidungen.-
Verlag Peter Lang, Frankfurt a. Main 1995.

15 Anhänge

Anhang 1: Auflistung der integritätsbewahrenden und rückhaltenden Sicherheitsfunktionen

Anhang 2: Ergebnisse der Relevanzwichtung

Anhang 3: Ergebnisse der globalen Standortcharakterisierung

Anhang 4: Identifizierung der die rückhaltenden Sicherheitsfunktionen charakterisierenden Parameter

Anhang 5: Korrelation Relevanz-Robustheit

Anhang 6: Beispielhafte Bewertung der Robustheit beider Endlagersysteme

Inhalt CD-ROM:

Synoptischer Sachstandsbericht.docx

/GRS 10d

Parameterbewertungen Behälter.docx

/GRS 10e/

Parameterbewertungen Versatz Einlagerungsbereiche.docx

/GRS 10f/

Parameterbewertungen Versatz Restgrube.docx

/GRS 10g/

Parameterbewertungen Dämme und Abdichtungen Einlagerungsbereiche.docx

/GRS 10h/

Parameterbewertungen Schachtverschlüsse und Streckenabdichtungen Gorleben.docx

/GRS 10i/

Parameterbewertungen Einschlusswirksamer Gebirgsbereich.docx

/GRS 10j/

15.1 Anhang 1: Auflistung der integritätsbewahrenden und rückhaltenden Sicherheitsfunktionen
(zu Verfahrensschritt 2, s. Kap. 8)

Lfd. Nr. SF/ Teilsystem/ Komponente	Integritätserhaltende Sicherheitsfunktion (ISF)	Radionuklidrückhaltende Sicher- heitsfunktion (RSF)	Anmerkungen
A Abfallgebinde			
A1 Matrix			
1	Ableitung der Zerfallswärme in den Behälter		<i>Sicherheitsfunktionen des Abfalls werden im Vergleich nicht betrachtet, Abfalleigenschaften liegen beiden Endlagersystemen als gleiche und unveränderliche Randbedingung zu Grunde</i>
2		Niedriges radiologisches Potenzial: geringer Anteil an langlebigen Spaltprodukten und Transuranen	
3		Begrenzung/Verzögerung der Radionuklide aus dem Abfallprodukt, geringer Anteil der Instant Release Fraction	
4		Begrenzung/Verzögerung der Radionuklidfreisetzung aus dem Kernbrennstoff, niedrige Auflösungsrate der Brennstoffmatrix	
5		Begrenzung/Verzögerung der Radionuklidfreisetzung aus den verglasten Spatlösungen, niedrige Auflösungsrate der Borosilikatmatrix	
6		Gleichmäßige Freisetzungseigenschaften bei Lösungszutritt	

Lfd. Nr. SF/ Teilsystem/ Komponente	Integritätserhaltende Sicherheitsfunktion (ISF)	Radionuklidrückhaltende Sicher- heitsfunktion (RSF)	Anmerkungen
A2 Behälter			
7	Schutz des Abfallprodukts vor geo- mechanischen Einflüssen von außen		<i>Schutzwirkung auf A1</i>
8	Temperaturbegren- zung/Integritätserhalt: Ableitung der Zerfallswärme in das Versatzmaterial		<i>Schutzwirkung auf B1</i>
9	Gewährleistung der Unterkritikalität: Begrenzung/Verzögerung des Lö- sungszutritts zum Abfallprodukt		<i>Anforderung an Unterkritikalität wird intrinsisch durch SF Nr. 11 bewirkt, daher wird SF Nr. 9 im Weite- ren nicht berücksichtigt</i>
10	Begrenzung der Gasbildung: Begren- zung der Korrosionsrate		<i>Schutzwirkung auf B-D, SF erfordert implizit geringe Metallmengen, dies steht im Widerspruch zur Wir- kung von SF Nr. 11</i>
11		Begrenzung/Verhinderung des Lö- sungszutritts zum Abfallprodukt infolge Dichtwirkung der Behälterwandungen	<i>Wesentliche rückhaltende Sicherheitsfunktion</i>
12		Verzögerung der Radionuklidausbrei- tung durch Sorption am korrodierten Behältermaterial	
13		Begrenzung der Radionuklidausbrei- tung durch Löslichkeitsgrenzen	

Lfd. Nr. SF/ Teilsystem/ Komponente	Integritätserhaltende Sicherheitsfunktion (ISF)	Radionuklidrückhaltende Sicher- heitsfunktion (RSF)	Anmerkungen
B Einlagerungsbereich			
B1 Versatzmaterial			
14	Geomechanische Stabilisierung: Schutz des Abfallgebindes vor geo- mechanischen Einflüssen von außen		<i>Schutzwirkung auf A</i>
15	Geomechanische Stabilisierung: Lage- fixierung des Abfallgebindes		<i>Schutzwirkung auf A</i>
16	Geomechanische Stabilisierung: Be- grenzung der Auflockerung des kon- turnahen Wirtsgesteins		<i>Schutzwirkung auf D</i>
17	Temperaturbegren- zung/Integritätserhalt: Ableitung der Zerfallswärme in das Wirtsgestein		<i>Schutzwirkung auf A, B2 und D</i>
18	Gewährleistung der Unterkritikalität: Begrenzung/Verhinderung des Lö- sungszutritts zum Abfallbehälter		<i>Anforderung an Unterkritikalität wird intrinsisch durch SF Nr. 19 bewirkt, daher wird SF Nr. 18 im Wei- teren nicht berücksichtigt</i>
19		Begrenzung/Verhinderung von Lö- sungsbewegung und Radionuklidtrans- port	<i>Wesentliche rückhaltende Sicherheitsfunktion</i>
20		Begrenzung der Radionuklidausbrei- tung aufgrund von Löslichkeitsgrenzen	
21		Verzögerung der Radionuklidausbrei- tung durch Sorption	<i>Nur Tonsteinstandort</i>
22		Verzögerung der Radionuklidausbrei- tung durch Kolloidfilterung	<i>SF Nr. 22 wird in ihrer Wirkung SF Nr. 21 zugeschla- gen</i>

Lfd. Nr. SF/ Teilsystem/ Komponente	Integritätserhaltende Sicherheitsfunktion (ISF)	Radionuklidrückhaltende Sicher- heitsfunktion (RSF)	Anmerkungen
B2 Abdichtung/Damm			
23	Geomechanische Stabilisierung: Be- grenzung der Auflockerung des kon- turnahen Wirtsgesteins		<i>Schutzwirkung auf D</i>
24	Geomechanische Stabilisierung: Me- chanische Lastaufnahme (Gas- und Fluiddrücke, sowie des Bentonit- quelldruckes des Versatzes (Ton- steinkonzept))		<i>Schutzwirkung auf A, B1, C</i>
25	Temperaturbegrenzung / Integritäts- erhalt: Ableitung der Zerfallswärme in das Wirtsgestein		<i>Aufgrund der Entfernung zu den Abfallgebinden kaum relevant, daher nicht weiter betrachtet</i>
26		Begrenzung/Verhinderung von Lö- sungsbeziehung und Radionuklidtrans- port	<i>Wesentliche rückhaltende Sicherheitsfunktion</i>
27		Verzögerung der Radionuklidausbrei- tung durch Sorption	<i>Nur Tonsteinstandort</i>
28		Verzögerung der Radionuklidausbrei- tung durch Kolloidfilterung	<i>SF Nr. 28 wird in ihrer Wirkung SF Nr. 27 zugeschla- gen</i>

Lfd. Nr. SF/ Teilsystem/ Komponente	Integritätserhaltende Sicherheitsfunktion (ISF)	Radionuklidrückhaltende Sicher- heitsfunktion (RSF)	Anmerkungen
C Endlagerbergwerk			
C1 Streckenversatz			
29	Geomechanische Stabilisierung: Be- grenzung der Auflockerung des kon- turnahen Wirtsgesteins		<i>Schutzwirkung auf D</i>
30	Geomechanische Stabilisierung: Schutz der hangenden Schichten vor der Bildung von sekundären Weg- samkeiten		<i>Schutzwirkung auf D und E</i>
31		Begrenzung/Verhinderung von Lö- sungsbewegung und Radionuklidtrans- port	<i>Wesentliche rückhaltende Sicherheitsfunktion</i>
32		Limitierung der Radionuklidkonzentra- tionen durch Löslichkeitsbegrenzung	<i>Aufgrund der Entfernung zu den Einlagerungsberei- chen wenig relevant, daher nicht weiter betrachtet</i>
33		Verzögerung der Radionuklidausbrei- tung durch Sorption	<i>Nur Tonsteinstandort</i>
34		Verzögerung der Radionuklidausbrei- tung durch Kolloidfilterung	<i>SF Nr. 34 wird in ihrer Wirkung SF Nr. 33 zugeschla- gen</i>

Lfd. Nr. SF/ Teilsystem/ Komponente	Integritätserhaltende Sicherheitsfunktion (ISF)	Radionuklidrückhaltende Sicher- heitsfunktion (RSF)	Anmerkungen
Streckenabdichtungen zum Schachtverschluss (Gorle- ben)			
35	Mechanische Lastaufnahme (Gas- und Fluiddrücke)		<i>Um eine Vergleichbarkeit der SF beider Endlagersys- teme zu erreichen, werden die Streckenabdichtungen zum Infrastrukturbereich in Gorleben zum Komparti- ment "Schachtabdichtungen" gezählt. Die Strecken- abdichtungen zum Infrastrukturbereich dienen ähn- lich wie die (unteren) Schachtabdichtungen beim Ton- steinstandort der Abdichtung des ewG nach außen.</i>
36	Geomechanische Stabilisierung: Be- grenzung der Auflockerung des kon- turnahen Wirtsgesteins		
37		Begrenzung/Verzögerung des Lösungs- zutritts in den bzw. Lösungsaustritts aus dem Infrastrukturbereich	

Lfd. Nr. SF/ Teilsystem/ Komponente	Integritätserhaltende Sicherheitsfunktion (ISF)	Radionuklidrückhaltende Sicher- heitsfunktion (RSF)	Anmerkungen
Schachtverschlüsse			s.o.
38	Geomechanische Stabilisierung: Be- grenzung der Auflockerung des kon- turnahen Wirtsgesteins		<i>Schutzwirkung auf D</i>
39	Geomechanische Stabilisierung: Schutz der Tagesoberfläche vor schachtnahen Senkungen		<i>Keine Sicherheitsfunktion im Sinne kerntechnischer Si- cherheit, bergrechtliche Forderung aus konventionel- lem Bergbau</i>
40	Geomechanische Stabilisierung: Mechanische Lastaufnahme (Gas- und Fluiddrücke)		<i>Schutzwirkung auf D (Gasdruck) bzw. auf C und B (Flu- iddruck)</i>
41		Begrenzung/Verhinderung von Lö- sungsbewegung und Radionuklidtrans- port	<i>Wesentliche rückhaltende Sicherheitsfunktion</i>
42		Verzögerung der Radionuklidausbrei- tung durch Sorption (Bentonitabdich- tung)	
43		Verzögerung der Radionuklidausbrei- tung durch Kolloidfilterung (Bentonit- abdichtung)	<i>SF Nr. 43 wird in ihrer Wirkung SF Nr. 42 zugeschla- gen</i>
44		Begrenzung hydraulischer Kurzschlüsse im Deckgebirge: Wiederherstellung der hydraulischen Ausgangssituation im Deckgebirge	<i>Keine Sicherheitsfunktion im Sinne kerntechnischer Si- cherheit, bergrechtliche Forderung aus konventionel- lem Bergbau</i>

Lfd. Nr. SF/ Teilsystem/ Komponente	Integritätserhaltende Sicherheitsfunktion (ISF)	Radionuklidrückhaltende Sicher- heitsfunktion (RSF)	Anmerkungen
D Einschlusswirksamer Gebirgsbereich			
45	Geomechanische Stabilisierung: Me- chanische Lastaufnahme Gas- und Fluiddrücke bzw. des Bentonitquell- druckes (Tonstein)		<i>Schutzwirkung auf D (Eigenschutz)</i>
46	Geomechanische Stabilisierung: Mechanische Lastaufnahme von Ge- birgsspannungen		<i>Schutzwirkung auf A-D</i>
47	Geomechanische Stabilisierung: Me- chanischer Schutz der technischen Abdichtungen		<i>Schutzwirkung auf A-C (C2 nur soweit im ewG ge- legen)</i>
48	Temperaturbegrenzung / Integritäts- erhalt: Schadloose Aufnahme der Zer- fallswärme		<i>Schutzwirkung auf D (Eigenschutz)</i>
49		Begrenzung/Verhinderung von Lö- sungsbewegung und Radionuklidtrans- port	<i>Wesentliche rückhaltende Sicherheitsfunktion</i>
50		Begrenzung/Verzögerung des Lösungs- zutritts in das bzw. Lösungsaustritts aus dem Endlagerbergwerk durch Verheil- lung der Auflockerungszonen	<i>SF Nr. 50 wird in ihrer Wirkung SF Nr. 49 zugeschla- gen</i>
51		Verzögerung der Radionuklidausbrei- tung durch Löslichkeitsbegrenzung	<i>Löslichkeitsbegrenzung im ewG sollte aufgrund der vergleichsweise geringen Radionuklidkonzentrationen eine nur untergeordnete Rolle spielen</i>
52		Verzögerung der Radionuklidausbrei- tung durch Sorption	<i>Nur Tonsteinstandort</i>
53		Verzögerung der Radionuklidausbrei- tung durch Kolloidfilterung	<i>SF Nr. 53 wird in ihrer Wirkung SF Nr. 52 zugeschla- gen</i>

Lfd. Nr. SF/ Teilsystem/ Komponente	Integritätserhaltende Sicherheitsfunktion (ISF)	Radionuklidrückhaltende Sicher- heitsfunktion (RSF)	Anmerkungen
E Weiteres Wirtsgestein			
54	Integritätserhalt des ewG: Schutz des ewG vor Erosion und Sub- rosion		<i>Schutzwirkung auf D</i>
55	Geomechanische Stabilisierung: mechanische Lastaufnahme von Ge- birgsspannungen (z.B. Eisauflast)		<i>Schutzwirkung auf D</i>
56 X1		Begrenzung/Verhinderung von Lö- sungsbewegung und Radionuklidtrans- port	<i>Keine primären Sicherheitsfunktionen, da konzeptio- nelle Anforderungen bzgl. der Isolationswirkung des Endlagersystems auf den ewG beschränkt sind. SF können aber bei Freisetzungen, die aus wenig wahr- scheinlichen Szenarien resultieren, als Sicherheitsre- serve angesehen werden.</i>
57 X2		Begrenzung/Verzögerung eines Lö- sungszutritts zum ewG	
58 X3		Verzögerung der Radionuklidausbrei- tung durch Sorption	
59		Verzögerung der Radionuklidausbrei- tung durch Kolloidfilterung	

Lfd. Nr. SF/ Teilsystem/ Komponente	Integritätserhaltende Sicherheitsfunktion (ISF)	Radionuklidrückhaltende Sicher- heitsfunktion (RSF)	Anmerkungen
F Deckgebirge			
60	Integritätserhalt des ewG: Schutz des ewG vor Erosion		<i>Schutzwirkung auf D</i>
61	Geomechanische Stabilisierung: Mechanische Lastaufnahme von Ge- birgsspannungen (z.B. Eisauflast)		<i>Schutzwirkung auf D</i>
62X4		Begrenzung des Radionuklidtransports durch geringe Permeabilität	<i>Keine Sicherheitsfunktion, sondern zusätzliche Sicher- heitswirkung, da keine konzeptuellen Anforderungen. Z. T. hinsichtlich zeitlicher Wirksamkeit und Isolati- onswirkung nicht sicher zu prognostizieren, somit un- tergeordnete Relevanz.</i>
63X5		Verzögerung der Radionuklidausbrei- tung durch Sorption	
64X6		Verzögerung der Radionuklidausbrei- tung durch Ausbildung einer minerali- sationsbedingten Dichteschichtung	
65X7		Verdünnung von Radionuklidkonzent- rationen durch Zumischung von nicht- kontaminierten Grundwässern	
66X8		Verzögerung der Radionuklidausbrei- tung durch Kolloidfilterung	

15.2 Anhang 2: Ergebnisse der Relevanzwichtung
(zu Verfahrensschritt 3, s. Kap. 9)

Lfd. Nr. SF/ Teilsystem/ Komponente	Integritätserhaltende Si- cherheitsfunktion (ISF) (Für Endlagersystemvergleich nicht relevant, daher Rangzahlen in Klammern)	Radionuklidrückhaltende Sicherheitsfunktion (RSF)	Relevanz Ordinale Rangzahlen: 1: keine Relevanz bis 5: sehr hohe Relevanz ("unver- zichtbar")				Beitrag der SF zum Radionuklidein- schluss über den Nachweiszeitraum
			< 10 ka		> 10 ka		
Abfallgebinde			Ton- stein	Salz	Ton- stein	Salz	
Behälter							
7	Schutz des Abfallprodukts vor geomechanischen Einflüssen von außen		(5)	(2)	(1)	(1)	< 10 ka: im Tonstein ist der Behälter entschei- dende Barriere, im Salz weniger relevant, da Salzgrusversatz we- sentlich schneller Isolationswirkung entfaltet; > 10 ka: Behälterwirkung konzeptuell (und tech- nisch) nicht belastet / belastbar
8	Temperaturbegren- zung/Integritätserhalt: Ablei- tung der Zerfallswärme in das Versatzmaterial		(3)	(3)	(1)	(1)	< 10 ka Zerfallswärme hoch, Tonstein: Temperaturempfindlichkeit hoch, Salz: Temperaturempfindlichkeit geringer > 10 ka: Zerfallswärme niedrig; Tonstein: Temperaturempfindlichkeit hoch, Salz: Temperaturempfindlichkeit geringer, generell: Behälterwirkung > 10 ka fraglich
10	Begrenzung der Gasbildung: Begrenzung der Korrosion		(3)	(4)	(1)	(1)	Anforderung, wenn Behältermaterial die Gasbil- dung reduzieren soll, geringe Metallmengen stehen im Widerspruch zu SF11

