

**Sicherheits- und
Nachweiskonzept für
ein Endlager in flach
lagernden Salzformationen**

Sicherheits- und Nachweiskonzept für ein Endlager in flach lagernden Salzformationen

Ergebnisse aus dem
Vorhaben KOSINA

Jonathan Kindlein
Dieter Buhmann
Jörg Mönig
Jens Wolf

April 2018

Anmerkung:

Das FuE-Vorhaben KOSINA wurde mit Mitteln des BMWi über den Projektträger Karlsruhe, Wassertechnologie und Entsorgung (PTKA-WTE) unter dem Förderkennzeichen 02E11405A, 02E11405B, 02E11405C sowie über eine Zuweisung des BMWi an die BGR unter dem Förderkennzeichen 02E11395 durchgeführt.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Auftragnehmer. Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der Meinung des Auftraggebers übereinstimmen.

Deskriptoren

Einschlusswirksamer Gebirgsbereich, Endlager, Geotechnische Barriere, Hochaktiver Abfall, Nachweis, Nachweiskonzept, Salz, Sicherheitsanalyse, Sicherheitskonzept, Wirtsgestein

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Randbedingungen und Vorhabensziele	7
2.1	Randbedingungen	7
2.2	Vorhabensziele	8
3	Sicherheitskonzept.....	11
3.1	Relevante Vorgaben der Sicherheitsanforderungen des Bundesumweltministeriums	11
3.2	Leitgedanken	14
3.3	Zielsetzungen und Maßnahmen für die Nachverschlussphase	17
3.3.1	Zielsetzungen	18
3.3.2	Strategische Maßnahmen.....	21
4	Nachweiskonzept.....	29
4.1	Relevante Vorgaben der Sicherheitsanforderungen des BMU	29
4.2	Grundlagen und Elemente des Nachweiskonzepts	35
4.3	Vorgehensweise zur Ausweisung der Lage und Grenzen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs	37
4.4	Erhalt des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches im Nachweiszeitraum	39
4.4.1	Mächtigkeit der Salzbarriere im einschlusswirksamen Gebirgsbereich	39
4.4.2	Integrität der geologischen Barriere	40
4.4.3	Integrität der geotechnischen Verschlussbauwerke	41
4.5	Kritikalitätsausschluss.....	44
4.6	Einschluss der Radionuklide im ewG	45
4.6.1	Bewertung des Radionuklideinschlusses im ewG für in Lösung befindliche Radionuklide	46
4.6.2	Bewertung des Radionuklideinschlusses im ewG für gasförmig freigesetzte Radionuklide.....	48
4.6.3	Bewertung der Modellrechnungen zur radiologischen Langzeitaussage ...	48

4.7	Bewertung von Human-Intrusion-Szenarien.....	51
5	Umgang mit Ungewissheiten	53
5.1	Umgang mit Ungewissheiten im Vorhaben KOSINA	54
5.2	Ungewissheiten bezüglich der zukünftigen Entwicklung.....	55
5.3	Umgang mit nicht prognostizierbaren Entwicklungen.....	57
5.4	Umgang mit Daten- und Parameterungewissheiten	58
5.5	Umgang mit Modellungewissheiten	58
5.5.1	Ungewissheiten bei der modellhaften Beschreibung der generischen Standortgegebenheiten.....	58
5.5.2	Ungewissheiten bei der modellhaften Beschreibung von Prozessen.....	60
6	Zusammenfassung	63
	Literaturverzeichnis.....	65
	Abbildungsverzeichnis.....	75

1 Einleitung

Das FuE-Vorhaben KOSINA hatte zum Ziel, erstmalig ein (standortunabhängiges) technisches Konzept für ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente in flach lagernden Steinsalzformationen zu entwickeln und dessen technische Machbarkeit und Sicherheit zu untersuchen. Dies umfasste auch die Entwicklung und Überprüfung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein solches Endlager. Die vorliegenden Ergebnisse sollen dazu beitragen, dass der nach dem „Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz – StandAG)“ /STA 13, STA 17/ vorgesehene Vergleich von Endlagersystemen in unterschiedlichen geologischen Formationen durchgeführt werden kann, um auf dieser Basis den Standort für eine Anlage zur Endlagerung zu finden, der „die bestmögliche Sicherheit für den dauerhaften Schutz von Mensch und Umwelt vor ionisierender Strahlung und sonstigen schädlichen Wirkungen dieser Abfälle für einen Zeitraum von einer Million Jahren gewährleistet“ /STA 17/.

Endlagerkonzepte für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente in flach lagernden Salzschieben gibt es bisher in Deutschland nicht. Allerdings wird in New Mexico (USA) seit 1999 das Endlager WIPP /DOE 18/ betrieben, in dem langlebige transuranhaltige Abfälle (TRU) militärischen Ursprungs in einer flach lagernden Salzformation in etwa 600 m Tiefe eingelagert werden. Für Fragen der Betriebssicherheit und die Führung eines Langzeitsicherheitsnachweises für ein Endlager können zudem die langjährigen Erfahrungen in Deutschland bei der Einlagerung von chemisch-toxischen Abfällen in verschiedenen Untertagedeponien in flach lagernden Salzformationen wichtige Beiträge liefern. Bei allen bisherigen Erfahrungen bei der untertägigen Entsorgung von Gefahrstoffen in flach lagernden Salzformationen hat der Einfluss der Wärme auf das umliegende Gebirge aber keine Rolle gespielt.

Im Verbundprojekt KOSINA wurde u. a. das im vorliegenden Bericht dargelegte Sicherheits- und Nachweiskonzept entwickelt, auf dem die weiteren Arbeiten in den verschiedenen Arbeitspaketen aufbauten. Das Sicherheitskonzept beschreibt verbal-argumentativ, durch welche geologischen Gegebenheiten und technischen Maßnahmen die geforderte Sicherheit für ein Endlager an einem Standort erreicht und langfristig gewährleistet werden kann. Dem Sicherheitskonzept liegen Leitgedanken zu Grunde, die in übergeordneter und qualitativer Weise beschreiben, wie in den zu betrachtenden Fallbeispielen die sichere und langfristige Endlagerung der radioaktiven Abfälle erreicht werden soll /MÖN 12/. Die Leitgedanken werden auf Basis der vorlie-

genden Kenntnisse zu den im Endlagersystem möglicherweise ablaufenden Prozessen, die die Sicherheit des Endlagers beeinflussen können, sowie zu den geologischen Standortgegebenheiten entwickelt. Aus dem Sicherheitskonzept ergeben sich konkrete Anforderungen an den Standort, das Endlagerkonzept und die Endlagerauslegung. Während die Erfüllung dieser Anforderungen an einen Standort durch dessen charakteristische Eigenschaften gewährleistet sein muss, lassen das Endlagerkonzept und die Endlagerauslegung Gestaltungsmöglichkeiten zur Erfüllung der Anforderungen zu.

Aus dem Sicherheitskonzept leiten sich schließlich die Einzelnachweise ab, die zum Nachweis der Sicherheit der Endlagerung an einem Standort zu erbringen sind; sie werden im Nachweiskonzept beschrieben.

Das Sicherheitsniveau, das ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle in tiefen geologischen Formationen nachweislich einzuhalten hat, wird in entsprechenden Sicherheitsanforderungen festgelegt und veröffentlicht, zuletzt 2010 vom Bundesumweltministerium /BMU 10/. Neben der Einhaltung von allgemeinen Schutzziele und Schutzkriterien wird das Sicherheitsniveau demnach durch die Umsetzung der Gesamtheit der regulatorischen Anforderungen bestimmt.

Durch die Sicherheitsanforderungen werden Vorgaben hinsichtlich des Sicherheitskonzeptes gemacht. Dies betrifft den Einschluss der radioaktiven Abfälle in einem einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG), der einen in seiner Lage und in seinen Dimensionen festzulegenden Bereich im Wirtsgestein um die Grubenbaue des Endlagerbergwerks, mindestens um die Grubenbaue der Einlagerungsbereiche einschließt, und den Verschluss der technisch unvermeidbaren Durchörterung der geologischen Barriere. Außerdem ist die Sicherheit des Endlagers nach seiner Stilllegung durch ein robustes Multibarrierensystem sicherzustellen, das seine Funktionen passiv und wartungsfrei erfüllt und das seine Funktionstüchtigkeit selbst für den Fall in ausreichendem Maße beibehält, dass einzelne Barrieren nicht ihre volle Wirkung entfalten. Die Sicherheitsanforderungen stellen damit die Sicherheitsfunktion Einschluss (im ewG) gegenüber den bis zum Jahr 2010 geltenden Sicherheitskriterien /BfM 83/ stärker in den Fokus des Sicherheitskonzeptes.