Lfd. Nr. SF/ Teilsystem/ Komponente	Integritätserhaltende Si- cherheitsfunktion (ISF) (Für Endlagersystemvergleich nicht relevant, daher Rangzahlen in Klammern)	Radionuklidrückhaltende Sicherheitsfunktion (RSF)	Relevanz Ordinale Rangzahlen: 1: keine Relevanz bis 5: sehr hohe Relevanz ("unver- zichtbar")				Beitrag der SF zum Radionuklidein- schluss über den Nachweiszeitraum	
			< 10 ka		> 10 ka			Begründung
			Ton- stein	Salz	Ton- stein	Salz		
Abfallgebinde								
Behälter								
11		Begrenzung/Verhinderung des Lösungszutritts zum Abfallpro- dukt infolge Dichtwirkung der Behälterwandungen	5	2	1	1	< 10 ka: im Tonstein ist der Behälter entschei- dende Barriere, im Salz weniger relevant, da Salzgrusversatz we- sentlich schneller Isolationswirkung entfaltet; > 10 ka: Behälterwirkung konzeptuell (und tech- nisch) nicht belastet / belastbar	
12		Verzögerung der Radionuklid- Ausbreitung durch Sorption am Behältermaterial	2	1	1	1	< 10 ka: weniger relevant, da Sorptionsmecha- nismen nicht völlig bekannt; kaum belastbar quantifizierbar, daher konzeptionell von eher untergeordneter Bedeutung > 10 ka: Behälterwirkung konzeptuell (und tech- nisch) nicht belastet / belastbar	
		Begrenzung der Radionuklid- ausbreitung durch Löslichkeitsgren- zen	2	1	1	1	Wahl des Behältermaterials richtet sich in erster Linie nach den Anforderungen aus SF Nr. 11. < 10 ka: weniger relevant, da löslichkeitssteu- ernde Parameter und Prozesse nicht völlig be- kannt; wenig belastbar quantifizierbar, daher konzeptionell von eher untergeordneter Bedeu- tung > 10 ka: Behälterwirkung konzeptuell (und technisch) nicht belastet / belastbar	

Lfd. Nr. SF/ Teilsystem/ Komponente	Integritätserhaltende Si- cherheitsfunktion (ISF) (Für Endlagersystemvergleich nicht relevant, daher Rangzahlen in Klammern)	Radionuklidrückhaltende Sicherheitsfunktion (RSF)	Relevanz Ordinale Rangzahlen: 1: keine Relevanz bis 5: sehr hohe Relevanz ("unver- zichtbar")				Beitrag der SF zum Radionuklidein- schluss über den Nachweiszeitraum
			< 10 ka		> 10 ka		
ELB			Ton- stein	Salz	Ton- stein	Salz	Begründung
Versatzmaterial							
14	Geomechanische Stabilisie- rung: Schutz des Abfallgebin- des vor geomechanischen Ein- flüssen von außen		(5)	(1)	(1)	(1)	< 10 ka: im Tonstein Behälter entscheidende Barriere, daher ist diese Sicherheitsfunktion als integritätsbewahrende Eigenschaft ebenso ext- rem relevant wie die Barrierewirkung des Behäl- ters; Salz weniger relevant, da im Normalfall kei- ne hydraulische Verbindung aus ewG zu unter- stellen ist, und Salzgrusversatz wesentlich schneller Isolationswirkung entfaltet; > 10 ka: Behälterwirkung konzeptuell (und tech- nisch) nicht belastet / belastbar
15	Geomechanische Stabilisie- rung: Lagefixierung des Abfall- gebindes		(3)	(1)	(1)	(1)	nur im Tonstein < 10 ka relevant, da hierdurch Beschädigung des Behälters (wichtige Barriere) verhindert wird
16	Geomechanische Stabilisie- rung: Begrenzung der Auflo- ckerung des konturnahen Wirtsgesteins		(3)	(3)	(1)	(1)	Nur < 10 ka bis zum Abschluss der Konvergenz relevant
17	Temperaturbegren- zung/Integritätserhalt: Ablei- tung der Zerfallswärme in das Wirtsgestein		(4)	(3)	(1)	(1)	< 10 ka Zerfallswärme hoch, Tonstein: Temperaturempfindlichkeit hoch, Salz: Temperaturempfindlichkeit geringer > 10 ka Zerfallswärme niedrig; Tonstein und Salz: Temperaturleitfähigkeit wie ewG

Lfd. Nr. SF/ Teilsystem/ Komponente	Integritätserhaltende Si- cherheitsfunktion (ISF) (Für Endlagersystemvergleich nicht relevant, daher Rangzahlen in Klammern)	Radionuklidrückhaltende Sicherheitsfunktion (RSF)	Relevanz Ordinale Rangzahlen: 1: keine Relevanz bis 5: sehr hohe Relevanz ("unver- zichtbar")				Beitrag der SF zum Radionuklidein- schluss über den Nachweiszeitraum
			< 10 ka		> 10 ka		
ELB			Ton- stein	Salz	Ton- stein	Salz	Begründung
Versatzmaterial							
19		Begrenzung/Verhinderung von Lösungsbewegung und Radio- nuklidtransport	3	3	5	5	Im Zeitraum <10.000 a weniger relevant, da der Versatz seine einschlusswirksamen Eigenschaf- ten erst entwickelt, für die Zeitphase >10.000 Jahre sehr relevant (primäre Sicherheitsfunkti- on), da der Versatz aus wirtsgesteinsähnlichen Materialien besteht und von dauerhafter Ein- schlusswirksamkeit ausgegangen werden kann
20		Begrenzung der Radionuklidaus- breitung aufgrund von Löslich- keitsgrenzen	3	2	3	2	Wahl des Versatzmaterials richtet sich in erster Linie nach den Anforderungen aus SF Nr. 19. So- fern hierbei Alternativen bestehen, sollte den Anforderungen der SF Nr. 20 Rechnung getragen werden
21		Verzögerung der Radionukli- dausbreitung durch Sorption	5	1	5	1	Im Salz nicht relevant; Tonstein: über die gesam- te Betrachtungszeit relevant, da ELB-Versatz zu den wirtsgesteinsähnlichen Materialien zählt und von dauerhafter Wirksamkeit ausgegangen werden kann

Lfd. Nr. SF/ Teilsystem/ Komponente	Integritätserhaltende Si- cherheitsfunktion (ISF) (Für Endlagersystemvergleich nicht relevant, daher Rangzahlen in Klammern)	Radionuklidrückhaltende Sicherheitsfunktion (RSF)	Relevanz Ordinale Rangzahlen: 1: keine Relevanz bis 5: sehr hohe Relevanz ("unver- zichtbar")				Beitrag der SF zum Radionuklidein- schluss über den Nachweiszeitraum
			< 10 ka		> 10 ka		
Abdich- tung/Damm			Ton- stein	Salz	Ton- stein	Salz	
23	Geomechanische Stabilisie- rung: Begrenzung der Auflo- ckerung des konturnahen Wirtsgesteins		(5)	(5)	(1)	(1)	Nur < 10 ka bis zum Auflaufen der Konvergenz relevant
24	Geomechanische Stabilisie- rung: Mechanische Lastauf- nahme (Gas- und Fluiddrücke, sowie des Bentonitquelldrü- ckes des Versatzes (Tonstein- konzept))		(5)	(5)	(2)	(1)	< 10 ka: Integritätserhalt der primären Sicher- heitsfunktion wesentlich, > 10 ka Versatz ist wirksam und löst den Damm in der Wirksamkeit ab
26		Begrenzung/Verhinderung von Lösungsbewegung und Radio- nuklidtransport	5	5	3	1	Primäre Sicherheitsfunktion, hohe Relevanz ins- besondere im Zeitraum < 10.000 Jahre. Bei Ton- stein auch später (mäßig) relevant, da Abdich- tungen aus wirtsgesteinsähnlichen Materialien bestehen und von dauerhafter Wirksamkeit aus- gegangen werden kann; Steinsalz: in der zweiten Phase ist der Versatz wirksam und löst den Damm in der Sicherheitswirkung ab, daher we- niger relevant
27		Verzögerung der Radionukli- dausbreitung durch Sorption	3	1	3	1	Im Steinsalz nicht relevant; Tonstein: über die gesamte Betrachtungszeit re- levant, da Streckenabdichtungen aus wirtsge- steinsähnlichen Materialien bestehen und von dauerhafter Wirksamkeit ausgegangen werden kann, Sorption ist konzeptionell allerdings nur eine sekundäre Anforderung

Lfd. Nr. SF/ Teilsystem/ Komponente	Integritätserhaltende Si- cherheitsfunktion (ISF) (Für Endlagersystemvergleich nicht relevant, daher Rangzahlen in Klammern)	Radionuklidrückhaltende Sicherheitsfunktion (RSF)	Relevanz Ordinale Rangzahlen: 1: keine Relevanz bis 5: sehr hohe Relevanz ("unver- zichtbar")				Beitrag der SF zum Radionuklidein- schluss über den Nachweiszeitraum
			< 10 ka		> 10 ka		
Endlagerberg- werk			Ton- stein	Salz	Ton- stein	Salz	
Streckenversatz							
29	Geomechanische Stabilisie- rung: Begrenzung der Auflo- ckerung des konturnahen Wirtsgesteins		(3)	(3)	(1)	(1)	Nur < 10 ka bis zum Auflaufen der Konvergenz relevant
30	Geomechanische Stabilisie- rung: Schutz der Hangenden Schichten vor der Bildung von sekundären Wegsamkeiten		(3)	(3)	(3)	(3)	über beide Phasen: Stabilisierung und Reduzie- rung der Verformungsbewegungen des Wirtsges- teins
31		Begrenzung/Verhinderung von Lösungsbewegung und Radio- nuklidtransport	3	3	5	5	Im Zeitraum <10.000 a weniger relevant, da der Versatz seine einschlusswirksamen Eigenschaf- ten erst entwickelt, für die Zeitphase >10.000 Jahre sehr relevant (primäre Sicherheitsfunkti- on), da der Versatz aus wirtsgesteinsähnlichen Materialien besteht und von dauerhafter Ein- schlusswirksamkeit ausgegangen werden kann
33		Verzögerung der Radionukli- dausbreitung durch Sorption	5	1	5	1	Im Salz nicht relevant; Tonstein: über die gesamte Betrachtungszeit re- levant, da Streckenversatz zu den wirtsgesteins- ähnlichen Materialien zählt und von dauerhafter Wirksamkeit ausgegangen werden kann

Lfd. Nr. SF/ Teilsystem/ Komponente	Integritätserhaltende Si- cherheitsfunktion (ISF) (Für Endlagersystemvergleich nicht relevant, daher Rangzahlen in Klammern)	Radionuklidrückhaltende Sicherheitsfunktion (RSF)	Relevanz Ordinale Rangzahlen: 1: keine Relevanz bis 5: sehr hohe Relevanz ("unver- zichtbar")				Beitrag der SF zum Radionuklidein- schluss über den Nachweiszeitraum
			< 10 ka		> 10 ka		
Endlagerberg- werk			Ton- stein	Salz	Ton- stein	Salz	
Abdichtung des ewG nach Au- ßen	(Schachtverschlüsse und Stre- ckenabdichtungen zum Infra- strukturbereich Gorleben)						
38	Geomechanische Stabilisie- rung: Begrenzung der Auflo- ckerung des konturnahen Wirtsgesteins		(5)	(5)	(1)	(1)	< 10 ka sehr relevant, da Barrieren aus wirtsgesteinsähnlichem Material noch keine vollständige Isolationswirkung entfaltet haben, und durch die vorliegende Sicherheitsfunktion die Integrität der hydraulischen Widerstandswirkung gewährleistet ist; >10 ka: weniger relevant, da Konvergenz aufge- laufen ist. Weiterhin ist der Einschluss durch wirtsgesteinsähnliche Barrieren gegeben. Über- dies ist Haltbarkeitsnachweis von Schachtab- dichtungen i.d.R. auf ca. 30.000 a begrenzt bzw. die Haltbarkeit von Streckenabdichtungen (Gor- leben) nicht vollständig gesichert (Korrosion etc.)
40	Geomechanische Stabilisie- rung: Mechanische Lastauf- nahme (Gas- und Fluiddrücke)		(5)	(5)	(1)	(1)	< 10 ka sehr relevant, da Barrieren aus wirtsgesteinsähnlichem Material noch keine vollständige Isolationswirkung entfaltet haben, und durch die vorliegende Sicherheitsfunktion die Integrität der hydraulischen Widerstandswirkung gewährleistet ist; >10 ka: weniger relevant, da Einschluss durch wirtsgesteinsähnliche Barrieren gegeben, über- dies ist Haltbarkeitsnachweis von Schachtab- dichtungen i.d.R. auf ca. 30.000 a bzw. die Halt- barkeit von Streckenabdichtungen (Gorleben) nicht vollständig gesichert (Korrosion etc.)

Lfd. Nr. SF/ Teilsystem/ Komponente	Integritätserhaltende Si- cherheitsfunktion (ISF) (Für Endlagersystemvergleich nicht relevant, daher Rangzahlen in Klammern)	Radionuklidrückhaltende Sicherheitsfunktion (RSF)	Relevanz Ordinale Rangzahlen: 1: keine Relevanz bis 5: sehr hohe Relevanz ("unver- zichtbar")				Beitrag der SF zum Radionuklidein- schluss über den Nachweiszeitraum
			< 10 ka		> 10 ka		
Endlagerberg- werk			Ton- stein	Salz	Ton- stein	Salz	
Abdichtung des ewG nach Au- ßen	(Schachtverschlüsse und Stre- ckenabdichtungen zum Infra- strukturbereich Gorleben)						
41		Begrenzung/Verhinderung von Lösungsbewegung und Radio- nuklidtransport	5	5	1	1	< 10 ka sehr relevant, da Barrieren aus wirtsgesteinsähnlichem Material noch keine vollständige Isolationswirkung entfaltet haben, >10 ka: wenig bzw. nicht relevant , da Einschluss durch wirtsgesteinsähnliche Barrieren gegeben, überdies ist Haltbarkeitsnachweis von Schachtabdichtungen i.d.R. auf ca. 30.000 a begrenzt bzw. die Haltbarkeit von Streckenabdichtungen (Gorleben) nicht vollständig gesichert (Korrosion etc.)
42		Verzögerung der Radionukli- dausbreitung durch Sorption (Bentonitabdichtung)	3	1	3	1	Im Salz nicht relevant; < 10 ka relevant, da Barrieren aus wirtsgesteinsähnlichem Material noch keine vollständige Isolationswirkung entfaltet haben, Sorption ist konzeptionell allerdings nur eine sekundäre Anforderung >10 ka: weniger relevant , da Einschluss durch wirtsgesteinsähnliche Barrieren gegeben, überdies ist Haltbarkeitsnachweis von Schachtabdichtungen i.d.R. auf ca. 30.000 a begrenzt bzw. die Haltbarkeit von Streckenabdichtungen (Gorleben)nicht vollständig gesichert (Korrosion etc.) begrenzt, Sorption an Beton begrenzt

Lfd. Nr. SF/ Teilsystem/ Komponente	Integritätserhaltende Si- cherheitsfunktion (ISF) (Für Endlagersystemvergleich nicht relevant, daher Rangzahlen in Klammern)	Radionuklidrückhaltende Sicherheitsfunktion (RSF)	Relevanz Ordinale Rangzahlen: 1: keine Relevanz bis 5: sehr hohe Relevanz ("unver- zichtbar")				Beitrag der SF zum Radionuklidein- schluss über den Nachweiszeitraum	
			< 10 ka		> 10 ka			Begründung
			Ton- stein	Salz	Ton- stein	Salz		
ewG								
45	Geomechanische Stabilisie- rung: Mechanische Lastauf- nahme Gas- und Fluiddrücke bzw. des Bentonitquelldruckes (Tonstein)		(5)	(5)	(1)	(1)	Gasdruck in HAW-Endlagern geomechanisch be- herrschbar, Bildung von Gaswegsamkeiten im Mikrobereich, Bentonitquelldruck in der Phase < 10 ka relevant aber nur auf Saumzone wirksam, (Tonstein ewG kann nicht durch Quelldruck durchgehend beschädigt werden)	
46	Geomechanische Stabilisie- rung: Mechanische Lastauf- nahme von Gebirgsspannungen		(4)	(4)	(4)	(4)	Für den gesamten Nachweiszeitraum wesentlich zur Gewährleistung der Eigenschaften des ewG	
47	Geomechanische Stabilisie- rung: Mechanischer Schutz der technischen Abdichtungen		(5)	(5)	(1)	(1)	Nur < 10 ka relevant, da Wirtsgestein - material- fremde Abdichtungen sicherheitsrelevant, > 10 ka: nur Wirtsgestein-materialähnliche Barrie- ren relevant, diese weisen ähnliche Festigkeits- eigenschaften wie Wirtsgestein auf und bedür- fen daher keines besonderen Schutzes	
48	Temperaturbegrenzung / Integ- ritätserhalt: Schadloose Auf- nahme der Zerfallswärme		(3)	(2)	(2)	(1)	Generell nur auf Saumzone beschränkt, auf- grund hoher Zerfallswärme insb. im Tonstein in der Phase < 10 ka relevant	
49		Begrenzung/Verhinderung von Lösungsbewegung und Radio- nuklidtransport	5	5	5	5	primäre Sicherheitsfunktion für den gesamten Nachweiszeitraum	
52		Verzögerung der Radionukli- dausbreitung durch Sorption	5	1	5	1	Salz: nicht gegeben, Tonstein: primäre Sicherheitsfunktion neben hydraulischer Isolationswirkung (SF 49), bei frü- her Freisetzung auch < 10 ka	