Die Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ sind allgemeingültig und ohne Bezug auf ein bestimmtes Wirtsgestein formuliert. Für eine Anwendung auf eine bestimmte geologische Situation muss das Sicherheitskonzept im Rahmen der Vorgaben der Sicherheitsanforderungen konkretisiert werden.

Im FuE-Vorhaben ISIBEL wurde zum ersten Mal ein Sicherheitskonzept erstellt, das den ewG-Gedanken und die hervorgehobene Rolle der Sicherheitsfunktion Einschluss berücksichtigt, und für eine **Salzformation in steiler Lagerung** ein darauf basierendes Nachweiskonzept erarbeitet /BUH 08a/. Der in den Sicherheitsanforderungen geforderte Einschluss soll demnach dadurch erreicht werden, dass ein Zutritt von Lösungen zu den Abfällen ausreichend be- bzw. ganz verhindert wird. Werden bei der Berechnung der Konsequenzen die Kriterien der Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ eingehalten, wird von einem *sicheren Einschluss* gesprochen. Falls im Bewertungszeitraum überhaupt keine Radionuklide aus dem ewG freigesetzt werden, wird dies als *vollständiger Einschluss* bezeichnet. In diesem Zusammenhang wurde auch auf die wichtige Funktion des in die Strecken als Versatz eingebrachten Salzgruses für das Sicherheitskonzept hingewiesen, insbesondere auf die Bedeutung des zeitlichen Ablaufs und des Endzustandes bei der Kompaktion. Der Nachweis des Einschlusses basiert auf der Langzeitaussage zur Integrität der geologischen Barriere und dem Nachweis der Integrität der geotechnischen Barrieren des Endlagersystems. Ergänzt werden diese Integritätsnachweise durch Bewertungen der potentiellen Freisetzungen von Radionukliden aus dem ewG. Dabei ist durch Vergleich mit geeigneten Indikatorwerten zu belegen, dass diese Freisetzungen geringfügig sind. Im Vorhaben ISIBEL wurde dafür unter anderem das Konzept des Radiologischen Geringfügigkeitsindex (RGI) entwickelt /BUH 10a/.

Da die endgültige Fassung der Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ zum Ende des FuE-Vorhabens ISIBEL noch nicht veröffentlicht war, konnten einige Anforderungen im Sicherheits- und Nachweiskonzept noch nicht behandelt werden. Das betrifft insbesondere die Rückholbarkeit der Abfälle sowie den Umgang mit einem möglichen Eindringen des Menschen in das Endlager in der Nachverschlussphase (Human Intrusion). In der vorläufigen Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben (VSG) wurde daher das Sicherheits- und Nachweiskonzept für eine Salzformation in steiler Lagerung weiterentwickelt /MÖN 12/. Basierend auf den für die VSG detailliert ausgearbeiteten Endlagerkonzepten wurde systematisch ein Katalog von technischen Maßnahmen zur Umsetzung des Sicherheitskonzepts abgeleitet /BOL 11, BOL 12, MÖN 12/.

Im Gegensatz zum Sicherheitskonzept für Salzformationen in steiler Lagerung, in dem der Einschluss dadurch erreicht werden soll, dass ein Zutritt von Lösungen zu den Abfällen ausreichend be- bzw. ganz verhindert wird, erfolgt der Einschluss der radioaktiven Abfälle bei einem Endlager im **Tongestein** primär durch die Behinderung des Schadstofftransports durch chemische und physikalische Prozesse der Rückhaltung

innerhalb des ewG /RÜB 14/. Die Rückhaltung wird durch Eigenschaften des Tongesteins im ewG im Verbund mit den geotechnischen Barrieren gewährleistet. Als Folge des langsamen Schadstofftransports wird ein Großteil der Radioaktivität bereits während des Transports innerhalb des ewG durch radioaktiven Zerfall abgebaut.

Für Salzformationen in steiler Lagerung und für Tongestein liegen somit Sicherheitskonzepte für Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle vor, /MÖN 12/ und /RÜB 14/. Für Salz in nicht steiler Lagerung wird das im Vorhaben KOSINA entwickelte Sicherheitskonzept im vorliegenden Bericht dargelegt. Für **Kristallingestein** liegt eine Machbarkeitsstudie (GEISHA) vor, in der grob ein Endlagerkonzept vorgestellt wird /PAP 97/. Im Vorhaben KONEKD wurden neue technische Endlagerkonzepte für Kristallingestein für zwei ewG-Typen (überlagernder und multipler ewG) erarbeitet /BER 17/.

Sicherheitskonzepte wurden auch für die Stilllegung des Endlagers für radioaktive Abfallstoffe in Morsleben (ERAM) und der Schachanlage Asse II entwickelt. In beiden Fällen wurden die radioaktiven Abfallstoffe in ehemaligen Gewinnungsbergwerken eingelagert, deren Grubenbaue unter der Zielsetzung einer wirtschaftlichen Salzgewinnung aufgefahren worden sind und nicht unter dem Gesichtspunkt einer sicheren Endlagerung radioaktiver Abfallstoffe. Deshalb sind die Sicherheitskonzepte nicht mit den hier beschriebenen Sicherheitskonzepten für ein zu errichtendes Endlager für wärmeentwickelnde hochradioaktive Abfallstoffe vergleichbar und werden im vorliegenden Bericht nicht weiter thematisiert.

Außerhalb Deutschlands ist die WIPP das einzige Endlager in einer Salzformation. Es wurde für TRU-Abfall gemäß den US-Standards genehmigt und wird seit 1999 betrieben. Die Leitgedanken für dessen Sicherheitsbewertung bzw. die konzeptionellen Belange wurden bei den hier dargestellten Konzepten berücksichtigt.

Das Sicherheits- und Nachweiskonzept wurde im Vorhaben KOSINA stufenweise entwickelt. Zunächst wurden die Grundzüge des Sicherheitskonzeptes erarbeitet und in einem Projekt-Zwischenbericht zusammengefasst /BER 15/. Hierfür wurde auch überprüft, inwieweit die entsprechenden Arbeitsergebnisse aus dem FuE-Vorhaben ISIBEL /BUH 08a/ und der VSG /MÖN 12/ für ein Endlager in flach lagernden Steinsalzformationen verwendet werden können. Auf der Basis dieser Grundzüge wurde das vorliegende Sicherheitskonzept fertiggestellt.

Dem Sicherheitskonzept liegen Leitgedanken zu Grunde, die in übergeordneter und qualitativer Weise beschreiben, wie die sichere und langfristige Endlagerung der radioaktiven Abfälle erreicht werden soll. Anhand der Leitgedanken werden zunächst Zielsetzungen für das Sicherheitskonzept formuliert sowie strategische planerische und technische Maßnahmen für die Entwicklung des Endlagerkonzeptes und für die Auslegung des Endlagerbergwerks abgeleitet und ggf. Anforderungen an diese Maßnahmen beschrieben. Dabei werden nicht alle Aspekte aus den Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ vollumfänglich einbezogen. Da sich das FuE-Vorhaben KOSINA im konzeptionellen Bereich bewegt, sind die Anforderungen, die sich auf administrative Maßnahmen beziehen, im Wesentlichen die Abschnitte 9 und 10, nicht von Bedeutung. Das hier dargestellte Sicherheits- und Nachweiskonzept bezieht sich deshalb nur auf Aspekte und Anforderungen, die die **technische Sicherheit in der Nachverschlussphase** betreffen.

Die Anforderungen an die aus den Zielsetzungen des Sicherheitskonzeptes abgeleiteten Maßnahmen sind in der Regel zunächst qualitativer Natur. Bei der Entwicklung des Endlagerkonzeptes und bei der detaillierten technischen Auslegung des Endlagerbergwerks ist die Erfüllung der qualitativen Anforderungen zu belegen. In einigen Fällen können aber bereits auf Ebene des Sicherheitskonzeptes auf Grund vorhandener Erkenntnisse quantitative Anforderungen formuliert werden, so z. B. bei der Festlegung von Maximaltemperaturen oder bei der Festlegung von Sicherheitsabständen. Für die in diesem Bericht dargelegten strategischen Maßnahmen werden an einigen Stellen Angaben aus der Literatur zitiert, die als Richtwerte für eine sicherheitsorientierte Endlagerauslegung dienen sollen. Diese Werte sind als Ausgangswerte für eventuell notwendige Iterationen zu verstehen und stellen keine festgelegten Vorgaben aus dem Sicherheitskonzept dar.

2 Randbedingungen und Vorhabensziele

2.1 Randbedingungen

Die nationalen gesetzlichen und untergesetzlichen Regelungen legen die wesentlichen Rahmenbedingungen für die Endlagerung radioaktiver Abfälle fest. Dazu gehören unter anderem das Atomgesetz /ATG 17/, die Strahlenschutzverordnung /STV 17/ sowie das Bundesberggesetz /BBG 17/ mit der zugehörigen Bundesbergverordnung /ABV 17/. Sie sind somit auch für das Vorhaben KOSINA zugrunde zu legen; darüber hinaus sind vor allem die „Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle“ /BMU 10/ maßgeblich. Im Vorhaben KOSINA sind ferner die einschlägigen internationalen Empfehlungen der ICRP, der IAEA /IAEA 11/ sowie der OECD-NEA /NEA 04, NEA 09/ zu berücksichtigen, insbesondere soweit sie Ergänzungen oder Konkretisierungen zu den nationalen Regelungen enthalten. Das Dokument /IAEA 11/ ist für alle Arten von Endlagern, auch für oberflächennahe, formuliert worden, weshalb im Vorhaben KOSINA auch noch auf die früheren, spezifischeren Anforderungen für ein Endlager in tiefen geologischen Schichten /IAEA 06/ zurückgegriffen wird.

In Kapitel 3 der Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ werden für die Endlagerung wärmeentwickelnder hochradioaktiver Abfälle zwei wesentliche allgemeine Schutzziele formuliert:

- *Der dauerhafte Schutz von Mensch und Umwelt vor der ionisierenden Strahlung und sonstigen schädlichen Wirkungen dieser Abfälle*
- *die Vermeidung unzumutbarer Lasten und Verpflichtungen für zukünftige Generationen.*

Darüber hinaus werden in Kapitel 4 insgesamt acht Sicherheitsprinzipien genannt, unter deren Beachtung die beiden allgemeinen Schutzziele zu erreichen sind. Von diesen lassen sich einige konkrete Hinweise für die Erstellung des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes ablesen. Außerdem muss sich das Endlagersystem durch Robustheit auszeichnen.

In den Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ wird die Entwicklung eines Sicherheitskonzeptes für die Betriebsphase und die Nachverschlussphase des Endlagers gefordert. Dabei muss das Sicherheitskonzept sowohl sicherheitsrelevante Aspekte der Betriebsphase als auch der Nachverschlussphase in einem ganzheitlichen Ansatz wider-

spruchsfrei berücksichtigen. Es muss gewährleistet sein, dass gemäß den Sicherheitsanforderungen /BMU 10/, Abschnitt 8.6, in der Betriebsphase bis zum Verschluss der Schächte eine Rückholung der Abfallbehälter möglich ist. Dabei dürfen Maßnahmen, die zur Sicherstellung der Möglichkeiten zur Rückholung getroffen werden, die Langzeitsicherheit des Endlagersystems nicht beeinträchtigen.

Die sicherheitsrelevanten Aspekte der betrieblichen Abläufe als solche (Abschnitte 8.1 und 8.8 der Sicherheitsanforderungen) können erst dann detailliert bewertet werden, wenn die Planung der Endlagerkonzepte im dazu notwendigen Detaillierungsgrad vorliegt, welcher im Vorhaben KOSINA nicht vorgesehen war. Es erfolgte aber eine Einschätzung, ob die für KOSINA entwickelten Endlagerkonzepte dem Stand von Wissenschaft und Technik entsprechen und ob aus Sicht der Betriebssicherheit grundlegende Bedenken gegen die Machbarkeit erkennbar sind /PRI 18/.

2.2 Vorhabensziele

Das im Vorhaben KOSINA entwickelte Sicherheits- und Nachweiskonzept für ein Endlager in flach lagernden Steinsalzformationen bezieht sich somit im Wesentlichen auf die Nachverschlussphase und dient der Konkretisierung der für das Vorhaben relevanten Vorgaben in /BMU 10/. Dabei wurden die entsprechenden Arbeitsergebnisse aus den FuE-Vorhaben ISIBEL /BUH 08a/ und VSG /MÖN 12/ berücksichtigt. Im Einzelnen wurden folgende Aufgaben durchgeführt:

1. Entwicklung eines Sicherheitskonzeptes für ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente in flach lagernden Salzformationen
2. Entwicklung eines auf dem Sicherheitskonzept basierenden Nachweiskonzeptes
 - a. Festlegung von Indikatoren und Kriterien zur Bewertung des Einschlussvermögens, z. B. „sicherer Einschluss“, „vollständiger Einschluss“, sowie der radiologischen Sicherheit
 - b. Festlegung der Vorgehensweise zur Ausweisung der Lage und der Grenzen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (ewG)
 - c. Festlegung von methodischen Konzepten
 - i. für die Bewertung der Integrität der geologischen Barriere

- ii. für die Bewertung der Integrität der geotechnischen Barrieren
 - iii. für die sicherheitsbezogene Bewertung der Wirksamkeit des Radionuklid-einschlusses im ewG
3. Entwicklung eines Konzepts zum Umgang mit Ungewissheiten

3 Sicherheitskonzept

3.1 Relevante Vorgaben der Sicherheitsanforderungen des Bundesumweltministeriums

Im Sicherheitskonzept müssen für die zur Durchführung des Vorhabens KOSINA relevanten Aspekte der Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ Konkretisierungen vorgeommen werden. Für das Sicherheitskonzept für die Nachverschlussphase sind vor allem Aspekte in den Abschnitten 4 (Sicherheitskriterien), 5 (Optimierung), 6 (Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen), 7 (Sicherheitsnachweise) und 8 (Endlagerauslegung) relevant. Da sich das Vorhaben KOSINA eher im technisch-konzeptionellen Bereich bewegt, werden die Sicherheitsanforderungen, die sich auf administrative Maßnahmen beziehen (i. W. Abschnitt 9: Sicherheitsmanagement, Abschnitt 10: Dokumentation) nicht berücksichtigt.

Nachfolgend sind die für das Vorhaben KOSINA relevanten Bestimmungen aus /BMU 10/ auszugsweise zitiert (in Kursivschrift) und die entsprechenden Abschnitte angegeben, um später eine einfachere Zuordnung der für das Sicherheitskonzept formulierten Ziele und der daraus abgeleiteten Maßnahmen zu diesen Vorgaben zu ermöglichen:

Der dauerhafte Schutz von Mensch und Umwelt ist unter Beachtung folgender Sicherheitsprinzipien zu erreichen:

- 4.1 Die radioaktiven und sonstigen Schadstoffe in den Abfällen müssen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich konzentriert und eingeschlossen und damit möglichst lange von der Biosphäre ferngehalten werden.*
- 4.2 Die Endlagerung muss sicherstellen, dass Freisetzungen radioaktiver Stoffe aus dem Endlager langfristig die aus der natürlichen Strahlenexposition resultierenden Risiken nur sehr wenig erhöhen.*
- 4.3 Die Endlagerung darf die Artenvielfalt nicht gefährden. Dabei wird davon ausgegangen, dass auch terrestrische Ökosysteme sowie andere Spezies in ihrer Art geschützt werden, wenn der Mensch als Individuum vor ionisierender Strahlung geschützt ist.*

4.4 *Die anderweitige Nutzung der natürlichen Ressourcen darf nicht unnötig eingeschränkt werden.*

[...]

Zur Vermeidung unzumutbarer Lasten und Verpflichtungen für zukünftige Generationen sind folgende Sicherheitsprinzipien zu beachten:

4.6 *Das Endlager ist so zu errichten und so zu betreiben, dass für den zuverlässigen langfristigen Einschluss der radioaktiven Abfälle im einschlusswirksamen Gebirgsbereich in der Nachverschlussphase keine Eingriffe oder Wartungsarbeiten erforderlich werden.*

[...]

Über die genannten Sicherheitsprinzipien hinaus sind folgende Bestimmungen der Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ für das Vorhaben KOSINA relevant:

5.1 *[...] Entscheidend für die Zuverlässigkeit des langzeitsicheren Einschlusses ist ein robustes Barrierensystem, bei dem die Sicherheitsfunktionen des Endlagersystems und seiner Barrieren gegenüber inneren und äußeren Einflüssen und Störungen unempfindlich sind, das Verhalten des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs gut prognostizierbar ist und die Ergebnisse der Sicherheitsanalyse gegenüber Abweichungen von den zugrunde gelegten Annahmen unempfindlich sind. [...]*

5.2 *Die Optimierung des Endlagers mit Blick auf eine zuverlässige Isolation der radioaktiven Stoffe im Endlager vor zukünftigen menschlichen Aktivitäten ist nachrangig zu den oben aufgeführten Optimierungszielen durchzuführen. [...]*

6.1 *Maßgeblich für den Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen in der Nachverschlussphase ist die Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs. Die radioaktiven Abfälle müssen in diesem Gebirgsbereich so eingeschlossen sein, dass sie dort verbleiben und allenfalls geringfügige Stoffmengen diesen Gebirgsbereich verlassen können. Zusätzliche Expositionen sollen nur in einem begrenzten Gebiet auftreten können, so dass möglichst wenige Personen einer Generation betroffen sein können.*