Lfd. Nr. SF/ Teilsystem/ Komponente	Integritätserhaltende Si- cherheitsfunktion (ISF) (Für Endlagersystemvergleich nicht relevant, daher Rangzahlen in Klammern)	Radionuklidrückhaltende Sicherheitsfunktion (RSF)	Relevanz Ordinale Rangzahlen: 1: keine Relevanz bis 5: sehr hohe Relevanz ("unver- zichtbar")				Beitrag der SF zum Radionuklidein- schluss über den Nachweiszeitraum
			< 10 ka		> 10 ka		
Weiteres Wirts- gestein			Ton- stein	Salz	Ton- stein	Salz	
54	Integritätserhalt des ewG: Schutz des ewG vor Erosion und Subrosion		(2)	(2)	(5)	(5)	< 10 ka : wg. nicht zu unterstellender externer Einflüsse weniger relevant, > 10 ka: je nach Tiefenreichweite externer Ein- flüsse extrem relevant
55	Geomechanische Stabilisie- rung: mechanische Lastauf- nahme von Gebirgsspannungen (z.B. bei Eisauflast)		(1)	(1)	(3)	(3)	< 10 ka: keine wesentlichen Wechsel in den Be- anspruchungen zu erwarten, > 10 ka: wg. Eisüberfahung relevant, allerdings wirkt ewG ebenfalls
X1		Begrenzung/Verhinderung von Lösungsbewegung und Radio- nuklidtransport	-	-	-	-	Keine Sicherheitsfunktion , da konzeptionelle Anforderungen bzgl. der Isolationswirkung des Endlagersystems auf den ewG beschränkt sind. SF können aber bei Freisetzungen, die aus wenig wahrscheinlichen Szenarien resultieren, als Si- cherheitsreserve angesehen werden.
X2		Begrenzung/Verzögerung eines Lösungszutritts zum ewG	-	-	-	-	
X3		Verzögerung der Radionukli- dausbreitung durch Sorption	-	-	-	-	

Lfd. Nr. SF/ Teilsystem/ Komponente	Integritätserhaltende Si- cherheitsfunktion (ISF) (Für Endlagersystemvergleich nicht relevant, daher Rangzahlen in Klammern)	Radionuklidrückhaltende Sicherheitsfunktion (RSF)	Relevanz Ordinale Rangzahlen: 1: keine Relevanz bis 5: sehr hohe Relevanz ("unver- zichtbar")				Beitrag der SF zum Radionuklidein- schluss über den Nachweiszeitraum	
			< 10 ka		> 10 ka			Begründung
			Ton- stein	Salz	Ton- stein	Salz		
60	Integritätserhalt des ewG: Schutz des ewG vor Erosion und Subrosion		(1)	(1)	(5)	(5)	< 10 ka wg. mangelnder externer Einflüsse nicht relevant, danach je nach Tiefenreichweite externer Einflüsse extrem relevant	
61	Geomechanische Stabilisie- rung: mechanische Lastauf- nahme von Gebirgsspannungen (z.B. bei Eisauflast)		(1)	(1)	(3)	(3)	< 10 ka wg. mangelnder externer Einflüsse nicht relevant, danach mäßig relevant je nach Abstand OK ewG - GOK	
X4		Begrenzung des Radionuklid- transports durch geringe Perme- abilität	-	-	-	-	Keine Sicherheitsfunktion, sondern zusätzliche Sicherheitswirkung, keine konzeptuellen Anforderungen, daher hinsichtlich zeitlicher Wirksamkeit und Isolationswirkung nicht sicher zu prognostizieren, somit untergeordnete Relevanz	
X5		Verzögerung der Radionukli- dausbreitung durch Sorption	-	-	-	-		
X6		Verzögerung der Radionukli- dausbreitung durch Ausbildung einer mineralisationsbedingten Dichteschichtung	-	-	-	-		
X7		Verdünnung von Radionuklid- konzentrationen durch Zumi- schung von nichtkontaminierten Grundwässern	-	-	-	-		
X8		Verzögerung der Radionukli- dausbreitung durch Kolloidfilte- rung	-	-	-	-		

15.3 **Anhang 3: Ergebnisse der globalen Standortcharakterisierung**
(zu Verfahrensschritt 4, s. Kap. 10).

Quellen: a) /BfS 07/, b) /AKE 02/, c) /NAG 02/, d) /GRS 10a/, e) /GRS 10c/, f) /BGR 03/

Schritt 1: Zusammenstellung der geologischen Standortgegebenheiten				
A) Wirtsgestein	Bewertungsgrößen	Bewertungsmaßstab (konzeptionelle Anforderung)	Generischer Tonsteinstandort	Steinsalzstandort Gorleben
1. Definition, geometrische Abmessungen, Teufenlage				
Begrenzungen a) ins Hangende b) ins Liegende c) Lateral	- (deskriptiv) Angabe der lithologischen Grenzen	-	Tonsteinfolgen des Barreme-Apt Hangend begrenzt durch Unterkante Fischschiefer Liegend begrenzt durch Tonschiefer des Berrias-Valangin	Hauptsalz der Staßfurtserie (z2HS) Hangend begrenzt durch Salzspiegel Liegend begrenzt durch Rotliegendes (?) lateral begrenzt durch Hangendsalz (z2HG)
Niveau Oberkante	[m unter Flur]	Einige hundert Meter ^{b)}	250	160 - 340 (Salzspiegel)
Niveau Unterkante	[m unter Flur]	-	685	> 1300 m (genaue Lage der Liegendgrenze unbekannt)
Vertikale Mächtigkeit	[m]	Tonstein > 200 ^{a)} Salinar söhlig > 300 Salzstock über dem Endlager > 300	435	> 1000 m (genaue Lage der Liegendgrenze unbekannt)
Horizontale Ausdehnung	Flächenhafte Ausdehnung bei gegebener Mächtigkeit [Vielfaches des Mindestflächenbedarfs (z. B. für Salz 3 km ² und Ton 10 km ²)]	> 2-fach ^{b)}	Keine Aussage möglich, da fiktiver Standort. Reale Analogie weisen jedoch eine Verbreitung auf die ein Vielfaches der geforderten Mindestverbreitung auf	Ca. 3 km ² (in Endlagertiefe)

A) Wirtsgestein	Bewertungsgrößen	Bewertungsmaßstab (konzeptionelle Anforderung)	Generischer Tonsteinstandort	Steinsalzstandort Gorleben
2a) Materialeigenschaften (Rückhaltung)				
Charakteristische Gebirgsdurchlässigkeit	effektive hydraulische Durchlässigkeit [m/s]			
	vertikal	$< 10^{-12}$ a), c)	$2 \cdot 10^{-14}$	$< 10^{-21e)}$
	horizontal	$< 10^{-11}$ a), c)	$1 \cdot 10^{-13}$	$< 10^{-21 e)}$
Verhältnis aus Gebirgs- und Gesteinsdurchlässigkeit	repräsentative Gebirgsdurchlässigkeit/ repräsentative Gesteinsdurchlässigkeit [-]	< 10 b)	k.A.	ca. 1
Gesamtporosität	Gesamtporosität [-]	$\sim 0,3$ a), c)	0,07 – 0,18	$< 0,01$
Effektive Porosität	Durchflusswirksame Porosität [-]	$< 0,15$ a), c)	0,12	-
Diffusionswirksame Porosität	Diffusionswirksame Porosität [-]			
	Kationen	$< 0,15$ a), c)	0,12	$< 0,01$
	Anionen	$< 0,05$ a), c)	0,07	$< 0,01$
Charakteristischer Diffusionskoeffizient	Porendiffusionskoeffizient [m ² /s]	Diffusionsgeschwindigkeit größer als advective Transportgeschwindigkeit		
	- Kationen vertikal / horizontal	Dp: $< 10^{-11}$ a), c)	Dp: $10^{-11} / 5 \cdot 10^{-11}$	Dp: $< 10^{-21}$
	- Anionen vertikal / horizontal	Dp: $< 10^{-12}$ a), c)	Dp: $10^{-12} / 5 \cdot 10^{-12}$	Dp: $< 10^{-21}$
Sorptionsseigenschaften	Kd-Wert für langzeitrelevante Radionuklide [m ³ /kg]: Uran, Protactinium, Thorium, Plutonium, Neptunium, Zirkonium, Technetium, Palladium, Jod, Cäsium, Chlor	$\geq 0,001$ b), c)	Siehe c)	vernachlässigbar
	Anteil Mineralphasen mit großer reaktiver Oberfläche Tonminerale, Fe- und Mn-Hydroxide und -Oxihydrate [% oder kg/m ³]	Möglichst hoch ^{c)}		vernachlässigbar
	Kationenaustauschkapazität [meq/kg]	Möglichst hoch ^{c)}	106	vernachlässigbar

A) Wirtsgestein	Bewertungsgrößen	Bewertungsmaßstab (konzeptionelle Anforderung)	Generischer Tonsteinstandort	Steinsalzstandort Gorleben
2b) Materialeigenschaften (Geomechanik)				
Regionalgeomechanische Situation	Großräumige horizontale Einspannung des Wirtsgesteins (Gebirge wirkt geomechanisch als Haupttragelement)	gering ^{c)} mäßig hoch	k.A.	k.A.
Ausbildung einer konturnahen entfestigten Saumzone	Ausdehnung der Auflockerungszone [m]	<1,6·R (2m)	k.A.	k.A.
Durchlässigkeit einer konturnahen entfestigten Saumzone	Durchlässigkeit [m/s] Lateral transversal	Ca. 10-fach gegenüber unverritztem Gebirge	k.A.	k.A.
Neigung zur Ausbildung mechanisch induzierter Sekundärpermeabilitäten außerhalb einer konturnahen entfestigten Saumzone um die Endlagerhohlräume	maximal mögliche Teufe in Abhängigkeit von der Gebirgsdruckfestigkeit, die ein Ela ohne Ausbau zulässt	gering ^{b)} mäßig hoch	k.A.	k.A.

A) Wirtsgestein	Bewertungsgrößen	Bewertungsmaßstab (konzeptionelle Anforderung)	Generischer Tonsteinstandort	Steinsalzstandort Gorleben
2b) Materialeigenschaften (Geomechanik)				
Dilatanz, Festigkeit	Dilatanzfestigkeit [MPa]:	k.A.	k.A.	k.A.
	Zugfestigkeit [MPa]:	k.A.	k.A.	k.A.
	Bruchfestigkeit [MPa]:	k.A.	k.A.	k.A.
	Einaxiale Druckfestigkeit (// zur Schichtung): [MPa]:	k.A.	22,3 - 33,7	k.A.
	Einaxiale Druckfestigkeit (⊥ zur Schichtung): [MPa]:	k.A.	23,7 – 36,9	k.A.
	E-Modul [GPa]:	k.A.	18,9 – 33,0	k.A.
	Poisson-Zahl:	k.A.	0,27 – 0,31	k.A.
	Quelldruck [MPa]:	k.A.	0,1 – 1,4	k.A.
	Wassergehalt gesamt [%]:	k.A.	14,6	k.A.
	Porenwasserdruck [MPa]:	k.A.	k.A.	k.A.
	Elastizität:	k.A.	k.A.	k.A.
	Deformationsverhalten:	k.A.	k.A.	k.A.
	Konsolidierung/Kompaktion:	k.A.	k.A.	k.A.
	Kompressionsmodul:	k.A.	k.A.	k.A.
Geomechanische Reversibilität (Selbstheilungsvermögen)	Duktilität des Gesteins	hoch ^{b)} mäßig gering	k.A.	k.A.
	Rückbildung der Sekundärpermeabilität	Gegeben ^{b)} Nicht Gegeben	k.A.	k.A.
	Rissbildung Rissverheilung	Gegeben ^{b)} Nicht Gegeben	Gegeben Verheilung aufgrund hoher Smektitanteil (31%)	k.A.

A) Wirtsgestein	Bewertungsgrößen	Bewertungsmaßstab (konzeptionelle Anforderung)	Generischer Tonsteinstandort	Steinsalzstandort Gorleben
3a) Charakterisierbarkeit (incl. Upscaling)				
Tonstein	Fazielle Sedimentationsbedingungen: Vollmarine, landferne Beckenbildung ohne Deltaschüttungen, geringe Sedimentationsrate	gegeben teilweise gegeben nicht gegeben	gegeben	
	Syn- und postgenetische tektonische Beanspruchung: Mächtigkeitsschwankungen, Schieferung, Illitisierungsgrad, Inkohlungsgrad	gering mäßig hoch	gering	
Steinsalz	Komplexität des Internaufbaus: starke bis chaotische Verwirkung unterschiedlicher Evaporitserien, steil stehende Evaporite höherer Permeabilität, zerblockte und ggf. dislokierte Anhydritserien	gering mäßig hoch		mäßig
	Komplexität der Randsenkentektonik: starke Verschleppung des Flankengesteins, intensive Zerblockung des Nebengesteins, starke Mächtigkeitsschwankungen synhalotektonischer Schichtenfolgen	gering mäßig hoch		mäßig
	Einwirkungen klimatische Einflüsse in der Vergangenheit: Ablaugung, Rinnenbildung etc. (Komplexitätserhöhende Strukturen)	gering mäßig hoch		mäßig
	Anwesenheit von konaten Laugeneinschlüssen	keine vereinzelt, häufig		keine bis vereinzelt

A) Wirtsgestein	Bewertungsgrößen	Bewertungsmaßstab (konzeptionelle Anforderung)	Generischer Tonsteinstandort	Steinsalzstandort Gorleben
3b) Prognostizierbarkeit				
Tonstein	Diagenetischer Reifegrad: Hoher Illitisierungsgrad, große Überlagerungsmächtigkeit, geringer Porenwasser-gehalt, niedrige Gesamtporosität	hoch mäßig gering	hoch	
Steinsalz	Mächtigkeit der rezenten Salzvorlage: (geringe Mächtigkeit limitiert Reaktivierung der Halokinese)	gering mäßig hoch		gering
	Dislokationsverhalten von konaten Laugeneinschlüssen	gering mäßig hoch		gering
3c) vorhandener Kenntnisstand, Explorationstiefe				
Vorhandener Kenntnisstand	Regionalgeologischer Erkundungsgrad: z.B. aufgrund von Ressourcenexploration, Alter und Qualität des geologischen und hydrogeologischen Kartenwerks, gut untersuchte geologische Analoga	hoch mäßig gering	mäßig	hoch
Explorationstiefe	Anzahl, Teufe und Lage von Bohrungen Geophysikalische Erkundung: Art, Auflösungsgenauigkeit, Ansatzpunkte Untertageaufschlüsse	gering mäßig hoch	mäßig	hoch

B) Einschlusswirksamer Gebirgsbereich	Bewertungsgrößen	Bewertungsmaßstab (konzeptionelle Anforderung)	Generischer Tonsteinstandort	Steinsalzstandort Gorleben
2. Geometrische Abmessungen und Teufenlage				
Niveau Oberkante ¹⁾	[m unter Flur]	> größte Bemessungstiefe externer Einwirkungen (> 350)	310	790
Niveau Unterkante ¹⁾	[m unter Flur]	Robustheitsmaß	590	910
Vertikale Mächtigkeit (gemessen ab ELA-Bergwerk, je Richtung)	[m]	Tonstein je <150 Salinar je ~ 50	130	50
Laterale Ausdehnung-(gemessen ab ELA-Bergwerk je Richtung)	[m]	Tonstein je < 250 Salinar je ~ 50	ca. 250	50
Vertikale Mächtigkeit des anschließenden Wirtsgesteins (gemessen ab Außenkante ewG)	ins Hangende [m] ins Liegende [m]	Robustheitsmaß	60	450 - 630
Laterale Ausdehnung-des anschließenden Wirtsgesteins (gemessen ab Außenkante ewG)	Nach N, S,W, E [m]	Robustheitsmaß	Keine Aussage möglich, da fiktiver Standort. Reale Analoga weisen jedoch eine Verbreitung auf, die ein Vielfaches der Mächtigkeit beträgt	> 50

¹⁾ Unter Einbezug einer Mächtigkeit der Auffahrungen einschl. der Auflockerungszone von insg. 20 m.