- 7.2.4 *Ausschluss von Kritikalität: Es ist zu zeigen, dass sich selbst erhaltende Kettenreaktionen sowohl bei wahrscheinlichen wie auch bei weniger wahrscheinlichen Entwicklungen ausgeschlossen sind.*
- 8.2 *Die Durchörterung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs mit Schächten, Auffahrungen oder Bohrungen ist zu minimieren. Bohrungen, Schächte und weitere Auffahrungen sind gebirgsschonend auszuführen und, falls sie nicht mehr gebraucht werden, vor dem Einlagerungsbetrieb so zu verschließen, dass die Barriereigenschaften des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs und sonstiger sicherheitsrelevanter Barrieren erhalten bleiben.*
- 8.3 *Bei der Festlegung der Grenzen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs mit den darin aufgefahrenen Einlagerungsfeldern und Einlagerungskammern oder Einlagerungsbohrlöchern müssen sowohl eine hinreichende Tiefenlage wie auch ein ausreichender Abstand zu geologischen Störungen eingehalten werden. Die Tiefenlage und der Abstand sind im Rahmen der durchgeführten Sicherheitsanalysen und Sicherheitsbewertungen abzuleiten.*
- 8.5 *Das Endlager ist in Einlagerungsfelder mit einzelnen Einlagerungsbereichen zu untergliedern. Die Anzahl der offenen Einlagerungsbereiche ist gering zu halten. Diese sind zügig zu beladen, anschließend zu verfüllen und sicher gegen das Grubengebäude zu verschließen.*
- 8.6 *Abfallbehälter müssen unter Berücksichtigung der darin verpackten Abfallprodukte und des sie umgebenden Versatzes folgende Sicherheitsfunktionen erfüllen:*
- Für die wahrscheinlichen Entwicklungen muss eine Handhabbarkeit der Abfallbehälter bei einer eventuellen Bergung aus dem stillgelegten und verschlossenen Endlager für einen Zeitraum von 500 Jahren gegeben sein. Dabei ist die Vermeidung von Freisetzungen radioaktiver Aerosole zu beachten.*
 - In der Betriebsphase bis zum Verschluss der Schächte oder Rampen muss eine Rückholung der Abfallbehälter möglich sein.*

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

8.7 *Das Einschlussvermögen des Endlagers muss auf verschiedenen Barrieren mit unterschiedlichen Sicherheitsfunktionen beruhen. Mit Blick auf die Zuverlässigkeit des Einschlusses ist das Zusammenspiel dieser Barrieren in ihrer Redundanz und Diversität zu optimieren. Dabei sind das Gefährdungspotenzial der Abfälle und die unterschiedliche Wirkung der Barrieren in den verschiedenen Zeitbereichen zu berücksichtigen. Die Sicherheit des Endlagers nach seiner Stilllegung ist demnach durch ein robustes, gestaffeltes Barrierensystem sicherzustellen, das seine Funktionen passiv und wartungsfrei erfüllt und das seine Funktionstüchtigkeit selbst für den Fall in ausreichendem Maße beibehält, falls einzelne Barrieren nicht ihre volle Wirkung entfalten.*

9.7 *Für die Zeit nach erfolgtem Verschluss sind administrative Vorkehrungen zu treffen, die so effektiv wie praktisch erreichbar bewirken, dass keine den dauerhaften Einschluss der Abfälle gefährdenden menschliche Aktivitäten im Bereich des Endlagers durchgeführt werden. Diese Maßnahmen müssen außerdem so konzipiert sein, dass sie möglichst lange in die Zukunft wirksam bleiben.*

3.2 Leitgedanken

Das Sicherheitskonzept für ein Endlager in einer flach lagernden Salzformation basiert, ausgehend von den allgemeinen Vorgaben zum Sicherheitskonzept in /BMU 10/, auf folgenden Leitgedanken:

- Es soll ein möglichst weitgehender Einschluss der radioaktiven Abfälle in einem definierten Gebirgsbereich um die Abfälle herum erreicht werden. (vgl. Abschnitte 4.1, 4.2, 4.3 und 6.1 der Sicherheitsanforderungen /BMU 10/)
- Der Einschluss soll dabei sofort nach Verschluss des Endlagerbergwerks wirksam werden und durch das Endlagersystem dauerhaft und nachsorgefrei sichergestellt sein. (vgl. Abschnitt 4.6 der Sicherheitsanforderungen /BMU 10/)
- Der sofortige und dauerhafte Einschluss der radioaktiven Abfälle in einem definierten Gebirgsbereich um die Abfälle soll vorrangig dadurch erreicht werden, dass ein

Zutritt von Lösungen zu den Abfällen verhindert oder zumindest stark begrenzt wird.

Diese Leitgedanken gelten gleichermaßen für alle Endlagersysteme im Wirtsgestein Salz. Sie sind daher identisch mit den für ein Sicherheitskonzept bei Endlagern in Salzstöcken formulierten Leitgedanken in /MÖN 12/.

Die geologische Barriere soll den Einschluss der radioaktiven Abfälle nachsorgefrei und dauerhaft sicherstellen. Wesentlich für die dauerhafte Einschlusswirkung eines Endlagers im Salzgestein ist die geologische Barriere im ewG mit ihrer praktischen Dichtheit gegenüber Fluiden. Dazu muss die Integrität der geologischen Barriere sichergestellt sein, was durch die Eigenschaften des Salzgesteins im ewG gewährleistet werden muss.

Steinsalz und bestimmte Kalisalze besitzen die Fähigkeit zur bruchlosen duktilen Deformation mit gleichzeitigem Abbau lokaler Spannungen. Unter andauernd kompressiver Belastung verheilen Klüfte und Risse im Steinsalz aufgrund seines hohen Kriechvermögens relativ schnell, insbesondere bei Anwesenheit von Feuchtigkeit. Verheilung bedeutet, dass sich zwischen benachbarten Rissflächen wieder Kohäsion aufbaut oder aber, dass ein Riss durch Sekundärmineralisation wieder verschlossen wird. Die Permeabilitäten des vormals geklüfteten Gesteins erreichen im Ergebnis der Rissschließungs- und Verheilungsprozesse wieder die Werte des ungeklüfteten Gesteins; wie durch In-situ-Messungen nachgewiesen worden ist /WIE 04/.

Bei der Bergwerksauffahrung ist die Durchfahrung der geologischen Barriere unvermeidbar. Dadurch werden direkte Wegsamkeiten zu den einzulagernden Abfällen geschaffen. Außerdem wird die geologische Barriere in konturnahen Bereichen aufgelockert und damit in ihrer Wirkung lokal geschwächt. Das visko-elastische bzw. visko-plastische Verhalten der Salinargesteine führt, allerdings erst mit der Zeit, zum Verschluss bergbaulicher Auffahrungen wie Schächte und Strecken, wobei das Salzgestein in konturnahen Bereichen seine ursprünglichen barrierewirksamen Eigenschaften zurückgewinnt. Durch Einbringung von Versatz kann dieser Prozess unterstützt werden, wobei das Versatzmaterial langfristig und dauerhaft möglichst ähnliche hydraulische sowie thermo- und geomechanische Eigenschaften wie das unverritzte Steinsalz aufweisen sollte.

Eine Verfüllung der bergbaulich geschaffenen Hohlräume mit Versatzstoffen, die sofort nach Verschluss des Endlagers zu einer wirksamen Abdichtung führen, ist prinzipiell möglich /MIN 15/. Nach dem Stand der Technik müssten dazu aber Versatzstoffe (Salzschmelzen u. a.) verwendet werden, die sich in ihrer Zusammensetzung deutlich vom Salzgestein der geologischen Barriere unterscheiden, was möglicherweise zu Wechselwirkungen führt, die langfristig die Wirksamkeit der Versatzstoffe in Frage stellen können.

Um eine dauerhafte und langzeitstabile Hohlraumverfüllung mit arteigenen Stoffen sicherzustellen, soll als Versatzstoff der bei der Auffahrung anfallende Salzgrus, und damit das Salzgestein der umgebenden geologischen Barriere, verwendet werden. Durch die Kompaktion des Salzgrusversatzes entfaltet der Versatz mit der Zeit eine Dichtwirkung, die vergleichbar mit derjenigen der anstehenden, ungestörten geologischen Barriere ist. Die bis zum Erreichen der notwendigen Kompaktion erforderlichen Zeiträume liegen je nach Konvergenzrate, Feuchtegehalt und Umgebungstemperatur zwischen einigen zehn bis einigen tausend Jahren. Deshalb sind zusätzlich geotechnische Verschlussbauwerke wie Schacht- und Streckenverschlüsse vorzusehen, die sofort nach Verschluss des Endlagers eine spezifizierte Dichtwirkung aufweisen. Dabei muss insbesondere der Zutritt von Tages-, Deckgebirgs- und Formationswässern zu den Einlagerungsbereichen bereits zum Zeitpunkt des Verschlusses des Endlagers verhindert werden oder hinreichend klein sein.

Die Verschlussbauwerke sind in der Nachverschlussphase Einwirkungen und Alterationsprozessen ausgesetzt, so dass möglicherweise die Wirksamkeit dieser Verschlussbauwerke nicht über den gesamten Nachweiszeitraum gegeben ist bzw. nicht zweifelsfrei nachgewiesen werden kann. So müssen die Schachtverschlüsse und die Streckenverschlüsse mindestens solange hinreichend dicht sein, bis der hydraulische Widerstand des Versatzstoffes groß genug ist, um ein Vordringen von Lösungen zu den Abfällen zu verhindern bzw. soweit zu begrenzen, dass das Schutzniveau gemäß Abschnitt 6 der Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ erreicht wird.

Neben der Verhinderung oder Begrenzung eines Lösungszutritts zu den Abfällen tragen diese und weitere Barrieren zum dauerhaften Einschluss bei, indem sie die Freisetzung von Radionukliden aus dem ewG verhindern bzw. behindern. So verzögert die Abfallmatrix die Freisetzung von Radionukliden aus den Abfällen.

In Abbildung 3.1 ist schematisch dargestellt, wie die einzelnen Barrieren in der Nachverschlussphase zeitlich wirken und sich in ihrer Wirkung ergänzen. Der Zeitpunkt $t = 0$ entspricht dem Zeitpunkt, zu dem das Endlagerbergwerk verschlossen wird. Die Farbintensität spiegelt für die einzelnen Barrieren jeweils die Zu- bzw. Abnahme ihrer Barrierenwirkung wider, die für die geologische Barriere, die Schacht- und Streckenverschlüsse sowie die Brennelement-Behälter nachzuweisen ist. Die auf der logarithmischen Zeitskala dargestellten Zeitmarken dienen dabei nur einer groben Orientierung und stellen keine Anforderungen oder Vorgaben dar. Allerdings ergeben sich für die Brennelement-Behälter quantitative Anforderungen aus Abschnitt 8.6 der Sicherheitsanforderungen (siehe Kapitel 3.1).

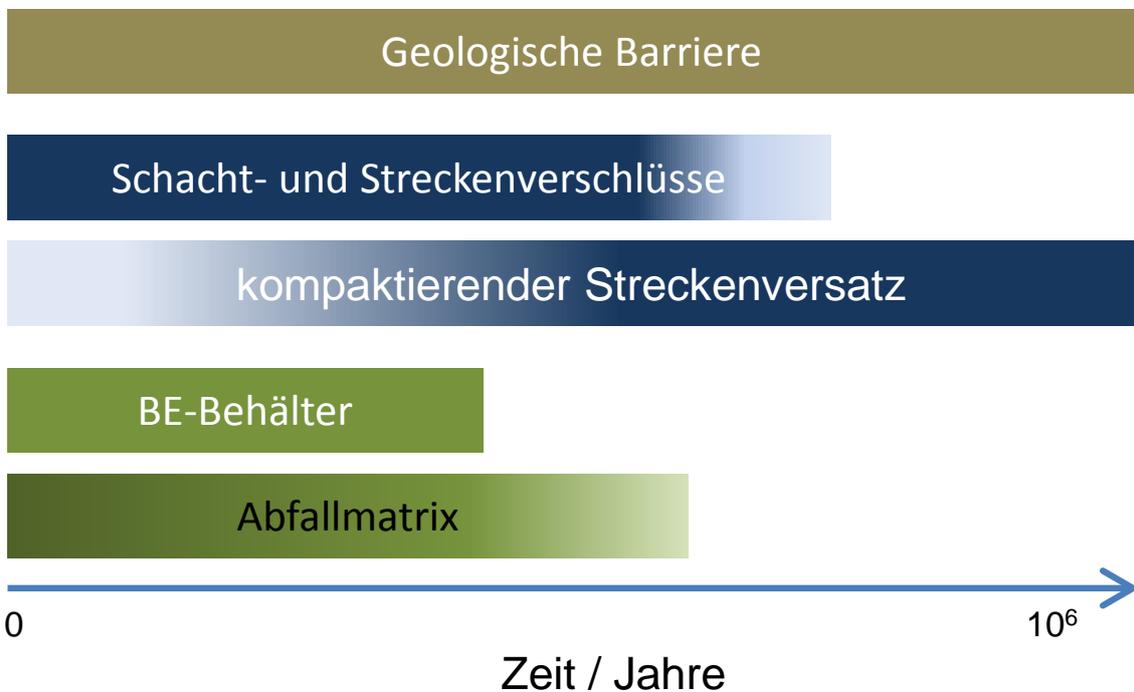


Abb. 3.1 Zeitliche Wirkung der verschiedenen Barrieren im Endlagersystem in der Nachverschlussphase /MÖN 12/

3.3 Zielsetzungen und Maßnahmen für die Nachverschlussphase

Für die Konkretisierung des Sicherheitskonzeptes lassen sich, ausgehend von den Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ und den in Kapitel 3.2 genannten Leitgedanken, drei Grundanforderungen definieren, aus denen sich die konkreten Zielsetzungen ableiten und strategische, planerische Maßnahmen festlegen lassen:

- Grundanforderung A: Die eingelagerten Abfallgebinde sollen schnell und möglichst dicht vom Salzgestein im Verbund mit den geotechnischen Barrieren eingeschlossen werden (Einschlussgedanke).
- Grundanforderung B: Der ausgewiesene einschlusswirksame Gebirgsbereich bleibt im Nachweiszeitraum erhalten und seine Barrierefunktion (geologische Barriere und geotechnische Barrieren) wird weder durch interne noch durch externe Vorgänge und Prozesse beeinträchtigt (Integritätsgedanke / Wartungsfreiheit).
- Grundanforderung C: Eine Kritikalität muss in jeder Phase der Endlagerentwicklung ausgeschlossen werden (Kritikalitätsausschluss).

Aus den Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ ergibt sich außerdem die Grundanforderung, dass die Abfallbehälter für alle wahrscheinlichen Entwicklungen über einen Zeitraum von 500 Jahren nach Verschluss des Endlagerbergwerks bei einer eventuellen Bergung handhabbar sein müssen, wobei es zu keiner Freisetzung von Aerosolen aus dem Behälterinneren kommen darf. Abfallbehälter, für die derartige Nachweise bereits geführt worden sind, gibt es aber zurzeit nicht. Es wird für das Vorhaben KOSINA davon ausgegangen, dass in der Zukunft die Abfallbehälter entsprechend ausgelegt werden können und ihre Handhabbarkeit für eine eventuelle Bergung nachgewiesen werden kann.

In den folgenden Unterkapiteln werden für die drei oben genannten Grundanforderungen die sich daraus ableitenden Zielsetzungen (Z) und strategischen Maßnahmen (M) aufgeführt und der jeweilige Bezug zu den entsprechenden Sicherheitsanforderungen genannt. Die Maßnahmen umfassen planerische Festlegungen in Bezug auf die Positionierung und Auslegung der Grubenbaue des Endlagerbergwerks im Einlagerungshorizont der flach lagernden Salzsichten als auch technische Vorkehrungen. Dabei ist zu beachten, dass die Maßnahmen in ihrer Gesamtheit dazu beitragen, die Zielsetzungen des Sicherheitskonzeptes zu erreichen. Zur besseren Unterscheidung und Bezugnahme werden den einzelnen Zielsetzungen und Maßnahmen jeweils eindeutige Kennungen zugeordnet.

3.3.1 Zielsetzungen

Aus der Grundanforderung A, dass die eingelagerten Abfallgebinde schnell und möglichst dicht vom Salzgestein eingeschlossen werden sollen, lassen sich folgende Zielsetzungen ableiten:

- Z1: Bei den als wahrscheinlich eingestuften möglichen zukünftigen Entwicklungen des Endlagersystems wird angestrebt, dass keine Lösungen zu den Abfällen zutreten oder allenfalls ein Zutritt von sehr geringen Lösungsmengen zu den Abfällen erfolgt (vgl. Abschnitte 4.1, 4.2, 6.1 und 8.2 der Sicherheitsanforderungen /BMU 10/).
- Z2: Bei den als weniger wahrscheinlich eingestuften möglichen Entwicklungen des Endlagersystems soll es allenfalls zu einem Zutritt von geringen Lösungsmengen zu den Abfällen kommen (vgl. Abschnitte 4.1, 4.2, 6.1 und 8.2 der Sicherheitsanforderungen /BMU 10/).
- Z3: Für den Fall, dass es zu einer Mobilisierung von Schadstoffen aus den Abfällen kommt, soll der Transport dieser Schadstoffe aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich durch chemische und physikalische Prozesse behindert bzw. verzögert werden. Dies gilt sowohl für den Schadstofftransport in der Gasphase (Gaspfad) als auch in der flüssigen Phase (Lösungspfad) (vgl. Abschnitte 4.1, 4.2, 6.1 und 8.7 der Sicherheitsanforderungen /BMU 10/).
- Z4: Die Eigenschaften des Salzgesteins und der technischen Komponenten, die den Einschluss der Radionuklide gewährleisten sollen, sollen gut charakterisierbar sein (vgl. Abschnitte 5.1 und 8.7 der Sicherheitsanforderungen /BMU 10/).
- Z5: Das Endlager soll so ausgelegt werden, dass in der Nachverschlussphase keine korrigierenden Eingriffe notwendig sind (vgl. Abschnitte 4.6, 5.2 und 8.7 der Sicherheitsanforderungen /BMU 10/).
- Z6: Die technischen Komponenten sollen robust ausgelegt werden, so dass ihre Sicherheitsfunktionen unter Berücksichtigung unterschiedlicher Beanspruchungszustände sowie Korrosions- bzw. Degradationsprozesse und möglicher Alterungsprozesse gewährleistet sind (vgl. Abschnitte 5.1 und 5.2 der Sicherheitsanforderungen /BMU 10/).
- Z7: Der sofortige und dauerhafte Einschluss der radioaktiven Abfälle im einschlusswirksamen Gebirgsbereich soll durch ein gestaffeltes Barrierensystem, dessen einzelne Elemente zum Teil diversitär und redundant wirken und sich in ihrer

zeitlichen Wirksamkeit ergänzen, gewährleistet werden (vgl. Abschnitte 5.2, 7.2.3 und 8.7 der Sicherheitsanforderungen /BMU 10/).

Z8: Im Sinne einer auch im Hinblick auf die Nachweisführung robusten Endlagerplanung, durch welche sichergestellt ist, dass die Anzahl gleichzeitig offener Einlagerungsbereiche minimiert wird, sollen die Einlagerungsbereiche in einzelne Sektionen unterteilt werden, die möglichst schnell sequentiell beladen, verfüllt und gegen das Grubengebäude abgedichtet werden können. Die Separierung und Beladung der Einlagerungsfelder soll so erfolgen, dass Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Abfallarten durch physikalische und/oder chemische Prozesse, die das Einschlussvermögen des ewG negativ beeinflussen können, weitestgehend minimiert werden. (vgl. Abschnitte 5.1 und 8.5 der Sicherheitsanforderungen /BMU 10/)

Aus der Grundanforderung B, dass der ausgewiesene einschlusswirksame Gebirgsbereich im Nachweiszeitraum erhalten bleibt und seine Barrierefunktion weder durch interne noch durch externe Vorgänge und Prozesse beeinträchtigt wird, lassen sich folgende Zielsetzungen ableiten:

Z9: Die Qualität des Einschlusses der radioaktiven Abfälle im einschlusswirksamen Gebirgsbereich soll im Nachweiszeitraum nicht durch oberflächennah ablaufende Prozesse beeinträchtigt werden. (vgl. Abschnitte 5.1 und 8.3 der Sicherheitsanforderungen /BMU 10/)

Z10: Die Qualität des Einschlusses der radioaktiven Abfälle im einschlusswirksamen Gebirgsbereich soll im Nachweiszeitraum nicht durch thermisch induzierte Prozesse beeinträchtigt werden. (vgl. Abschnitt 5.1 der Sicherheitsanforderungen /BMU 10/)

Z11: Kristallwasserhaltige Salzminerale, wie z. B. Carnallit, sollen durch die Temperaturerhöhung im Salzgestein infolge der Einlagerung wärmeentwickelnder Abfälle nicht zersetzt werden. (vgl. Abschnitte 5.1 und 6.1 der Sicherheitsanforderungen /BMU 10/)

Z12: Gasentwicklung und Gasdruckaufbaurrate in den Grubenbauen des Endlagerbergwerks sollen so gering sein, dass im einschlusswirksamen Gebirgsbereich kein Frac entsteht, der die Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs

ches verletzt. (vgl. Abschnitte 5.1 und 6.1 der Sicherheitsanforderungen /BMU 10/)

Z13: Auswirkungen eines unbeabsichtigten menschlichen Eindringens in den einschlusswirksamen Gebirgsbereich sowie seine Eintrittswahrscheinlichkeit sollen durch entsprechende Auslegung des Endlagers sowie administrative Maßnahmen nach Möglichkeit reduziert werden, wenn die dafür zu treffenden Maßnahmen keine negativen Auswirkungen auf die Langzeitsicherheit haben. (vgl. Abschnitte 5.2 und 9.7 der Sicherheitsanforderungen /BMU 10/)

Aus der Grundanforderung C, dass eine Kritikalität in jeder Phase der Endlagerentwicklung ausgeschlossen sein muss, lässt sich folgende Zielsetzung ableiten:

Z14: Eine Kritikalität muss durch entsprechende Beladung und Auslegung der Einlagerungsbehälter und durch die Einlagerungsplanung in jeder Phase der Endlagerentwicklung ausgeschlossen werden. (vgl. Abschnitt 7.2.4 der Sicherheitsanforderungen /BMU 10/)

3.3.2 Strategische Maßnahmen

Aus den Zielsetzungen lassen sich nun konkrete strategische bzw. planerische Maßnahmen ableiten. Folgende Maßnahmen dienen dazu, zur Erfüllung der Zielsetzungen Z1 bis Z8 (Einschluss) beizutragen, wobei in der Regel mit einer Maßnahme mehrere Zielsetzungen umgesetzt werden (in der nachfolgenden Auflistung jeweils durch ihre Kennung angegeben).

M1: Das aufzufahrende Hohlraumvolumen des Endlagerbergwerks wird – unter Berücksichtigung der Standortgegebenheiten – so klein wie möglich gehalten. Die Auffahrung erfolgt unter Einsatz gebirgsschonender Verfahren. Im Hinblick auf die besonderen Gegebenheiten bei der flachen Lagerung ist hierbei insbesondere die seigere Ausdehnung der Einlagerungsgrubenbaue so klein wie möglich zu halten. Auf diese Weise werden die Auswirkungen auf das gering mächtig anstehende Salzgestein und damit auf die geologische Barriere insgesamt minimiert. (→ Z1, Z2, Z3; entspricht auch der Sicherheitsanforderung 8.2 /BMU 10/)

M2: Die Grubenbaue der Einlagerungsbereiche werden in einem gut charakterisierbaren Salzbereich mit möglichst homogenem Aufbau und homogenen Eigenschaften, insbesondere im Hinblick auf ihre Einschlusseigenschaften, aufgeföhren. Die Einlagerungsbereiche werden deshalb im Steinsalzhorizont der Staßfurt-Folge (z2NA) angelegt. Dieses zeichnet sich durch vergleichsweise große Mächtigkeiten und die Abwesenheit von Störungen, makroskopischen Lösungsvorkommen oder anderen Inhomogenitäten aus. (→ Z4)

M3: Die Grubenbaue der Einlagerungsbereiche werden in Salzgesteinsbereichen angelegt, die frei von Lösungseinschlüssen mit sicherheitsrelevantem Volumen sind und günstige Kriecheigenschaften aufweisen, um eine schnelle Umschließung der Abfälle zu erreichen. Die Einlagerungsbereiche werden deshalb im Steinsalzhorizont der Staßfurt-Folge (z2NA) angelegt. (→ Z1, Z2)

M4: Die Grubenbaue der Einlagerungsbereiche werden mit ausreichenden Sicherheitsabständen

1. zu den Tagesschächten,
2. zu den liegend an das Steinsalz der Staßfurt-Folge z2NA angrenzenden Gesteinsschichten und damit zu Gesteinsschichten mit möglichen größeren Lösungs- oder Gasvorkommen sowie
3. zu hangend angrenzenden potentiellen Fließwegen für Lösungen z. B. im Hauptanhydrit z3HA

errichtet.