Schritt 2: Zusammenstellung der regionalhydrogeologischen Standortgegebenheiten				
1) Hydraulische Bedingungen (Tonsteinstandort)	Bewertungsgrößen	Bewertungsmaßstab (konzeptionelle Anforderung)	Generischer Tonsteinstandort	Steinsalzstandort Gorleben
Vertikales hydraulisches Potenzial über den ewG	Spezifischer hydraulischer Gradient (bei Gebirgsdurchlässigkeit 10^{-12} m/s und effektiver Porosität 0,1)	$\ll 10^{-2}$ ^{b)}	0,0085 ^{d)}	
Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers im ewG	Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers [mm/a]	$< 0,1$ ^{b)}	< 0.03 ^{d)}	
Grundwasseralter im ewG	[a]	conat ($< 10^6$ a)	Keine Aussage möglich (fiktiver Standort)	
Grundwasseralter im Wirtsgestein	[a] indirektes Maß für Abstandsgeschwindigkeit	Hoch > 1 Ma mäßig ~ einige 100 ka gering ~ einige ka	Keine Aussage möglich (fiktiver Standort)	
Hydraulische Wirkung benachbarter Störungen (Tonstein)	Günstig: Ableitung hydrodynamischen Druckes, Verringerung des hydraulischen Gradienten in gespannten Systemen Ungünstig: Erhöhung der Abstandsgeschwindigkeit im Wirtsgestein	Günstig keine Auswirkung ungünstig	Keine Aussage möglich (fiktiver Standort)	
2. Hydrochemische Bedingungen				
Mineralisation des Grundwassers in Wirtsgestein (Tonstein)	Ionenstärke und hydrochemische Zusammensetzung	Günstige hydrochemische Bedingungen lt. AKEnd	Keine Aussage möglich (fiktiver Standort)	
Mineralisation des Grundwassers an der Oberkante des Wirtsgesteins (insb. Steinsalz, hier auch hydrochemische Zusammensetzung relevant)	Ionenstärke und hydrochemische Zusammensetzung	Günstige hydrochemische Bedingungen lt. AKEnd	Keine Aussage möglich (fiktiver Standort)	günstig
Salinitätsverteilung im Deckgebirge	Konzentrationsgradient: : Ausgeprägte Salinitätsschichtung weist auf geringen advektiven Transport hin	deutlich mäßig gering	Keine Aussage möglich (fiktiver Standort)	deutlich
Aktuelle Subrosionsrate (Steinsalz)	[mm/a]	hoch mäßig gering		0,01 ^{f)} (gering)

Schritt 3: Zusammenstellung interner und externer Einwirkungen auf die Integrität des ewG				
1) Interne Einwirkungen	Bewertungsgrößen	Bewertungsmaßstab (konzeptionelle Anforderung)	Generischer Tonsteinstandort	Steinsalzstandort Gorleben
Druckeinfluss	Bei maximal vorstellbarem Gasdruck (z.B. in Relation zum lithostatischen Druck)	Gaseindringdruck zur Bildung von Sekundärpermeabilitäten		
	Druckfestigkeit der Gesteine im ewG [MPa/m ²]		Einaxiale Druckfestigkeit 22,3 - 33,7 MPa	
	Sekundäre Gasdurchlässigkeit nach Überschreiten des lithostatischen Druckes ¹⁾	< 10 ⁻⁹ ?		
Temperatureinfluss	Maximaltemperatur am Kontaktbereich zum Gestein des ewG			
	Maximal zulässige Temperatur des Wirtsgesteins im Einlagerungsbereich	Tonstein < 100°C Steinsalz < 200°C	< 100	< 200
	Thermisch bedingte Sekundärpermeabilität um die Einlagerungshohlräume [m] ²⁾	< 10 ⁻⁹	Nicht relevant	Nicht relevant
2) Externe Einwirkungen				
Klimatisch bedingte Einflüsse (bezogen auf Vorgänge der letzten 1 Mio. Jahre in Norddeutschland)	Maximale Subrosionsrate (Steinsalz) [mm/a] ³⁾			0,2 ^{f)}
Klimatisch bedingte Einflüsse (bezogen auf Vorgänge der letzten 1 Mio. Jahre in Norddeutschland)	Maximale Einwirktiefe kryogener Risse (Steinsalz) [m] ³⁾ (mit Auswirkungen auf die hydraulische Leitfähigkeit)	gering mäßig (bis ca. 300m) hoch (>300m)		ca. 100 ^{f)}
	Halokinetische Vorgänge aufgrund von Eisauflast (Steinsalz)	möglichst gering z.B. wg. geringer Salzvorlagen		gering
	Maximale Tiefe von Erosionsrinnen [m] ³⁾	gering mäßig hoch	350 ³⁾	350 ³⁾

¹⁾ Nicht relevant, wenn der maximal vorstellbare Gasdruck im Endlager deutlich unterhalb des lithostatischen Druckes liegt

²⁾ Nicht relevant, wenn die maximale Temperatur am Kontaktbereich zum Gestein des ewG deutlich tiefer liegt als die maximale Temperaturverträglichkeit der Gesteine im ewG

³⁾ Festlegung innerhalb des Vorhabens VerSi. Maximale klimatisch bedingte Einwirktiefe bestimmt Mindestteufe der Oberkante des ewG (siehe Schritt 1, B 1.)

Umfang eines übertägigen Untersuchungsprogramms für den Tonsteinstandort nach /BfS 09/

	Abzuprüfendes Kriterium	Erkundungsmaßnahme	[Stk]	[m]
A	Geowissenschaftliche Erkundungsmaßnahmen zur Abprüfung der Abwägungskriterien nach AkEnd (2002)			
A 1	Anforderung: Kein oder langsamer Transport durch Grundwasser im Endlagerniveau			
A 1.1	Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers [mm/a]	Entfällt, da keine messbare Strömung		
A 1.2	Gebirgsdurchlässigkeit [m/s]	Hydraulische Tests (Packertests): je 2 Tests in 5 Bohrungen	2	
		Laboruntersuchungen zur Permeabilität an Bohrkernen Bericht zu Laboruntersuchungen	2 1	
A 1.3	Effektiver Diffusionskoeffizient [m ² /s]	Laboruntersuchungen an Bohrkernen (Nebenprodukt: Porositäten), auch Proben aus dem EG	9	
		Bericht zu Laboruntersuchungen	1	
A 2	Anforderung: Günstige Konfiguration von Wirtsgestein und einschlusswirksamem Gebirgsbereich			
A 2.1	Barrierenmächtigkeit [m]	Bohrungen , abgedeckt durch A 2.2 2-D-Seismik (Aussagegebiet 10 km ²), abgedeckt durch A 2.4		
A 2.2	Grad der Umschließung des Wirtsgesteins durch einschlusswirksamen Gebirgsbereich	5 Bohrungen (Teufe 600 m, alle Bohrungen gekernt im EG und WG, sowie eine Bohrung vollständig gekernt) Geologische und bohrtechnische Bauleitung und Infrastruktur (Camp, Spülungsservice, Labor, bergrechtliche Überwachung)		
		Bohrarbeiten, gekernt		560
		Bohrarbeiten, gemeißelt		40
		Geologische Begleitung/Überwachung Bohrvorgang am Gerät, incl. geol. Bearbeitung Bohrungen und Berichte		
		Bohrlochgeophysik incl. VSP		600
		Berichte zur Bohrlochgeophysik	1	
A 2.3	Teufe der oberen Begrenzung des erforderlichen einschlusswirksamen Gebirgsbereichs [m unter Gelände]	Bohrungen , abgedeckt durch A 2.2 2-D-Seismik , abgedeckt durch A 2.4		
A 2.4	Flächenhafte Ausdehnung bei gegebener Mächtigkeit	2-D-Seismik , Fläche ca. 10 x 15 km = ca. 150 km ² , Profilabstände ca. 1500 m, ergibt 200 km Profil, Genehmigungen ("Permitting"), Bauleitung		
		Messung		200.000
		Processing		200.000
		Geol. Interpretation (Bericht)		
A 2.5	Spezifischer hydraulischer Gradient	Hydraulische Tests : je 4 Tests in 5 Bohrungen für Potenzialbestimmungen, Erweiterung der Tests unter A 1.2 um Potenzialbestimmungen	4	

Umfang eines übertägigen Untersuchungsprogramms für den Tonsteinstandort nach /BfS 09/ (Fortsetzung)

A 3 Anforderung: Gute räumliche Charakterisierbarkeit				
A 3.1	Räumliche Verteilung der Eigenschaften der Gesteine des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs	Bohrungen (600 m Teufe), abgedeckt durch A 2.2 (Schwerpunkt der Begründung für Bohrungen liegt hier), Literaturlauswertung, Datenrecherche		
A 3.2	Ausmaß der tektonischen Überprägung der geologischen Einheit	3-D-Seismik (Aussagegebiet 10 km²; Messgebiet: 36 km², Profilabstand ca. 180 m)		
		Vorstudie	1	
		Genehmigungen ("Permitting"), Bauleitung		
		Messung [km²]		36
		Processing [km²]		36
		Geol. Interpretation (Bericht)		
A 3.3	Gesteinsausbildung (Fazies)	Geol. Bearbeitung Bohrungen im EG und WG, ergänzt durch A 2.2	5	400
A 4 Anforderung: Gute Prognostizierbarkeit				
A 4.1	Veränderung der Merkmale "Mächtigkeit", "Ausdehnung" und "Gebirgsdurchlässigkeit"	Literaturlauswertung, ergänzt durch C.1		
A 5 Anforderung: Günstige gebirgsmechanische Voraussetzungen				
A 5.1	Lagebezug der Endlagerteufe zur Kurve für die max. mögliche Teufe in Abhängigkeit von der Gebirgsdruckfestigkeit	Hydro-Frac: 5 Tests in jeder Bohrung, unter Nutzung der hydraulischen Testausrüstung, incl. Auswertung	5	
A 6 Anforderung: Geringe Neigung zur Bildung von Wasserwegsamkeiten				
A 6.1	Verhältnis repräsentative Gebirgspermeabilität/repräsentative Gesteinspermeabilität	Hydraulische Tests: je 3 Tests in 5 Bohrungen für Durchlässigkeitsbestimmungen, k-Werte der Tests unter A 1.2 und A 2.5 werden verwendet	3	
A 6.2	Erfahrungen über die Barrierewirksamkeit der Gebirgsformationen	Datenrecherche und Literaturlauswertung (Bericht)		
A 6.3	Duktilität des Gesteins	Laborversuche an Bohrkernen zur Bestimmung von E-Modul, Bruchgrenze, Nachbruchverhalten, plastisch / viskosem Materialverhalten und Kriecheigenschaften	50	
		Bericht zu Laborversuchen	1	
A 6.4	Rückbildung der Sekundärpermeabilität	Prüfung anhand bekannter oder abgeleiteter Stoffgesetze und unter Verwendung der Materialparameter aus A 6.3 (Bericht)		
A 6.5	Rückbildung von mechanischen Eigenschaften	Petrologische, tonmineralogische, gefügekundliche Laboruntersuchungen an Bohrkernen der Barriere		
		Hydrochemische Laboruntersuchungen an Porenwässern		
A 6.6	Zusammenfassende Beurteilung der Neigung zur Bildung von Wasserwegsamkeiten auf Grund der Bewertung der einzelnen Indikatoren	Bewertung der Teilergebnisse aus A 6 (Bericht)		

Umfang eines übertägigen Untersuchungsprogramms für den Tonsteinstandort nach /BfS 09/ (Fortsetzung)

<u>B</u> Anforderungen an den Datensatz für orientierende Langzeitsicherheitsanalyse				
B 1	Lokales räumliches Modell der geologischen Situation	Datenrecherche und Literaturlauswertung, ergänzt durch A 2.2 und A 2.4 (Bericht)		
B 2	Orientierende Porendiffusionskoeffizienten der Tonformation	Laboruntersuchungen an Bohrkernen, abgedeckt durch A 1.3		
B 3	Orientierende diffusionszugängliche Porosität der Tonformation	Literaturlauswertung und Datenrecherche, ergänzt durch A 1.3 (Bericht)		
B 4	Orientierende Sorptionskoeffizienten der Tonformation	Tonmineralogische Laboruntersuchungen , abgedeckt durch A 6.5, Literaturlauswertung und Datenrecherche (Bericht)		
B 5	Alter und Inhaltsstoffe der Wässer der Tonformation	Analyse von Porenwässern , abgedeckt durch A 6.5, zusätzlich Altersbestimmungen		
B 6	Orientierende Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität der Tonformation, incl. Parameter für thermomech. Rechnungen und temperaturabhängige Mineralumwandlungen	Messungen an Bohrkernen		
B 7	Orientierende mechanische Eigenschaften der Tonformation	Laboruntersuchungen , abgedeckt durch A 6.3		
B 8	Durchlässigkeit der Einheiten im Deckgebirge	Hydraulische Tests : je 4 Tests in 5 Bohrungen für Permeabilitäts- und Potenzialbestimmungen; ergänzt durch A 6.1	20	
<u>C</u> Anforderungen an den Datensatz für Szenarien bzw. geologische Langzeitprognosen				
C 1	Neotektonik	Kartierung von jungen Leithorizonten (z.B. quartäre Niederterrassen)		
		Geomorphologische Kartierung Hydro-Frac : 2 Tests in jeder Bohrung	2	

15.4 Anhang 4: Identifizierung der die rückhaltenden Sicherheitsfunktionen charakterisierenden Parameter
(zu Verfahrensschritt 5a, s. Kap. 11.2).

Lfd. Nr. SF/ Teilsystem/ Komponente	Radionuklidrückhaltende Sicherheitsfunktion (RSF)	Charakteristische Parameter	Wesentliche Parameter für die vergleichende Langzeitsicherheitsanalyse (WS 2044)	
			Tonstein	Salz
Abfallgebinde				
Behälter				
11	Begrenzung/Verhinderung des Lösungszutritts zum Abfallprodukt infolge Dichtwirkung der Behälterwandungen	Druck- und Zugfestigkeit, Scherfestigkeit, Dicke der Behälterwandungen, Korrosionsbeständigkeit, Qualitätssicherung (bes. Schweißnähte = Auslegungsmerkmale), integral: Standzeit, Ausfallrate	Standzeit, Ausfallrate,	Mobilisierungsrate
12	Verzögerung der Radionuklidausbreitung durch Sorption am korrodierten Behältermaterial	Anzahl von Sorptionsplätzen Elementarzusammensetzung	Nicht relevant	Nicht relevant
13	Begrenzung der Radionuklidausbreitung durch Löslichkeitsgrenzen	Temperatur Lösungszusammensetzung (Ionenstärke) vorhandene Festphasen Komplexierung (Radionuklidspezifikation) pH Kinetik der Auflösung, Ausfällung (Aktivierungsenergie) Lösungsbewegung (Vermischung) Redoxpotential (Kolloidbildung)	Löslichkeitsgrenzen	Löslichkeitsgrenzen

Lfd. Nr. SF/ Teilsystem/ Komponente	Radionuklidrückhaltende Sicherheitsfunktion (RSF)	Charakteristische Parameter	Wesentliche Parameter für die vergleichende Langzeitsicherheitsanalyse (WS 2044)	
			Tonstein	Salz
Endlager- bergwerk				
Versatzmaterial				
19	Begrenzung/Verhinderung von Lösungsbewegung und Radionuklidtransport	Permeabilität, Porosität, Diffusivität, Selbstabdichtung durch Quellen oder / Konvergenz, diffusionsdominierter Transport	Transmissivität	Permeabilität / Porosität, Konvergenz, anfängliche Lösungsmenge, Grenzporosität, Diffusionskonstante
20	Begrenzung der Radionuklidausbreitung aufgrund von Löslichkeitsgrenzen	Temperatur Lösungszusammensetzung (Ionenstärke) vorhandene Festphasen Komplexierung (Radionuklidspezifikation) pH Kinetik der Auflösung, Ausfällung (Aktivierungsenergie) Lösungsbewegung (Vermischung) Redoxpotential (Kolloidbildung)	Löslichkeitsgrenze	Löslichkeitsgrenze
21	Verzögerung der Radionuklidausbreitung durch Sorption (Bentonit)	Korngröße (-> Oberfläche) Porosität (-> Zugänglichkeit) vorhandene Belegung von Sorptionsplätzen Mineralzusammensetzung (Illite, Chlorit, Montmorillonit, Quarz, Karbonate,....) Elementarzusammensetzung Organischer Anteil	Kd	Kd wenig rel.