Auf Basis der umfangreichen Erfahrungen im Salzbergbau kann abgeleitet werden, dass ein Sicherheitsabstand in der Größenordnung von einigen Zehner Metern ausreicht, um die Integrität des Gebirgsbereichs im Einlagerungshorizont zu bewahren. Für die Arbeiten im Vorhaben KOSINA wurde als Planungsgrundlage für die Entwicklung der verschiedenen Endlagerkonzepte festgelegt, für die Auslegung der Grubenbaue einen Mindestabstand von 50 m anzusetzen, der an jeder Stelle des jeweils konzipierten Endlagerbergwerks zwischen

Einlagerungsbereichen und o. g. Gesteinsschichten einzuhalten ist¹. Es ist für diesen Sicherheitsabstand unter Berücksichtigung von Ungewissheiten bei der Detektion von geologischen Schichtgrenzen, der möglichen Existenz von Klüften begrenzter Reichweite sowie der Ausdehnung der Auflockerungszone um die Grubenbaue zu zeigen, dass die Integrität der geologischen Barriere im einschlusswirksamen Gebirgsbereich gewährleistet ist. Zusätzlich wird ausgehend von Empfehlungen in /MIN 10/ um das Endlagerbergwerk ein lateraler Sicherheitspfeiler von 500 m festgelegt. Für den Sicherheitsabstand der Einlagerungsgrubenbaue zu den Tagesschächten werden nach /SAM 89/ bis zum Vorliegen standortspezifischer Auslegungsrechnungen zunächst 300 m festgelegt. (→ Z1, Z2)

M5: In den Tagesschächten und in den Zugangsstrecken zwischen dem Infrastrukturbereich und den Einlagerungsbereichen werden Verschlussbauwerke mit einem spezifizierten hydraulischen Widerstand qualitätsgesichert errichtet. Die Verschlussbauwerke müssen solange hinreichend dicht sein, bis der hydraulische Widerstand des kompaktierenden Salzgrusversatzes groß genug ist, um ein Vordringen von Lösungen zu den Abfällen zu verhindern bzw. soweit zu begrenzen, dass die Sicherheitsanforderungen (insbesondere die Abschnitte 4 und 8, siehe Kapitel 3.1) erfüllt sind. Aus diesem Grund muss ihre Wirksamkeit mindestens für den Zeitraum, der für eine hinreichende Versatzkompaktion benötigt wird, sichergestellt sein. Bei der Auslegung der Verschlussbauwerke werden Lastfälle, die die Bandbreite der möglichen zukünftigen Entwicklungen während ihrer geforderten Funktionsdauer nach Möglichkeit abdecken sollen, zu Grunde gelegt. (→ Z1, Z2, Z3, Z5, Z6, Z7)

M6: Die offenen Hohlräume in den Grubenbauen der Einlagerungsbereiche werden mit Salzgrus verfüllt. Die Hohlraumkonvergenz durch das Salzkriechen führt zu einer Kompaktion des Salzgruses und damit zu einer Verringerung seiner Porosität und Permeabilität. In der Nähe der wärmeentwickelnden Abfälle wird die Salzgruskompaktion durch die lokal erhöhten Temperaturen beschleunigt. Die Hohlraumkonvergenz wird durch das Salzgrusvolumen in ihrem Gesamtaus-

¹ In /MIN 10/ wird für Endlagerbergwerke in flacher Lagerung ein Sicherheitsabstand zum Top des Zechsteins und zur Zechsteinbasis von ≥ 150 m, zu den Kaliflözen von ≥ 50 m empfohlen; in der VSG wurde hingegen allseitig ein Wert von 50 m angesetzt und anhand von Modellrechnungen gezeigt, dass dieser Abstand für die betrachteten geologischen Standortgegebenheiten hinreichend ist /BOL 12, KOC 12/.

maß begrenzt. Der im Vergleich mit unverfüllten Grubenbauen früher einsetzende Stützdruck sowie der insgesamt geringere Umfang des Salzkriechens führen zu einer beschleunigten Verheilung des Steinsalzes im Bereich der Auflockerungszone sowie zu einer Reduzierung der im Gebirge herrschenden Differenzspannungen. Außerdem wird durch die Einbringung von Versatz der initiale Hohlraum, der maximal mit Lösung erfüllt werden kann, erheblich reduziert. (→ Z1, Z2, Z5, Z6, Z7)

M7: In den Richtstrecken soll eine hinreichende Dichtwirkung des Versatzes in einem möglichst kurzen Zeitraum erreicht werden. Daher wird der Salzgrus in den Zugangsstrecken, die zu den Einlagerungsbereichen führen, geringfügig angefeuchtet, um dessen Widerstand gegen die Kompaktion herabzusetzen und somit eine schnellere Kompaktion zu erreichen. (→ Z1, Z2, Z5, Z6, Z7)

M8: Die in das Endlager abfallnah eingebrachte Feuchtigkeit wird minimiert. Ziel dieser Maßnahme ist es, die Korrosion der Abfallbehälter und damit die Gasbildung und den Gasdruckaufbau im Endlager zu begrenzen. Bei den wärmeentwickelnden Abfällen, bei denen allenfalls geringe Mengen Restfeuchte vorhanden sein können, wird in die Grubenbaue der Einlagerungsfelder Salzgrusversatz eingebracht, der den natürlichen, geringen Feuchtigkeitsgehalt des Staßfurt-Steinsalzes z2NA besitzt. Dazu werden bei Bedarf betriebliche Vorkehrungen, insbesondere zur Handhabung des bei der Auffahrung gewonnenen Salzgruses getroffen. (→ Z1, Z2, Z5, Z6, Z7)

M9: Die Schachtverschlussbauwerke werden so ausgelegt, dass ihre Dichtwirkung auf mehreren Dichtelementen aus unterschiedlichen Materialien beruht, die aufgrund ihres jeweiligen Aufbaus teilweise diversitäre Funktionsweisen besitzen. (→ Z6, Z7)

M10: Im Rahmen der Entwicklung und Auslegung der verschiedenen, betrachteten Endlagerkonzepte werden Einlagerungsstrategien entwickelt, die sicherstellen, dass maximal nur das aus betrieblicher Sicht zur Abfalleinlagerung gleichzeitig erforderliche Hohlraumvolumen aufgefahren wird. Dazu werden die einzelnen Einlagerungsbereiche in Sektionen mit möglichst geringen Einzelvolumina (z. B. Einzelbohrloch, Einzelstrecke) untergliedert, die sequentiell mit Abfallgebinden beladen werden. Nach vollständiger Beladung wird die Einlagerungssektion umgehend verfüllt und mit geeigneten geotechnischen Maßnahmen gegen den

restlichen Grubenraum verschlossen. Der Einlagerungsvorgang erfolgt, soweit aus betrieblicher Sicht möglich, im Rückbauverfahren, wobei schachtferne Einlagerungsfelder zuerst beladen, verfüllt und verschlossen werden. Hierdurch wird erreicht, dass die Kompaktion des Salzgrusversatzes bereits zu einem frühen Stadium, während der Betriebsphase, beginnen kann. (→ Sicherheitsanforderung 8.5 /BMU 10/)

M11: Das Einlagerungsregime wird so angelegt, dass Abfälle mit unterschiedlichen Eigenschaften voneinander getrennt werden. Dies betrifft insbesondere Abfälle mit unterschiedlichen Gasbildungseigenschaften oder chemischen Eigenschaften, die sich auf das geochemische Milieu in Abfallnähe und damit auf die Radionuklidlöslichkeit auswirken können. Hierdurch wird erreicht, dass sicherheitsrelevante chemische oder physikalische Wechselwirkungen zwischen Abfällen verschiedener Eigenschaften weitestgehend vermieden werden und die Prognose des Freisetzungsverhaltens (Quellterm) erleichtert wird. Aus sicherheitstechnischen und methodischen Gründen erfolgt die Einlagerung von wärmeentwickelnden Abfällen (einschließlich der Brennelementstrukturteile) und ggf. der im Vorhaben KOSINA nicht weiter zu betrachtenden vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfällen in separaten Einlagerungsbereichen, die durch geotechnische Bauwerke jeweils voneinander als auch vom Infrastrukturbereich mit den Tagesschächten getrennt werden. Hierdurch wird eine hinsichtlich des sicheren Einschusses nachteilige Beeinflussung der wärmeentwickelnden Abfälle durch vernachlässigbar wärmeentwickelnde Abfälle (z. B. infolge signifikanter Gasentwicklung) unterbunden. (→ Z8)

Folgende Maßnahmen dienen dazu, zur Erfüllung der Zielsetzungen Z9 bis Z13 (Integritätserhalt) beizutragen, wobei in der Regel mit einer Maßnahme mehrere Zielsetzungen verfolgt werden (in der nachfolgenden Auflistung jeweils durch ihre Kennung angegeben).