Lfd. Nr. SF/ Teilsystem/ Komponente	Radionuklidrückhaltende Sicherheitsfunktion (RSF)	Charakteristische Parameter	Wesentliche Parameter für die vergleichende Langzeitsicherheitsanalyse (WS 2044)	
			Tonstein	Salz
Endlager- bergwerk				
Abdich- tung/Damm				
26	Begrenzung/Verhinderung von Lösungs- bewegung und Radionuklid- transport	Permeabilität, Porosität, Diffusivität, Selbstabdichtung durch Quellen oder / Konvergenz, diffusionsdominierter Trans- port	Transmissivität, 2- Phasen-Parameter Ka- pillardruck- rel. Perme- abilität	Permeabilität / Porosi- tät,(konstant)
27	Verzögerung der Radionuklidaus- breitung durch Sorption (Bentonit)	Korngröße (-> Oberfläche) Porosität (-> Zugänglichkeit) vorhandene Belegung von Sorptionsplät- zen Mineralzusammensetzung (Illite, Chlorit, Montmorillonit, Quarz, Karbonate,...) Elementarzusammensetzung Organischer Anteil	Kd, Löslichkeitsgrenzen	Kd, Löslichkeitsgrenzen
Streckenversatz				
31	Begrenzung/Verhinderung von Lösungs- bewegung und Radionuklid- transport	Permeabilität, Porosität, Diffusivität, Selbstabdichtung durch Quellen oder / Konvergenz, diffusionsdominierter Trans- port	Transmissivität,	Permeabilität / Porosität, Konvergenz, anfängliche Lösungsmenge, Grenzpo- rosität, Diffusionskonstan- te
33	Verzögerung der Radionuklidaus- breitung durch Sorption (Bentonit)	Korngröße (-> Oberfläche) Porosität (-> Zugänglichkeit) vorhandene Belegung von Sorptionsplät- zen Mineralzusammensetzung (Illite, Chlorit, Montmorillonit, Quarz, Karbonate,...) Elementarzusammensetzung Organischer Anteil	Kd	Nicht relevant

Lfd. Nr. SF/ Teilsystem/ Komponente	Radionuklidrückhaltende Sicherheitsfunktion (RSF)	Charakteristische Parameter	Wesentliche Parameter für die vergleichende Langzeitsicherheitsanalyse (WS 2044)	
			Tonstein	Salz
Endlager- bergwerk				
Abdichtung des ewG nach Außen	(Schachtverschlüsse und Strecken- abdichtungen zum Infrastrukturbe- reich Gorleben)			
41	Begrenzung/Verhinderung von Lö- sungsbewegung und Radionuklid- transport	Permeabilität, Porosität, Diffusivität, Län- ge der Abdichtungen, Kontaktbündigkeit	Transmissivität	Permeabilität / Porosität, Konvergenz, anfängliche Lösungsmenge, Grenzpo- rosität, Diffusionskonstan- te
42	Verzögerung der Radionuklid aus- breitung durch Sorption (Bentonit- abdichtung)	Korngröße (-> Oberfläche) Porosität (-> Zugänglichkeit) vorhandene Belegung von Sorptionsplät- zen Mineralzusammensetzung (Illite, Chlorit, Montmorillonit, Quarz, Karbonate,...) Elementarzusammensetzung Organischer Anteil	Kd	Sorption

Lfd. Nr. SF/ Teilsystem/ Komponente	Radionuklidrückhaltende Sicherheitsfunktion (RSF)	Charakteristische Parameter	Wesentliche Parameter für die vergleichende Langzeitsicherheitsanalyse (WS 2044)	
			Tonstein	Salz
ewG				
49	Begrenzung/Verhinderung von Lösungsbewegung und Radionuklidtransport	Permeabilität einschl. 2-Phasen-Parameter Kapillardruck- rel. Permeabilität, Porosität, Diffusivität (Porendiffusionskoeffizienten), Ausdehnung des Wirtsgesteins um das Endlagerbergwerk, für die die charakteristischen Eigenschaften der Sicherheitsfunktion gelten	Permeabilität, Porosität, Diffusivität, 2-Phasen-Parameter Kapillardruck- rel. Permeabilität	Permeabilität, Porosität, Diffusivität
52	Verzögerung der Radionuklidausbreitung durch Sorption	Temperatur verfügbare / zugängliche Oberfläche Eigenschaften der Oberflächen (Ladung, Bindungsmöglichkeiten) Komplexierung des Radionuklids (Aquo-, Karbonat-, Chlorid-,....), Spezifikation, Lösungszusammensetzung, Ionenstärke, pH, Kinetik Konkurrenzreaktionen mit anderen Elementen, Redoxpotential (Kolloidbildung), Ausdehnung des Wirtsgesteins um das Endlagerbergwerk, für die die charakteristischen Eigenschaften der Sicherheitsfunktion gelten	Kd	nicht relevant

15.5 Anhang 5: Korrelation Relevanz-Robustheit
(zu Verfahrensschritt 5a, s. Kap. 11.2).

Lfd. Nr. SF/ Teilsystem/ Komponente	Radionuklidrückhaltende Si- cherheitsfunktion (RSF)	Relevanz der Sicherheits- funktion Ordinale Rangzahlen: 1: keine Relevanz bis 5: sehr hohe Relevanz ("un- verzichtbar")				Robustheit der Sicherheits- funktion Ordinale Rangzahlen: 1: sehr geringe Robustheit (bzw. konzeptionell nicht rele- vant=grau) bis 5: sehr hohe Robustheit				Auswertung Differenz der ordinalen Rang- zahlen: Robustheit - Relevanz Ergebnisse < -1 sind ein Hin- weis auf wenig robuste Kompo- nenten			
		< 10 ka		> 10 ka		< 10 ka		> 10 ka		< 10 ka		> 10 ka	
		Ton- stein	Salz	Ton- stein	Salz	Ton- stein	Salz	Ton- stein	Salz	Ton- stein	Salz	Ton- stein	Salz
Behälter													
11	Begrenzung/Verzögerung des Lö- sungszutritts zum Abfallprodukt infolge Dichtwirkung der Behäl- terwandungen	5	2	1	1	4	4	1	1	-1	2	0	0
12	Verzögerung der Radionuklid- Ausbreitung durch Sorption am Behältermaterial	2	1	1	1	4	1	1	1	1	0	0	0
13	Begrenzung/ der Radionuklidaus- breitung durch Löslichkeitsgren- zen	2	1	1	1	3	1	1	1	1	0	0	0

Lfd. Nr. SF/ Teilsystem/ Komponente	Radionuklidrückhaltende Si- cherheitsfunktion (RSF)	Relevanz der Sicherheits- funktion Ordinale Rangzahlen: 1: keine Relevanz bis 5: sehr hohe Relevanz ("un- verzichtbar")				Robustheit der Sicherheits- funktion Ordinale Rangzahlen: 1: sehr geringe Robustheit (bzw. konzeptionell nicht rele- vant=grau) bis 5: sehr hohe Robustheit				Auswertung Differenz der ordinalen Rang- zahlen: Robustheit - Relevanz Ergebnisse < -1 sind ein Hin- weis auf wenig robuste Kompo- nenten			
		< 10 ka		> 10 ka		< 10 ka		> 10 ka		< 10 ka		> 10 ka	
		Ton- stein	Salz	Ton- stein	Salz	Ton- stein	Salz	Ton- stein	Salz	Ton- stein	Salz	Ton- stein	Salz
ELB													
Versatz- material													
19	Begrenzung/Verhinderung von Lösungsbewegung und Radionuk- lidtransport	3	3	5	5	4	3	4	3	1	0	-1	-2
20	Begrenzung der Radionuklidaus- breitung aufgrund von Löslich- keitsgrenzen	3	2	3	2	4	4	4	4	1	2	1	2
21	Verzögerung der Radionuklidaus- breitung durch Sorption	5	1	5	1	4	1	4	1	-1	0	-1	0
Abdich- tung/Damm													
26	Begrenzung/Verhinderung von Lösungsbewegung und Radionuk- lidtransport	5	5	3	1	4	3	4	1	-1	-2	1	0
27	Verzögerung der Radionuklidaus- breitung durch Sorption	3	1	3	1	4	1	4	1	1	0	1	0

Lfd. Nr. SF/ Teilsystem/ Komponente	Radionuklidrückhaltende Si- cherheitsfunktion (RSF)	Relevanz der Sicherheits- funktion Ordinale Rangzahlen: 1: keine Relevanz bis 5: sehr hohe Relevanz ("un- verzichtbar")				Robustheit der Sicherheits- funktion Ordinale Rangzahlen: 1: sehr geringe Robustheit (bzw. konzeptionell nicht rele- vant=grau) bis 5: sehr hohe Robustheit				Auswertung Differenz der ordinalen Rang- zahlen: Robustheit - Relevanz Ergebnisse < -1 sind ein Hin- weis auf wenig robuste Kompo- nenten			
		< 10 ka		> 10 ka		< 10 ka		> 10 ka		< 10 ka		> 10 ka	
		Ton- stein	Salz	Ton- stein	Salz	Ton- stein	Salz	Ton- stein	Salz	Ton- stein	Salz	Ton- stein	Salz
Endlager- bergwerk													
Streckenver- satz													
31	Begrenzung/Verhinderung von Lösungsbewegung und Radionuk- lidtransport	3	3	5	5	4	3	4	3	1	0	-1	-2
33	Verzögerung der Radionuklid aus- breitung durch Sorption	5	1	5	1	4	1	4	1	-1	0	-1	0
Abdichtung des ewG nach Außen	(Schachtverschlüsse und Streckenabdichtungen zum Infrastrukturbereich Gorle- ben)												
41	Begrenzung/Verhinderung von Lösungsbewegung und Radionuk- lidtransport	5	5	1	1	4	3	4	3	-1	-2	3	2
42	Verzögerung der Radionuklid aus- breitung durch Sorption (Ben- tonitabdichtung)	3	1	3	1	4	1	4	1	1	-	1	-

Lfd. Nr. SF/ Teilsystem/ Komponente	Radionuklidrückhaltende Si- cherheitsfunktion (RSF)	Relevanz der Sicherheits- funktion Ordinale Rangzahlen: 1: keine Relevanz bis 5: sehr hohe Relevanz ("un- verzichtbar")				Robustheit der Sicherheits- funktion Ordinale Rangzahlen: 1: sehr geringe Robustheit (bzw. konzeptionell nicht rele- vant=grau) bis 5: sehr hohe Robustheit				Auswertung Differenz der ordinalen Rang- zahlen: Robustheit - Relevanz Ergebnisse < -1 sind ein Hin- weis auf wenig robuste Kompo- nenten			
		< 10 ka		> 10 ka		< 10 ka		> 10 ka		< 10 ka		> 10 ka	
		Ton- stein	Salz	Ton- stein	Salz	Ton- stein	Salz	Ton- stein	Salz	Ton- stein	Salz	Ton- stein	Salz
49	Begrenzung/Verhinderung von Lösungsbewegung und Radionuk- lidtransport	5	5	5	5	4	5	2	5	-1	0	-3	0
52	Verzögerung der Radionuklidaus- breitung durch Sorption	5	1	5	1	4	1	4	1	-1	0	-1	0

15.6 Anhang 6: Beispielhafte Bewertung des Steinsalzstandortes Gorleben

15.6.1 Streckenversatz der Einlagerungsbereiche und der Restgrube des Steinsalzstandortes Gorleben

Zu den Endlagersystemkomponenten Streckenversatz in den Einlagerungsbereichen und der Restgrube wurden für den Salzstandort Gorleben jeweils für den Zeitraum > 10.000 Jahre Robustheitsdefizite bei folgenden Sicherheitsfunktionen identifiziert:

RSF Nr. 19: „Begrenzung/Verhinderung von Lösungsbewegung und Radionuklidtransport“ im **Streckenversatz der Einlagerungsbereiche** des **Steinsalzstandortes** Gorleben für den Wirkungszeitraum $t > 10.000$ a

RSF Nr. 31: „Begrenzung/Verhinderung von Lösungsbewegung und Radionuklidtransport“ im **Streckenversatz der Restgrube** des **Steinsalzstandortes** Gorleben für den Wirkungszeitraum $t > 10.000$ a

Beide Sicherheitsfunktionen können in der abschließenden Bewertung gemeinsam behandelt werden, da die Mechanismen, die zu einer Einschätzung geringer Robustheit geführt haben, identisch sind. Im Hinblick auf die beispielhafte Robustheitseinschätzung entlang der Methodik des Verfahrensschrittes 5 wird auf die ausführlichen Begleitberichte /GRS 10f/ (Streckenversatz Einlagerungsbereiche) sowie /GRS 10g/ (Streckenversatz Restgrube) verwiesen.

Reflektion der durchgeführten Robustheitsbewertungen

Die zu diesen rückhaltenden Sicherheitsfunktionen gehörigen RSF-Parameter sind:

- Permeabilität
- Porosität
- Diffusivität

Die Gesamtbewertung ergab bei beiden Sicherheitsfunktionen für den Zeitraum **$t < 10.000$ Jahre**, dass bei den zugehörigen Parametern signifikante Unsicherheiten hinsichtlich der erreichbaren Endzustände der Materialeigenschaften bestehen. Entsprechend wurde das Vertrauen in die Erfüllung der Auslegungsanforderungen über den Nachweiszeitraum nur als „mäßig“ (Einstufung 3) eingeschätzt. Hintergrund sind bislang fehlende Nachweise, dass die Kompaktion von Salzgrus, der zum Versatz von Einlagerungshohlräumen sowie offenen Stre-

cken der Restgrube verwendet werden soll, soweit voranschreitet, dass hinsichtlich der Permeabilität, Porosität - und hiermit zusammenhängend - auch der Diffusivität Materialeigenschaften erreicht werden, die in etwa denen des unverritzten Steinsalzes entsprechen. Aufgrund dessen sind auch die genauen Auswirkungen des Gasdruckaufbaus und der Feuchtigkeit auf die erreichbaren Materialendzustände nicht bekannt. Diese Aspekte werden später diskutiert.

Für den Zeitraum **t > 10.000 Jahre** war davon auszugehen, dass die Kompaktion des Versatzmaterials bereits lange vor Eintritt des beispielhaft angesetzten Ereignisses („Kaltzeit mit 700 m Inlandeisüberdeckung und Rinnenbildung infolge Schmelzwassererosion“) ihren (wie auch immer gearteten) Endzustand erreicht hat. Aufgrund der Unsicherheiten der erreichbaren Materialeigenschaften im Endzustand, die für den ersten Zeitraum ($t < 10.000$ a) identifiziert wurden, besteht damit auch für den Zeitraum $t > 10.000$ Jahre prinzipiell die gleiche Problematik wie für den Zeitraum davor. Hiernach ist es derzeit unklar, ob und wann Porositäten $< 1\%$ und entsprechend geringe Permeabilitätswerte sowie Diffusionskoeffizienten erreicht werden können, die gemäß der sicherheitskonzeptionell bedingten Auslegungsanforderungen eine ausreichende Barrierewirkung gewährleisten. Aus der verbleibenden Unsicherheit zur erreichbaren Grenzporosität und -permeabilität und der im Endzustand erreichbaren Diffusivität wurde das Prozessverständnis zum Kompaktionsverhalten von Salzgrus für den Zeitraum $t > 10.000$ a nur als mäßig eingestuft.

Dies führte für **beide Zeiträume** ($t < 10.000$ und $t > 10.000$ Jahre) zu einer Gesamteinstufung der Parameter Permeabilität, Porosität und Diffusivität als **mäßig** robust (Einstufung: 3). Entsprechendes gilt für die beiden zugehörigen, oben angeführten Sicherheitsfunktionen.

Ein Robustheitsdefizit wurde jedoch nur für den Zeitraum > 10.000 Jahre identifiziert. Der Grund liegt in der Einstufung der **Relevanz** in Verfahrensschritt 3 (siehe Kap. 9). Hiernach wurde die Relevanz der oben genannten Sicherheitsfunktionen für die **Übergangsphase** (Zeitraum $t < 10.000$ Jahre) als mäßig relevant (Einstufung 3) eingestuft, da sich die konzeptionell geforderten einschlusswirksamen Eigenschaften des Versatzes durch Kompaktion in dieser Phase erst entwickeln und somit nicht im Zeitraum $t < 10.000$ Jahre von Anfang an als gewährleistet angesehen werden können. In der anfänglichen Phase übernehmen vielmehr (neben dem ewG) zunächst die „schnellwirkenden Barrieren“ die Einschusswirkung des Endlagersystems indem sie Lösungszutritte in die Einlagerungsbereiche unterbinden (siehe Kap. 5.1.1 und 9.3). Zu diesen „schnellwirkenden“ Abdichtungen gehören im Verschlusskonzept zu Gorleben die Schachtverschlüsse und die Streckenabdichtungen zum Infrastrukturbereich.

In der **stationären Langzeitphase** (spätestens im Zeitraum $t > 10.000$ Jahre) sollte nach dem Verschlusskonzept die Kompaktion des Salzgrusversatzes bereits so weit fortgeschritten sein, dass seine hydraulischen Eigenschaften annähernd die Qualität des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches (d.h. des unverritzten Steinsalzes) erreicht haben und der Versatz die langfristige Dichtfunktion und den Einschluss der Abfälle gewährleisten. Von einer durchgängigen Funktionstüchtigkeit der Schachtverschlüsse und der Streckenabdichtungen zum Infrastrukturbereich kann dagegen nicht mehr ausgegangen werden. Für die 2. Zeitphase ($t > 10.000$ Jahre) wurden beide Sicherheitsfunktionen des Versatzes in der Restgrube und in den Einlagerungsbereichen daher als sehr relevant eingestuft (Einstufung: 5).

Hieraus erklärt sich, dass bei gleichen Robustheitseinstufungen für beide Zeiträume nur für den Zeitraum $t > 10.000$ Jahre Robustheitsdefizite identifiziert wurden, da hier die Erwartung einer bezogen auf die (für diesen Zeitraum deutlich höher angesetzte) Relevanz angemessene Robustheitseinstufung gemäß den in Kap. 12 genannten Bedingungen nicht erfüllt wird.

Fachliche Diskussion der Problemstellung

In der Vergangenheit wurden Nachweise zum Kompaktionsverhalten von Salzgrus im Wesentlichen auf der Grundlage numerischer Modellrechnungen geführt /DBE 08/. Zur Absicherung dieser Rechenergebnisse wurden mehrere Forschungsprojekte durchgeführt, die sich unter anderem mit der Frage der Versatzkompaktionsmechanismen in Einlagerungsstrecken (EU-Vorhaben BAMBUS /EUR 99, EUR 04/) bzw. in Einlagerungsbohrlöchern (DEBORA /EUR 99/) unter in situ-Bedingungen befassen. Eine zusammenfassende Würdigung des Standes von Wissenschaft und Technik (u.a. auf der Basis der obengenannten Projekte) zum zeitlichen Kompaktionsverhalten von Salzgrus ist in einem Abschlussbericht zum Vorhaben ISIBEL /DBE 08/ dokumentiert. Demnach konnte bei keinem der Versuche, die im Rahmen der oben genannten Vorhaben durchgeführt wurden, ein monolithischer Einschluss der Behälter durch Salzgrus geringer Porosität nachgewiesen werden. Der Grund lag in vergleichsweise kurzen Versuchszeiträumen von wenigen Jahren. Nach /DBE 08/ sind in Bezug auf die Materialeigenschaften von Salzgrus noch folgende Fragen offen:

- Das Kompaktionsverhalten, welches im Wesentlichen durch den Grobkornanteil des Salzgruses bestimmt wird, ist im Bereich geringer Porositäten noch nicht ausreichend durch realitätsnahe Versuche unter endlagerspezifischen Bedingungen belegt. Insbesondere ist die Frage des Spannungsexponenten zur Anpassung der mechanischen Modelle an die Versuchsergebnisse ebenso wie die Genauigkeit der Anpassung noch nicht vollständig befriedigend gelöst. So zeigte sich, dass die im Rahmen des Vorhabens BAMBUS II erzielten Berechnungsergebnisse das Kompaktionsverhalten des Salzgrusversatzes im

Vergleich mit den experimentell gewonnenen Daten im allgemeinen überschätzen, wobei Abweichungen in der Kompaktionsrate von bis zu einer Größenordnung auftreten können /GRS 99/.

- Bei unterstelltem Zutritt von Lauge in Grubenbereiche, die mit noch nicht vollständig kompaktiertem Salzgrus versetzt sind, kann derzeit nicht ausgeschlossen werden, dass es aufgrund der Einwirkung hydraulischer Drücke auf das Korngerüst des Versatzes zur Ausbildung von lokalen Auflockerungen kommen kann, die bis hin zur Bildung durchgehend hydraulisch wirksamer Kanäle erhöhter Porosität und Permeabilität führen kann (Channeling-Effekt). Diese insbesondere für den Langzeitsicherheitsnachweis wesentlichen Effekte sind somit bislang nicht ausreichend untersucht. Weiterhin besteht Forschungsbedarf für das Verhalten von Salzgrusversatz bei laugenzutrittsbedingt erhöhtem Feuchtegehalt. Auch zu Channeling-Effekten, die sich aufgrund von Auf- und Umlöseprozessen ergeben besteht nach /DBE 08/ weiterer Forschungsbedarf.
- Erheblicher Forschungsbedarf besteht auch zum Verhalten des Salzgrusversatzes im Hinblick auf den Zweiphasentransport (Gas-/Flüssigphase). Zu den bestimmenden Parametern (relative Permeabilität, Kapillardruck etc.) existieren nur eher orientierende Untersuchungen /GRS 99, GRS 00/, deren Ergebnisse allerdings auf die hohe Ergebnissensitivität dieser Parameter hinweisen.
- Zur gegenseitigen Beeinflussung der oben beschriebenen Einflussgrößen besteht ebenfalls bislang kein ausreichendes Prozessverständnis. Insbesondere die Bewertung der Kopplungsphänomene im Hinblick auf ihre Auswirkungen in Sicherheitsnachweisen ist noch nicht erfolgt.

Zusammenfassend wird in /DBE 08/ hinsichtlich des Forschungsstandes zum Materialverhalten des Salzgrusversatzes folgendes ausgeführt:

„In-situ-Versuche und Analoga zeigen, dass das Ziel des sicheren Einschlusses erreichbar ist. Trotz der Einfachheit des Systems lassen sich die ablaufenden Prozesse zum momentanen Zeitpunkt jedoch noch nicht vollständig beschreiben. Ursache ist einerseits die Komplexität des Materialverhaltens, die im Ausgangszustand durch die Materialauswahl und die geometrischen Eigenschaften der Körnung sowie im Prozessverlauf durch den Einfluss von Konvergenzgeschwindigkeit, Temperatur und Feuchte als den wesentlichen Faktoren bestimmt wird, und andererseits die Streuung der Bedingungen im technisch realisierten System, wie z. B. die Kornverteilung und die Anfangsporosität.“

„Die Langzeitsicherheitsanalyse kann derzeit nicht in allen Teilen auf der Basis eines belastbaren Ansatzes von Salzgrus durchgeführt werden. Im Wesentlichen ist an dieser Stelle einerseits die Unbestimmtheit bzw. noch fehlende Prognosegüte im Übergangsbereich des Salzgruses zum festen Steinsalz zu nennen. Zudem ist zu klären, in wieweit lokale Effekte wie lokale Auflockerungen bis hin zur Kanalbildung berücksichtigt werden müssen. Ein quantitativer Nachweis ist an dieser Stelle nur eingeschränkt möglich. Insbesondere ist damit der Zeitpunkt als offen anzusehen, ab dem eine Barrierewirksamkeit des Versatzes angesetzt werden kann.“

Folglich ist es derzeit unklar, ob und nach welchem Zeitraum im Salzgrusversatz Endporositäten kleiner 1 % erreicht werden können. Versuche unter realitätsnahen Bedingungen liefern derzeit Werte bis max. 4 %. Im Wertebereich der Auslegungsanforderungen (< 1 %) ist die Unsicherheit relativ groß. Weiterhin ist noch unklar, ob die Porenraumreduzierung des Versatzes homogen erfolgt und die Permeabilität entsprechend verringert wird oder ob sich kluftähnliche Systeme oder Kanäle mit erhöhter Permeabilität ausbilden können.

In situ-Experimente zur Bestimmung der Permeabilitäts- und Porositätsentwicklung sind bislang nur wenige durchgeführt worden (z.B. TSS Versuch). Die für die Endlagerung sicherheitskonzeptionell erforderlichen Porositäten unterhalb von 1 % und Permeabilitäten < 10^{-19} m², die zur Gewährleistung diffusionsdominierter Transportvorgänge erforderlich sind, konnten dabei versuchszeitbedingt nicht erreicht werden.

Entsprechende druck- und weggeregelte Laborexperimente müssen im Hinblick auf realisierbare Versuchszeiträume unter Zeitrafferbedingungen durchgeführt werden, die nicht den in der Realität vorliegenden Bedingungen entsprechen. Es ist also zu klären, wie diese Abweichung von den natürlichen Bedingungen auf die Messgrößen z. B. Permeabilität und Porosität Einfluss nimmt. Zum Nachweis der Übertragbarkeit der Erkenntnisse aus Laborversuchen auf großräumige Systeme liegen jedoch kaum Analoga oder in situ-Experimente vor.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass beim Salzgrusversatz derzeit zu den wesentlichen einschlussrelevanten Prozessen offene Fragen bestehen. Es besteht F&E Bedarf, das großräumige Konvergenzverhalten und die Entwicklung der integralen sicherheitsgerichteten Materialeigenschaften versetzter Strecken zu charakterisieren. Insbesondere kann die in den bisherigen Sicherheitskonzepten zu Salinarstandorten geforderte rasche Annäherung der hydraulischen Materialeigenschaften von Salzgrusversatz an diejenigen unverritzten Steinsalzes derzeit nicht nachgewiesen werden. Die aufgrund des nicht vollständigen Prozessverständnisses für beide Wirkzeiträume ($t < 10.000$ und $t > 10.000$ Jahre) vorgenommene Gesamteinstufung

der oben angeführten Sicherheitsfunktionen und ihrer Parameter Permeabilität, Porosität und Diffusivität als mäßig robust (Einstufung: 3) wird daher als gerechtfertigt angesehen.

Sicherheitskonzeptionelle Bedeutung

Im Sicherheitskonzept zu Endlagern im Salinar gehört der Salzgrusversatz neben dem ewG zu den wichtigsten langfristig wirkenden Barrieren. Aufgabe des Salzgrusversatzes ist die dauerhafte Verheilung des anthropogenen Eingriffs in die Salinarstruktur. In den bisherigen Sicherheitskonzepten zur Endlagerung von radioaktiven Abfällen in Salzstöcken wird davon ausgegangen, dass nach einer gewissen Übergangszeit, die einige 100 Jahre in Anspruch nehmen kann, der Versatz durch kompaktionsbedingte Porenraumreduktion hydraulische und geomechanische Eigenschaften annimmt, die denen des unverritzten Steinsalzes entsprechen. Da die Haltbarkeit von schnellwirkenden Barrieren (Schachtverschlüsse und Streckenabdichtungen) aus wirtsgesteinsfremden Material nur für Zeiträume von einigen 10.000 Jahren nachgewiesen werden kann, stellt der Salzgrusversatz die einzig langfristig wirkende geotechnische Barriere in der stationären Langzeitphase ($t > 10.000$ Jahre) dar. Aus diesem Grund wird die Einstufung der beiden Sicherheitsfunktionen für den Zeitraum $t > 10.000$ Jahre als „sehr relevant“ (Einstufung: 5) als gerechtfertigt angesehen.

Aufgrund der im Vorangegangenen beschriebenen Unsicherheiten hinsichtlich der Porositäts- und Permeabilitätsentwicklung im Übergangsbereich des Salzgrus zum festen Steinsalz und insbesondere im Hinblick auf Effekte wie lokale Auflockerungen bis hin zur Kanalbildung ist es derzeit offen, ob bzw. wann die sicherheitskonzeptionell geforderte Barrierewirksamkeit des Versatzes unterstellt werden kann. Von daher kann nicht völlig ausgeschlossen werden, dass die versetzten Hohlräume im Vergleich zum unverritzten Steinsalz dauerhafte Zonen erhöhter Permeabilität darstellen und keine vollständige Verheilung des ewG erfolgt. Die fehlende Nachweismöglichkeit eines hermetischen Einschlusses der radioaktiven Abfälle in einer Salzmatrix extrem geringer Permeabilität hat signifikante Auswirkungen auf die Robustheit, insbesondere auf die Einfachheit und Aussagesicherheit heutiger Sicherheitsnachweise. Die obengenannten Problemstellungen betreffen die Endlagerung radioaktiver Abfälle in Salinarstrukturen allgemein und sind nicht nur auf den im Vorhaben VerSi betrachteten Beispielstandort Gorleben beschränkt.

Möglichkeiten der Korrektur der Robustheitsdefizite

Im vorliegenden Fall bestehen 3 Möglichkeiten zur Behebung der bei den beiden oben genannten Sicherheitsfunktionen identifizierten Robustheitsdefizite.

1. Erweiterung des Prozessverständnisses zum Kompaktionsverhalten, zu Channeling-Effekten sowie zum Einfluss des Feuchtegehaltes von Salzgrusversatz. Derzeit widmen sich F&E Projekte wie z.B. REPOPERM (Restporosität und –permeabilität von kompaktiertem Salzgrus-Versatz in einem HAW-Endlager) diesen offenen Fragen. Es ist jedoch noch nicht absehbar, ob die Ergebnisse dieser Vorhaben einen Nachweis des „monolithischen“ Einschlusses der Abfälle durch kompaktierten Salzgrus dessen Materialeigenschaften denen des unverritzten Steinsalzes nahe kommen, ermöglichen werden. Dennoch wird aus heutiger Sicht davon ausgegangen, dass der Kenntnisstand zu den oben thematisierten offenen Fragen zumindest mittelfristig erheblich verbessert werden kann.

2. Modifikation des Versatzmaterials: Denkbar ist weiterhin durch bestimmte Zuschlagsstoffe bzw. durch die Wahl eines anderen Versatzstoffes die oben genannten sicherheitskonzeptionellen Ziele des monolithischen Einschlusses zu erreichen. In diesen Fällen würden jedoch möglicherweise die Materialeigenschaften nicht mehr identisch zu denen des intakten Steinsalzes sein, was eventuell zu geomechanischen Problemen führen kann. In jedem Fall bestünde zu diesem Aspekt entsprechender Forschungs- und Entwicklungsbedarf.

3. Modifikation des Sicherheitskonzeptes: Sollte keine Lösung für die unter 1 und 2 genannten Korrekturmöglichkeiten gefunden werden können und keine Möglichkeit des Nachweises eines monolithischen Einschlusses bestehen, so bliebe letztlich noch die Möglichkeit einer Neudefinition des Sicherheitskonzeptes zu Endlagern in Salinarstandorten. Hierbei wären ggf. die Anforderungen an den Salzgrusversatz abzuschwächen. Vorstellbar wäre eine abgestufte Nachweishierarchie wie sie im Vorhaben ISIBEL erarbeitet wurde. In /ISI 10/ werden hierbei folgende Isolationszustände in einem salinaren Endlagersystem unterschieden:

Vollständiger Einschluss: „Als Vollständiger Einschluss wird eine Sicherheitsfunktion des Endlagersystems bezeichnet, die dadurch charakterisiert ist, dass die radioaktiven Abfälle in einem definierten Gebirgsbereich so eingeschlossen sind, dass sie am Einlagerungsort verbleiben und keine Stoffmengen diesen Gebirgsbereich verlassen.“ Der Vollständige Einschluss ist zum Beispiel dann gegeben, wenn ein Lösungszutritt zu den Abfällen ausgeschlossen werden kann, zumindest jedoch wenn keine Radionuklide aus dem ewG austreten und der diffusive Transport den advektiven bei weitem dominiert. Gasdichtheit ist nicht gefordert.

Sicherer Einschluss: „Als Sicherer Einschluss wird eine Sicherheitsfunktion des Endlagersystems bezeichnet, die dadurch charakterisiert ist, dass die radioaktiven Abfälle in einem definierten Gebirgsbereich so eingeschlossen sind, dass sie im Wesentlichen am Einlagerungsort verbleiben und allenfalls geringe definierte Stoffmengen diesen Gebirgsbereich

verlassen.“ Zum Nachweis der Geringfügigkeit der Freisetzungen wären die entsprechenden radiologischen Anforderungen aus /BMU 10/ zu erfüllen.

Durch die Abschwächung der sicherheitskonzeptionellen Anforderungen würde allerdings ein nach heutigen Maßstäben vorhandener, intrinsischer Robustheitsvorteil der Endlagerung radioaktiver Abfälle in Salzstrukturen „geopfert“. **In jedem Fall wären die begleitenden Langzeitsicherheitsanalysen erneut zu führen und die Vergleichsprozedur unter Hinzuziehung aller Verfahrensbeteiligten zu wiederholen.**

15.6.2 Abdämmungen zu den Einlagerungsbereichen des Steinsalzstandortes Gorleben

Zum Abschluss der einzelnen Einlagerungsfelder ist im derzeitigen Verschlusskonzept zum Standort Gorleben vorgesehen, die von den Richtstrecken abzweigenden Querschläge auf beiden Seiten durch Dammbauwerke von den Richtstrecken abzutrennen. Diese Dammbauwerke haben eine Länge von 12 m und bestehen aus vorkompaktiertem Salzgrusbriketts, die mit Salzmörtel verfugt werden. Der verbleibende Ringraum zwischen Bauwerk und Gebirge wird durch Verpressung mit Emulsionen abgedichtet. Die Dämme sollen eine Anfangspermeabilität von 7×10^{-16} aufweisen /SAM 91/.

Zu der Endlagersystemkomponente Dammbauwerk wurde für den Salzstandort Gorleben für den Zeitraum < 10.000 Jahre ein Robustheitsdefizit bei folgender Sicherheitsfunktion identifiziert:

RSF Nr. 26: „Begrenzung/Verhinderung von Lösungsbewegung und Radionuklidtransport“
Abdämmungen zu den Einlagerungsbereichen des Steinsalzstandortes Gorleben für den Wirkungszeitraum $t < 10.000$ a

Im Hinblick auf die beispielhafte Robustheitseinschätzung entlang der Methodik des Verfahrensschrittes 5 wird auf den ausführlichen Begleitbericht /GRS 10h/ (Parameterbewertung Dämme und Abdichtungen Einlagerungsbereich) verwiesen.

Die geringe Robustheitseinschätzung, die bei der oben genannten Sicherheitsfunktion letztlich zur Identifikation eines Robustheitsdefizites führte, betraf die RSF-Parameter:

- Permeabilität
- Porosität

- Diffusivität

Die beispielhaften Einzelbewertungen zur Robustheit der Parameter dieser Sicherheitsfunktion führten zu folgenden Ergebnissen:

Bezüglich der **Charakterisierbarkeit** wurde eingeschätzt, dass die Permeabilität der **einzelnen** Bauelemente der Dammbauwerke (kompaktierter Salzgrus, Mörtel und Injektionsemulsionen) **im Einbauzustand** anhand vorhandener experimenteller Methoden unter den im Labor nachgestellten Konvergenzbedingungen zuverlässig ermittelt werden kann. Aufgrund vieler experimenteller Laborbefunde zum Korngrößen- und Feuchteinfluss wurde der Kenntnisstand zu Porosität und Permeabilität der Einzelkomponenten als gut bewertet.

Jedoch liegen wenige experimentelle Ergebnisse hinsichtlich des Hochskalierens von Labor-experimentalergebnissen auf das gesamte Dammbauwerk d.h. zur Bewertung der **integralen** Dammpерmeabilitäten (d.h. dem Verbund von Salzbriketts, Salzmörtel und Injektionsemulsion) vor. Aus diesem Grund wurden Aussagen zur Charakterisierung der Permeabilität zum Istzustand der integralen Dammpерmeabilität nur als mäßig verlässlich eingeschätzt (Einstufung: 3).

Ähnlich fielen die Bewertungen zu den oben angeführten RSF-Parametern zum Prozessverständnis hinsichtlich ihrer weiteren Entwicklung während der Übergangsphase im Zeitraum **t < 10.000** Jahre aus. Die in Arbeitsschritt 5d durchgeführte Aggregation der Charakterisierbarkeit, des Einflusses von entwicklungsbedingten Auswirkungen ergab im Vergleich zu den Auslegungsanforderungen, dass für den Zeitraum t < 10.000 Jahre bei den Parametern Permeabilität, Porosität und Diffusivität, als den charakteristischen Eigenschaften der Sicherheitsfunktion, derzeit noch signifikante Unsicherheiten hinsichtlich der erreichbaren integralen Barriereigenschaften bestehen. Aufgrund dessen sind auch die genauen Auswirkungen des Gasdruckaufbaus, d.h. die erreichbare Endpermeabilität bei dem im Endlagerbergwerk herrschenden Gasdruck insbesondere für den Fugenmörtel und die Emulsion nicht genau bekannt. Dies führte zu einer Gesamteinstufung der Auswirkungen der Systementwicklungen auf Materialparameter der Dammbauwerke als **mäßig** (Einstufung: 3).

Prinzipiell besteht die Anforderung an die Dammpерmeabilität in der Unterschreitung des Parameterwertes für die Permeabilität von $< 10^{-19} \text{ m}^2$, damit der Damm als ein diffusionsdominiertes System, bei dem die advective Transportkomponente vernachlässigbar gering ist, den Einschluss der Radionuklide gewährleisten kann. Aufgrund der Unsicherheiten des erreichbaren Einbauzustandes sind die Dammbauwerke hinsichtlich ihrer Eigenschaften Permeabilität und

Porosität entsprechend variant. Bereits 1 % Restporosität entsprechen einer Permeabilität von ca. 10^{-16} m^2 (unter Annahme hydraulisch durchgehend wirksamer Porenkanäle). Das Vertrauen in die Erfüllung der Auslegungsanforderung bezüglich des Endzustandes der Dammporosität ist daher nur als mäßig einzustufen. Konsequenterweise wurde die Gesamtrobustheit der Sicherheitsfunktion „Begrenzung/Verhinderung von Lösungsbewegung und Radionuklidtransport“ in den Abdämmungen der Einlagerungsbereiche“ ebenfalls nur als **mäßig** eingestuft.

Fachliche Diskussion der Problemstellung

Durch die konvergenzbedingte Kompaktion der Dammbaumaterialien kommt es zur Reduzierung der Permeabilität und Porosität, wobei erhöhte Temperaturen diesen Prozess beschleunigen. Bezüglich der Quantifizierung dieses Prozesses und zum erreichbaren Endzustand von Porosität und Permeabilität bestehen jedoch, wie bereits erwähnt, signifikante Unsicherheiten. So müssen die entsprechenden druck- und weggeregelten Laborexperimente unter „Zeitrafferbedingungen“ durchgeführt werden, weswegen beide Experimentalansätze die in der Realität vorliegenden Bedingungen der Permeabilitäts- und Porositätsentwicklung nur sehr eingeschränkt nachbilden können. Zur Begründung der Übertragbarkeit der Erkenntnisse aus Laborversuchen an den Einzelkomponenten eines Dammbauwerkes auf großräumige Systeme, das heißt auf das integrale Verhalten dieser Komponenten im Gesamtbauwerk, liegen praktisch keine Analoga und in situ-Experimente vor. Dies betrifft insbesondere die Frage, welchen Endzustand die integrale Permeabilität und Porosität im gesamten Dammbauwerk nach erfolgter Kompaktion annehmen.

Ebenso wie im Fall des Salzgrusversatzes besteht somit F&E-Bedarf, das Konvergenzverhalten und die Entwicklung der Permeabilität eines Dammbauwerkes unter in situ-Bedingungen zu charakterisieren. Allerdings besteht im Gegensatz zum Salzgrusversatz noch die zusätzliche Schwierigkeit, dass es sich bei den Abdämmungen um heterogene Bauwerke handelt, die aus verschiedenen Komponenten (Salzbriketts, Fugenmörtel und Verpressemulsion) bestehen und die im Verlauf der Übergangsphase unterschiedliche Entwicklungen der Materialeigenschaften nehmen können. Eine belastbare Beurteilung der integralen Dichtwirkung des Gesamtbauwerkes im Rahmen des Langzeitsicherheitsnachweises ist derzeit nicht möglich.

Sicherheitskonzeptionelle Bedeutung

Im Sicherheitskonzept zu Endlagern im Salinar gehören die Dammbauwerke neben den Schachtverschlüssen und den Streckenabdichtungen zum Infrastrukturbereich zu den schnell

wirkenden Barrieren. Aufgabe der Dammbauwerke ist es, im Vorfeld der anfänglich noch andauernden kompaktionsbedingten Entwicklung der Barriereeigenschaften des Salzgrusversatzes, Lösungszutritte in die Einlagerungsbereiche, d.h. zu den mit Salzgrus umgebenen, eingelagerten radioaktiven Abfällen zu unterbinden. Die wesentliche Komponente der Abdämmungen besteht aus vorkompaktierten Salzgrusbriketts. Prinzipiell werden in den Abdämmbereichen damit Bauwerke erstellt, die zwar aufgrund ihrer Materialeigenschaften denen des Salzgrusversatzes ähneln und damit ebenso wie der Salzgrusversatz wirtsgesteinsähnliche Materialien darstellen, wobei jedoch das Erreichen der Dichtwirkung aufgrund der Vorkompaktion technisch beschleunigt wird. Der sicherheitskonzeptionell wesentliche Wirkungszeitraum liegt daher bereits innerhalb der Übergangsphase, d.h. im Zeitraum $t < 10.000$ Jahre.

Aus den oben genannten Gründen wird die Einstufung einer sehr hohen Relevanz (Einstufung: 5) für diesen Zeitraum als gerechtfertigt angesehen. Für den Zeitraum der stationären Phase ($t > 10.000$ Jahre) wird dagegen im Sicherheitskonzept davon ausgegangen, dass der kompaktierte Salzgrusversatz Material- und damit Barriereeigenschaften angenommen hat, die denen des unverritzten Steinsalzes entsprechen. Daher wurde die Relevanz der Dammbauwerke für diesen Zeitraum als nicht mehr relevant eingestuft und in /GRS 10h/ auf eine Robustheitsbewertung für diesen Zeitraum verzichtet. Hieraus erklärt sich, dass nur für den Zeitraum $t < 10.000$ Jahre Robustheitsdefizite identifiziert wurden, da hier die Erwartung einer bezogen auf die (für diesen Zeitraum sehr hoch angesetzte) Relevanz angemessene Robustheitseinstufung gemäß den in Kap. 12 genannten Bedingungen nicht erfüllt wird.

Aufgrund der im Vorangegangenen beschriebenen Unsicherheiten hinsichtlich der Porositäts- und Permeabilitätsentwicklung der Salzbriketts, der hydraulischen Wirkung der zwischengelagerten Fugen (Channeling-Effekte) sowie der hydraulischen Eigenschaften im Übergangsbereich des Bauwerks zur Auflockerungszone ist es derzeit offen, ob bzw. ab welchem Zeitpunkt die sicherheitskonzeptionell geforderte, möglichst kurzfristige Barrierewirksamkeit der Dammbauwerke erreicht werden kann. Aus diesem Grund kann derzeit nicht völlig ausgeschlossen werden, dass die Abdämmungen im Vergleich zum unverritzten Steinsalz Zonen erhöhter Permeabilität darstellen werden und somit weder den Zufluss von Laugen in die versetzten Einlagerungsbereiche vollständig verhindern können, noch langfristig zu einer vollständigen Verheilung des ewG beitragen werden.

Bezieht man die ähnlich gelagerte Problematik beim Salzgrusversatz mit in die Bewertung ein, so muss festgestellt werden, dass derzeit kein belastbarer Nachweis zum monolithischen Einschluss radioaktiver Abfälle in einer Steinsalzmatrix extrem geringer Permeabilität geführt

werden kann. Dies hat signifikante Auswirkungen auf die Robustheit, insbesondere auf die Einfachheit und Aussagesicherheit heutiger Sicherheitsnachweise.

Möglichkeiten der Korrektur des Robustheitsdefizits

Im vorliegenden Fall bestehen analog zum Salzgrusversatz 3 Möglichkeiten zur Behebung der bei der oben genannten Sicherheitsfunktion identifizierten Robustheitsdefizite.

1. Erweiterung des Prozessverständnisses zur Porositäts- und Permeabilitätsentwicklung der Salzbriketts, zur hydraulischen Wirkung der zwischengelagerten Fugen (Channeling-Effekte) sowie zu den hydraulischen Eigenschaften im Übergangsbereich des Bauwerks zur Auflockungszone: Im Hinblick auf die Porositäts- und Permeabilitätsentwicklung der Salzbriketts gelten die gleichen Anmerkungen wie zum Salzgrusversatz. Derzeit werden zwar F&E Projekte wie z.B. REPOPERM zur Versatzcharakterisierung durchgeführt, deren Thematik sich auch auf das Kompaktionsverhalten der Dammkomponente Salzbrikett übertragen lässt, diese haben jedoch bislang noch keine abschließenden Ergebnisse erbracht. So ist weiterhin unklar, ob die Reduktion der Porenradien und damit einhergehend auch die Abnahme der Permeabilität des Mörtels zwischen den Salzbrikett homogen erfolgt oder ob sich ggf. trennflächenähnliche Systeme oder Kanäle mit entsprechender Permeabilität ausbilden (Channeling-Effekte). Insgesamt wird eingeschätzt, dass zum heutigen Zeitpunkt Unsicherheiten bezüglich möglicher Channeling-Strukturen sowie zur Frage erreichbarer Grenzporositäten und -permeabilitäten einschließlich der Frage des hierfür erforderlichen Zeitbedarfs bestehen. Hieraus sind die Anforderungen an den Dammbauwerk und seine zeitliche Funktion unklar.

2. Modifikation der Materialwahl und des Aufbaus der Dammbauwerke: Bislang liegt kein Referenzkonzept für Streckenverschlüsse und Dammbauwerke vor /DBE 08/. Es ist grundsätzlich vorstellbar, dass durch eine Modifikation der Baustoffe die oben genannten sicherheitskonzeptionellen Ziele des hermetischen Einschlusses erreicht werden können. In diesen Fällen würden jedoch möglicherweise die Materialeigenschaften nicht mehr identisch zu denen des intakten Steinsalzes sein, was eventuell zu geomechanischen Problemen führen kann. In jedem Fall bestünde zu diesem Aspekt signifikanter Forschungs- und Entwicklungsbedarf.

3. Modifikation des Sicherheitskonzeptes: Sollte keine Lösung für die unter 1 und 2 genannten Korrekturmöglichkeiten gefunden werden können und folglich der Nachweis des hermetischen Einschlusses nicht erreichbar sein, so bliebe letztlich noch die Möglichkeit einer Modifikation des Sicherheitskonzeptes zu Endlagern in Salinarstandorten. Diesbezüglich gelten für die Dammbauwerke sinngemäß die gleichen Ausführungen wie zum Salzgrusversatz. Durch die

Abschwächung der sicherheitskonzeptionellen Anforderungen würde jedoch ein nach heutigen Maßstäben vorhandener, intrinsischer Robustheitsvorteil der Endlagerung radioaktiver Abfälle in Salzstrukturen verspielt.

15.6.3 Streckenabdichtungen des Steinsalzstandortes Gorleben

Zu der Endlagersystemkomponente Streckenabdichtungen wurde für den Tonsteinstandort für den Zeitraum < 10.000 Jahre ein Robustheitsdefizit bei folgender Sicherheitsfunktion identifiziert:

RSF Nr. 41: „Begrenzung/Verhinderung von Lösungsbewegung und Radionuklidtransport“, **Schachtverschlüsse und Streckenabdichtungen** des **Steinsalzstandortes Gorleben** für den Wirkungszeitraum $t < 10.000$ a

Im Hinblick auf die beispielhafte Robustheitseinschätzung gemäß der Methodik des Verfahrensschrittes 5 wird auf den ausführlichen Begleitbericht /GRS 10i/ (Bewertung der charakteristischen Parameter der rückhaltenden Sicherheitsfunktionen der Schachtverschlüsse sowie der Streckenverschlüsse zum Infrastrukturbereich Salzstandort Gorleben) verwiesen. Die geringe Robustheitseinschätzung, die bei der oben genannten Sicherheitsfunktion letztlich zur Identifikation eines Robustheitsdefizites führte, betraf die RSF-Parameter:

- Permeabilität
- Porosität
- Diffusivität

der Streckenabdichtungen zum Infrastrukturbereich.

Die Abdichtungen der Richtstrecken gegenüber dem Infrastrukturbereich mit Abdichtbauwerken aus Salzbeton im Fall Gorleben wurden in /GRS 10i/ aus folgendem Grund zu den Schachtverschlüssen gezählt: Im Vorhaben VerSi wurde für den Steinsalzstandort Gorleben ein einschlusswirksamer Gebirgsbereich gewählt, der im Hauptsalz der Staßfurtserie gelegen ist. Zu nicht-halitischen Horizonten (i. W. Hauptanhydrit), den Tagesschächten und den Salzstockflanken sind Mindestabstände von mindestens 50 m einzuhalten. Als Rand des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs im Endlagerbergwerk wird die Außenkante der Streckenabdichtungen in den Richtstrecken zum Infrastrukturbereich festgelegt. Die 50 m langen Streckenabdichtungen dienen daher zur Abdichtung des ewG nach außen und entsprechen daher sicherheitskonzeptionell dem unteren Dichtelement des Schachtabdichtungssystems des Ton-

steinstandortes, welches innerhalb des dortigen ewG gelegen ist und diesen nach außen abdichtet.

Bei den Streckenabdichtungen wurde im Vorhaben VerSi auf das Konzept der Streckenverschlüsse aus nicht kompaktierbarem Salzbeton zurückgegriffen, welches im Zuge der Stilllegungsplanungen zum Endlager Morsleben entwickelt wurde. Diese Bauwerke sind chemisch resistent gegenüber Na-Cl-Lösung. Für die Streckenverschlüsse wird beim Verschlusskonzept zu Gorleben im Vorhaben VerSi von einer Länge von 50 m und einer querschnittsgemittelten Permeabilität von 10^{-19} m^2 ausgegangen /GRS 10c/.

Die Gesamtbewertung ergab bei der oben genannten Sicherheitsfunktionen für die Streckenabdichtungen innerhalb des Zeitraums $t < 10.000$ Jahre, dass bei den zugehörigen Parametern signifikante Unsicherheiten hinsichtlich der integralen hydraulischen Eigenschaften, die sich aus dem Verbund der Eigenschaften der Einzelkomponenten Betonabdichtungssegment-Kontaktfuge-Auflockerungszone ergeben, bestehen. Im Einzelnen wurden in /GRS 10i/ folgende Einzelaspekte thematisiert, die letztlich bei der Charakterisierung zur Einstufung als mäßig robust führten:

- a) Die genauen Verhältnisse in der Saumzone zum Wirtsgestein und insbesondere die Kontaktbündigkeit des Abdichtbauwerks mit dem Wirtsgestein sind derzeit nur schwer erfassbar. Auch ist nicht abschließend geklärt, ob bereits in einem relativ frühen Stadium Kraftschluss mit dem angrenzenden Wirtsgestein hergestellt werden kann und andererseits eine Ausdehnungsbehinderung nicht zu Schädigungen des verhältnismäßig spröden Abdichtungsmaterials (Salzbeton) führt. Im Gegensatz zu den Schachtverschlüssen führen aufgrund des horizontalen Einbaus der Streckenverschlüsse schwerkraftbedingte Materialsetzungen nicht notwendigerweise zu einem Kraftschluss des Verschlussmaterials mit der Auflockerungszone in der Firstregion. Von einer Konsolidierung der Saumzone ähnlich wie bei den Bentonitsegmenten der Schachtabdichtungen kann aufgrund des nicht-quellfähigen und spröden Materialverhaltens von Salzbeton nicht a priori ausgegangen werden.
- b) Es kann auf der Grundlage des heutigen Standes von Wissenschaft und Technik nicht vollständig ausgeschlossen werden, dass Schrumpfungen nach Abklingen der Abbinde Temperaturen zu erhöhten Permeabilitäten in der Saumzone führen.
- c) Weitere Unwägbarkeiten stellen sich ausbildende horizontal verlaufende Mikrorisse dar, die zu einer Erhöhung der lateralen Durchlässigkeit führen können.

Zu den oben genannten Aspekten werden weitere Experimente für erforderlich gehalten. Die Zuverlässigkeit der Charakterisierung der integralen Streckenverschlusspermeabilität (und damit auch der physikalisch abhängigen Parameter Porosität und Diffusivität) kann derzeit auch angesichts der sehr hohen Anforderung an die Permeabilität (10^{-19} m^2) nur als mäßig bewertet werden (Einstufung 3).

Das Gesamtergebnis der beispielhaft für den Parameter Permeabilität von Schacht- und Streckenabdichtungen durchgeführten Bewertung lautete somit /GRS 10i): *„Das Vertrauen in die Charakterisierung der Permeabilität für den Ist-Zustand kann als mäßig eingeschätzt werden.* Hintergrund der Einstufung ist, dass die **Charakterisierbarkeit** des Istzustandes der integralen Streckenverschlusspermeabilität derzeit nur wenig verlässlich durchführbar ist. Die gleiche Bewertung erfolgte sinngemäß für die RSF-Parameter Porosität und Diffusivität.

Aufgrund der nur mäßigen Charakterisierbarkeit der integralen Permeabilität der Streckenverschlüsse, die aus den Einzelpermeabilitäten Betonabdichtungssegment-Kontaktfuge-EDZ und deren Verbund resultiert, erstreckten sich diese Unsicherheiten auch über den Zeitraum $t < 10.000 \text{ a}$. Hier wirken sich die Unsicherheiten auf das Prozessverständnis hinsichtlich der erreichbaren integralen Endpermeabilität im Streckenverschluss aus. Das **Prozessverständnis** zur Entwicklung der Materialeigenschaften über den Zeitraum $t < 10.000\text{a}$ konnte ebenfalls nur als mäßig eingestuft werden. Aufgrund dessen sind auch die genauen Auswirkungen des Gasdruckaufbaus auf Permeabilität Porosität und Diffusivität der Streckenverschlüsse nicht genau bekannt. Dies führte auch in Arbeitsschritt 5c zu einer Gesamteinstufung der Auswirkungen der Systementwicklungen auf die Lösungs- und Gaspermeabilität als **mäßig** (Einstufung: 3).

Bei Streckenverschlüssen besteht die **Auslegungsanforderung** der Unterschreitung einer integralen Permeabilität von 10^{-19} m^2 , damit die Abdichtungen hydraulisch als diffusionsdominierte Systeme wirken können. Eine konkrete Anforderung für die Porosität existiert nicht. Porosität und Permeabilität sind jedoch physikalisch gekoppelte Größen und sind demnach im Zusammenwirken zu betrachten. Im Hinblick auf die zentrale Anforderung, dass der Radionuklidtransport diffusionsdominiert sein muss, gelten für die Porosität hinsichtlich der Erfüllung der Auslegungsanforderung somit sinnentsprechend die gleichen Einschätzungen wie für die Permeabilität. Explizite Anforderungen an die Streckenabdichtungen bezüglich der Diffusivität sind ebenfalls nicht bekannt. Implizit besteht jedoch auch hier die Anforderung, dass das Verschlussmaterial möglichst geringe Porendiffusionskoeffizienten in der Größenordnung $D_p < 5 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ aufweist, um langfristig diffusionsdominierten Radionuklidtransport zu gewährleisten. Aufgrund der nur mäßigen Charakterisierbarkeit der integralen hydraulischen

Streckenverschlüsse und des nur mäßigen Prozessverständnisses hinsichtlich der erreichbaren integralen Materialendzustände im Streckenverschluss und damit auch der Auswirkung des Gasdruckaufbaus über den Zeitraum $t < 10.000$ a wurde in /GRS 10i/ festgestellt, dass nicht mit Sicherheit ausgesagt werden kann, dass diese Anforderungen tatsächlich eingehalten werden können. Insgesamt besteht daher nur ein mäßiges Vertrauen, dass die Auslegungsanforderungen an die hydraulischen Parameter der Streckenverschlüsse sicher eingehalten werden (Einstufung: 3).

Wie bereits oben erwähnt, war es aufgrund der Vergleichbarkeit der Sicherheitskonzepte zu Gorleben und zum Tonsteinstandort erforderlich, im Falle Gorlebens, die Abdichtungen der Richtstrecken gegenüber dem Infrastrukturbereich mit Abdichtbauwerken aus Salzbeton und die Schachtverschlüsse zu einer Endlagersystemkomponente zusammenzufassen. Aus diesem Grund wurde die Robustheitseinstufung zu den Streckenverschlüssen auf das **gesamte Schacht- und Streckenverschlussystem** Gorlebens aggregiert. Dies führte in /GRS 10i/ zu der Feststellung, dass insgesamt ein nur mäßiges Vertrauen, im Hinblick darauf, dass die Einhaltung der oben genannten Auslegungsanforderungen an die RSF-Parameter Permeabilität für den Zeitraum $t < 10.000$ a erfüllt werden und die hydraulischen RSF-Parameter als robust angesehen werden können. Dementsprechend konnte auch die zugehörige Sicherheitsfunktion „Begrenzung/Verhinderung von Lösungsbewegung und Radionuklidtransport“, Schachtverschlüsse und Streckenabdichtungen des Steinsalzstandortes Gorleben für den Wirkungszeitraum $t < 10.000$ a“ nicht besser als nur mäßig robust eingestuft werden (Einstufung: 3).

Ein Robustheitsdefizit im Zuge der beispielhaft angewendeten Abwägungsmethodik wurde nur für den Zeitraum < 10.000 Jahre identifiziert. Der Grund liegt in der Einstufung der **Relevanz** in Verfahrensschritt 3 (siehe Kap. 9). Hiernach wurde die Relevanz der oben genannten Sicherheitsfunktionen nur für die Übergangsphase (Zeitraum $t < 10.000$ Jahre) als sehr relevant (Einstufung 5) eingestuft, da es sich bei dem Schacht- und Streckenverschlussystem um „schnellwirkende Barrieren“ handelt, die in der anfänglichen Nachbetriebsphase (Zeitraum $t > 10.000$ Jahre) Lösungszutritte in die Einlagerungsbereiche unterbinden, bevor der Salzgrusversatz durch Kompaktion dauerhafte Barriereigenschaften erlangt. Für den Zeitraum > 10.000 Jahre liegen dagegen keine sicherheitskonzeptionellen Anforderungen an die im Endlagerkonzept zu Gorleben vorgesehenen Schachtverschlüsse und Streckenabdichtungen vor. Das Sicherheitskonzept sieht vor, dass der Versatz im Endlagerbergwerk zu diesem Zeitpunkt soweit konvergiert ist, dass dieser die abdichtende Funktion der Schacht- und Streckenverschlüsse übernommen hat. Da hierdurch die sicherheitsgerichtete Wirkung der Schacht- und Streckenverschlüsse entbehrlich wird, wurde ihre sicherheitsgerichtete Wirkung für den Zeitraum > 10.000 Jahre in Verfahrensschritt 3 (siehe Kap. 9) als nicht bzw. wenig relevant (Ein-

stufung:1) angesehen. Aus dem gleichen Grund entfielen für diesen Zeitraum die weiteren Robustheitsbewertungen für das Schacht- und Streckenverschlussystem Gorleben /GRS 10i/.

Fachliche Diskussion der Problemstellung

Generell ist festzustellen, dass für Streckenverschlüsse in Endlagern für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle bislang kein detailliertes technisches Konzept entwickelt wurde /DBE 08/. Im Gegensatz zu den Bauwerkskomponenten von Schachtverschlüssen existieren keine Referenzen für Materialien, Aufbau, Form und Anordnung der Dichtelemente sowie für die Einbautechnik.

In der Vergangenheit wurden im Zusammenhang mit den Stilllegungsplanungen zum Endlager Morsleben verschiedene Rezepturen und Einbautechniken für Verschlussbauwerke aus Salzbeton getestet und Messungen der Permeabilität nach Einbau durchgeführt. Die Einbaupermeabilität hängt von einer Reihe von Faktoren ab, wie der Rezeptur, der Temperaturentwicklung beim Abbinden etc. Die Permeabilitäten des Baustoffs als solcher sind durch Laborversuche gut bestimmbar.

Zur Messung der Permeabilität der Salzbetondichtelemente werden Permeabilitätsversuche in Einaxialpermeametern durchgeführt. Anhand der experimentellen Methoden kann sowohl das rheologische Verhalten als auch die Permeabilität von ausgewählten Rezepturen auch unter Konvergenzbedingungen im Labor zuverlässig ermittelt werden. Aufgrund vieler experimenteller Befunde ist der Kenntnisstand zur Porosität und Permeabilität bei Einbau des Salzbetons als gut zu bewerten. Die Aussagesicherheit bzgl. der Permeabilität der Bauelemente ist aufgrund von Messmethoden als gut einzuschätzen.

Die Probleme bestehen hinsichtlich der Übertragbarkeit der Laborexperimentalergebnisse auf die Verhältnisse des gesamten Abdichtbauwerks unter in-situ Bedingungen. Zur Bewertung der integralen querschnittsgemittelten Streckenverschlusspermeabilitäten liegen bislang nur wenige experimentelle Ergebnisse vor.

Die Permeabilität der Auflockerungszone nimmt mit zunehmender Zeit auf Grund des Aufkriechens des Salzes ab und erreicht Permeabilitätswerte von $k < 10^{-18} \text{m}^2$. Dieser Sachverhalt wird durch Messungen bestätigt, die im Rahmen des ALOHA2-Projektes und den laufenden Untersuchungen am Asse-Vordamm ermittelt wurden.

Durch eine ausreichend große aufgebrachte Druck/Vorspannung kann die Durchflussrate in der Kontaktzone im Grundsatz auf das erforderliche Maß herabgesetzt werden. Zur genaueren Bestimmung der Permeabilität und der dabei vorliegenden Spannungsrandbedingungen - insbesondere in der Kontaktzone - sowie des kohäsiven Verbundes werden derzeit Untersuchungen am Asse-Vordamm durchgeführt, die nach derzeitigem Stand der Untersuchungen untermauern, dass das Nachweisziel einer querschnittsgemittelten Permeabilität von 10^{-18} m^2 erreicht wird. Weiterhin ist ein in situ-Versuch an einem Streckenabdichtungsprototyp im Endlager Morsleben geplant.

Zusammenfassend wird festgestellt, dass zur Bestimmung der integralen Streckenverschlusspermeabilitäten, die aus den Einzelpermeabilitäten Betonabdichtungssegment-Kontaktfuge-EDZ und deren Verbund resultieren, bislang zu wenige experimentelle Ergebnisse vorliegen. Dies betrifft unter anderem die Verhältnisse in der Saumzone zum Wirtsgestein und hier insbesondere die Kontaktbündigkeit des Abdichtbauwerks mit dem Wirtsgestein. Auch zu den oben genannten Aspekten Schrumpfungen nach Rückgang der Abbinde Temperaturen, Ausbildung horizontal verlaufender Mikrorisse und Konsolidierungsverhalten unter in situ-Bedingungen wird signifikanter Forschungs- und Entwicklungsbedarf gesehen. Dies gilt insbesondere vor dem Hintergrund der sehr hohen Anforderung an die querschnittsgemittelte Permeabilität von 10^{-19} m^2 . Aus diesem Grund wird die Bewertung einer mäßigen Robustheit (Einstufung: 3) für die Streckenabdichtungen des Steinsalzstandortes Gorleben aufrecht erhalten.

Sicherheitskonzeptionelle Bedeutung

Im bisherigen Sicherheitskonzept zum Standort Gorleben gehören neben den Schachtverschlüssen auch die Streckenabdichtungen zum Infrastrukturbereich zu den schnell wirkenden Barrieren, die in einem frühen Stadium den ewG nach Außen abdichten sollen. Ihre Aufgabe ist es, im Vorfeld der anfänglich noch andauernden kompaktionsbedingten Entwicklung der Barriereigenschaften des Salzgrusversatzes, im Verbund mit den Schachtverschlüssen Lösungszutritte in die Einlagerungsbereiche, d.h. zu den von Salzgrus umgebenen, eingelagerten radioaktiven Abfällen zu unterbinden. Streckenabdichtungen bestehen aus wirtsgesteinsfremden Material, welches Eigenschaften aufweist (hier: Salzbeton), die ein schnelles Erreichen einer hydraulischen Dichtwirkung bewirken sollen. Der sicherheitskonzeptionell wesentliche Wirkungszeitraum liegt daher bereits innerhalb der Übergangsphase, d.h. im Zeitraum $t < 10.000$ Jahre.

Aus diesem Grund wird die Einstufung einer sehr hohen Relevanz (Einstufung: 5) für diesen Zeitraum als gerechtfertigt angesehen. Für den Zeitraum der stationären Phase ($t > 10.000$

Jahre) wird dagegen im Sicherheitskonzept davon ausgegangen, dass der kompaktierte Salzgrusversatz Material- und damit Barriereigenschaften angenommen hat, die in etwa denen des unverritzten Steinsalzes entsprechen. Daher wurde die Relevanz der Streckenabdichtungen für diesen Zeitraum als gering eingestuft und in /GRS 10i/ auf eine Robustheitsbewertung für diesen Zeitraum verzichtet. Hieraus erklärt sich, dass nur für den Zeitraum $t < 10.000$ Jahre Robustheitsdefizite identifiziert wurden, da hier die Erwartung einer bezogen auf die (für diesen Zeitraum sehr hoch angesetzte) Relevanz angemessene Robustheitseinstufung gemäß den in Kap. 12 genannten Bedingungen nicht erfüllt wird.

Aufgrund der im Vorangegangenen beschriebenen Unsicherheiten hinsichtlich der integralen hydraulischen Eigenschaften der Abdichtungsbauwerke insbesondere im Übergangsbereich des Bauwerks zur Auflockerungszone ist es derzeit offen, ob und zu welchem Zeitpunkt die sicherheitskonzeptionell geforderte, möglichst kurzfristige Barrierewirksamkeit der Streckenabdichtungen mit Permeabilitätswerten um 10^{-19} m^2 erreicht werden kann. Aus diesem Grund kann derzeit nicht völlig ausgeschlossen werden, dass die Verschlüsse im Vergleich zum unverritzten Steinsalz Zonen erhöhter Permeabilität darstellen werden. Es ist daher fraglich, ob die derzeit konzipierten Streckenabdichtungen während der Übergangsphase den Zufluss von Laugen in die versetzten Einlagerungsbereiche vollständig verhindern können.

Möglichkeiten der Korrektur des Robustheitsdefizits

Im vorliegenden Fall bestehen 2 Möglichkeiten zur Behebung der bei der oben genannten Sicherheitsfunktion identifizierten Robustheitsdefizite durch konzeptionelle Modifikationen:

1. Entwicklung eines an den Standort Gorleben angepassten und optimierten Streckenverschlusskonzeptes: Bislang liegt kein Referenzkonzept für Streckenverschlüsse und Dammbauwerke vor /DBE 08/. Es ist grundsätzlich vorstellbar, dass durch eine Optimierung der Baustoffe, der Form und der Anordnung der Dichtelemente zusammen mit einer möglichst robusten Einbautechnik die sicherheitskonzeptionellen Ziele des hermetischen Einschlusses erreicht werden können. In jedem Fall besteht zu diesem Aspekt signifikanter Forschungs- und Entwicklungsbedarf sowie späterer Nachweisbedarf.

2. Modifikation des Sicherheitskonzeptes: Sollte keine Lösung für die unter 1 genannte Korrekturmöglichkeit gefunden werden können und folglich der Nachweis des hermetischen Einschlusses nicht erreichbar sein, so bliebe letztlich noch die Möglichkeit einer Modifikation des Sicherheitskonzeptes zu Endlagern in Salinarstandorten. Diesbezüglich gelten für die Streckenabdichtungen sinngemäß die gleichen Ausführungen wie zum Salzgrusversatz. Durch die

Abschwächung der sicherheitskonzeptionellen Anforderungen würde jedoch auch hier ein nach heutigen Maßstäben vorhandener, intrinsischer Robustheitsvorteil der Endlagerung radioaktiver Abfälle in Salzstrukturen verspielt.

Verteiler:

Druckexemplare

BfS	M. Beushausen		3
GRS	Abteilung 7030	fap	1
GRS	Autor	fap	1
Dr. B. Baltés	Autor		1
GRS	Bibliothek	hog	1
Fa. PanGeo	Dr. Appel		1
Fa. Intac-GmbH	J. Kreusch		1
Gesamtsauflage		gedruckte Exemplare	9

Bericht im pdf-Format

BfS	M. Beushausen	
BfS	Dr. Volland	
GRS	Geschäftsführung	wfp, stj
GRS	Bereichsleiter	paa, stc, ver, rot, prg, erv, zir
GRS	Projektcontrolling	brs
GRS	Projektleitung /Abteilung 7030	fap
Dr. B. Baltés	Autor	
GRS	TECDO	nit
GRS	GRS-Portal	vet
GRS	Elektron. ZA	(eZA) vet

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

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

Forschungszentrum
85748 Garching b. München
Telefon +49 89 32004-0
Telefax +49 89 32004-300

Kurfürstendamm 200
10719 Berlin
Telefon +49 30 88589-0
Telefax +49 30 88589-111

Theodor-Heuss-Straße 4
38122 Braunschweig
Telefon +49 531 8012-0
Telefax +49 531 8012-200

www.grs.de