M12: Die Grubenbaue der Einlagerungsbereiche werden mit ausreichenden Sicherheitsabständen zu den Salzbereichen errichtet, die einen nennenswerten Anteil kristallwasserhaltiger Salzminerale enthalten (wie z. B. Carnallit), um eine thermische Zersetzung dieser Salzminerale unter den gegebenen Gebirgsbedingungen (Einspanndruck und lokale Temperatur) auszuschließen. Dadurch wird in Verbindung mit der Maßnahme M14 sichergestellt, dass derartige Salzbereiche stabile und gut prognostizierbare Eigenschaften behalten und die an

den einschlusswirksamen Gebirgsbereich angrenzenden Salzbereiche keine Eigenschaften annehmen, die zur Beeinträchtigung der Barriereigenschaften des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs führen können. Bis zum Vorliegen standortspezifischer Temperatursausbreitungsrechnungen wird basierend auf bisherigen Erfahrungen für die weiteren Arbeiten in KOSINA vorläufig ein Sicherheitsabstand der Einlagerungsbereiche zum Staßfurt-Carnallit (z2SF) von mindestens 50 m festgelegt. (→ Z11)

M13: Die Grubenbaue des Infrastrukturbereichs und der Einlagerungsbereiche werden in einer Teufenlage errichtet, die eine dauerhafte Einbettung des Endlagerbergwerks im salinaren Wirtsgestein gewährleistet und eine ausreichend große Mächtigkeit der hangenden Salzschieben sowie eine ausreichende Deckgebirgsüberdeckung ermöglicht. In Anlehnung an /MIN 10/ wird die Mindestmächtigkeit des Zechstein-Salinars im Hangenden vorläufig auf 150 m festgelegt. Insbesondere durch die Teufenlage von 500 bis 1.000 m u. GOK gemäß /AKE 02/ und /VÖL 17/ soll ausgeschlossen werden, dass eine negative Beeinflussung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs durch Prozesse, die an oder nahe der Erdoberfläche ablaufen, stattfinden kann. Gleichzeitig dient die Maßnahme dazu, ein unbeabsichtigtes menschliches Eindringen in den einschlusswirksamen Gebirgsbereich zu erschweren. (→ Z9, Z13)

M14: Das Endlagerbergwerk wird in einem tektonisch ruhigen Gebiet errichtet, bei dem Salzabwanderung praktisch ausgeschlossen ist. Im Nachweiszeitraum kann daher keine relevante Ausdünnung der barrierewirksamen Salzschieben (z2NA) erfolgen, die in Verbindung mit Subrosionsvorgängen oder einer glazial verstärkten Erosion zu einer relevanten Verringerung der Barrierenmächtigkeit und möglicherweise in Folge zur Beeinträchtigung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs von außen führen könnte. (→ Z9)

M15: Die Temperaturen im Einlagerungshorizont z2NA, in dem die wärmeentwickelnden hochradioaktiven Abfälle eingelagert werden, werden durch entsprechende Beladung der Abfallbehälter und angepasste Einlagerungsgeometrien auf 200 °C begrenzt. Die Festlegung dieser Temperaturgrenze dient allein der Auslegung des Endlagers. Sie soll zum einen sicherstellen, dass die maximal auftretenden Temperaturen innerhalb der Abfallbehälter niedrig genug liegen, um negative Veränderungen der Abfälle (verringerte Stabilität der Brennstäbe bzw. Umwandlung des Glaskörpers bei den CSD-V) zu vermeiden. Zum ande-

ren ist bei den vorgesehenen Sicherheitsabständen der Einlagerungsfelder von mindestens 50 m zu den das Staßfurt-Steinsalz z2NA begrenzenden Salzschichten, zu denen auch Carnallit gehört, aufgrund der Begrenzung der Temperaturentwicklung in den Einlagerungsfeldern davon auszugehen, dass Carnallit thermisch nicht zersetzt² und kein Kristallwasser freigesetzt werden kann. Weiterhin ist mit der Begrenzung der Maximaltemperatur im Steinsalz auf 200 °C die thermische Stabilität des Polyhalits sicher gewährleistet. (→ Z10, Z11)

M16: Durch entsprechende Auslegung des Nahbereiches der eingelagerten Abfälle, z. B. durch die Begrenzung der Restfeuchte des Versatzes und ggf. durch die Verwendung entsprechender Behältermaterialien, werden die Gasentwicklung und die Gasdruckaufbaurrate in den Grubenbauen des Endlagerbergwerks soweit reduziert, dass im einschlusswirksamen Gebirgsbereich kein Frac bis zu dessen Außenrand entsteht und somit zu einem Integritätsverlust der geologischen Barriere führt. (→ Z12)

Zur Erreichung der Zielsetzung Z13 (unbeabsichtigtes menschliches Eindringen) sind weltweit bisher nur vereinzelte Untersuchungen durchgeführt worden. Dies betrifft sowohl die Möglichkeiten, die Wahrscheinlichkeit eines menschlichen Eindringens in den ewG zu reduzieren oder Auswirkungen eines solchen Eindringens zu minimieren, als auch denkbare administrative Vorkehrungen, die wie der in /BMU 10/ geforderte Wissenserhalt bewirken können, dass zumindest für eine gewisse Zeit keine den dauerhaften Einschluss der Abfälle gefährdenden menschlichen Aktivitäten im Bereich des Endlagers durchgeführt werden. Daher werden für das Sicherheitskonzept in KOSINA keine konkreten Maßnahmen zur Erreichung der Zielsetzung Z13 beschrieben.

In Deutschland wurden erstmalig im Rahmen der vorläufigen Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben Fragestellungen im Zusammenhang mit dem menschlichen Eindringen in den ewG systematisch untersucht und bewertet /BEU 12b/. Hierbei wurde berücksichtigt, dass die vorrangigen Optimierungsziele Strahlenschutz in der Betriebsphase, Langzeitsicherheit, Betriebssicherheit des Endlagers, Zuverlässigkeit und Qualität des langfristigen Einschlusses der Abfälle, Sicherheitsmanagement sowie

² Bei unter Gebirgsdruck in einer Tiefe von 870 m eingespannten Carnallit-Vorkommen liegt der Schmelzpunkt von Carnallit bei 167,5 °C /POP 93/.

technische und finanzielle Realisierbarkeit durch Maßnahmen zur Verhinderung eines menschlichen Eindringens nicht konterkariert werden dürfen.

Folgende Maßnahmen dienen dazu, zur Erfüllung der Zielsetzung Z14 (Kritikalitätsausschluss) beizutragen.

M17: Durch eine geeignete Beladung und Auslegung der Einlagerungsbehälter, andere technische Maßnahmen, wie die Beigabe von Neutronenfängern, sowie die Einlagerungsplanung wird ausgeschlossen, dass sich spaltbares Material im Endlager in einer kritischen Anordnung ansammelt. Dazu sind entsprechende Analysen auf der Basis von plausiblen möglichen Entwicklungen des Endlagersystems mit realistischen Werten für die einzulagernden Nuklidinventare unter Berücksichtigung ihrer Ungewissheiten durchzuführen.

Zur Erreichung der Zielsetzung Z14 tragen indirekt auch die Maßnahmen M3 (Einlagerung in Salzbereichen, die frei von Lösungseinschlüssen mit nennenswertem Volumen sind), M4 (Ausreichende Sicherheitsabstände zu den Tagesschächten, zu Gesteinsschichten mit möglichen größeren Lösungsvorkommen sowie zu potentiellen Fließwegen für Lösungen) und M16 (Begrenzung der Restfeuchte des Versatzes) bei. Die unter M17 genannten Analysen sind in der Vergangenheit für verschiedene Endlagerbehälter bereits durchgeführt worden /KIL 12/, so dass im Rahmen des Vorhabens KOSINA keine gesonderten Nachweise für den Kritikalitätsausschluss geführt werden sollen.

4 Nachweiskonzept

Im Nachweiskonzept werden auf Basis des Sicherheitskonzeptes für das betrachtete Endlagersystem die für eine Sicherheitsaussage erforderlichen Nachweise formuliert, so dass die Anforderungen gemäß /BMU 10/ erfüllt werden. Dabei ist es für das Vorhaben KOSINA nicht das Ziel, alle in /BMU 10/ geforderten Sicherheitsnachweise zu erbringen, sondern ggf. zu überprüfen, inwieweit sie im Rahmen des vorliegenden Kenntnisstandes erbracht werden können.

Im Vorhaben VSG wurde bereits ein Nachweiskonzept für ein Endlager im Wirtsgestein Salz in steiler Lagerung entwickelt /MÖN 12/ und angewendet /FIS 13/. Da sich Nachweiskonzepte für Endlagersysteme zwar für verschiedene Wirtsgesteine unterscheiden, nicht jedoch für die jeweilige geologische Wirtsgesteinsformation, wird das in /MÖN 12/ beschriebene Konzept der VSG für das Projekt KOSINA weitgehend übernommen. Das nachfolgend dargelegte Nachweiskonzept bildet somit aufbauend auf dem formulierten Sicherheitskonzept sowie einem anerkannten Nachweiskonzept für das Wirtsgestein Salz die Grundlage für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagersystemen auch in flach lagernden Salzformationen.

4.1 Relevante Vorgaben der Sicherheitsanforderungen des BMU

Im Nachweiskonzept müssen für die zur Durchführung des Vorhabens KOSINA relevanten Aspekte der Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 10/ Konkretisierungen vorgenommen werden. Für KOSINA sind vor allem bestimmte Aspekte in den Abschnitten 5 (Optimierung), 6 (Schutz vor Schäden durch ionisierende Strahlen) und 7 (Sicherheitsnachweise) relevant. Nachfolgend sind, soweit nicht bereits wie z. B. die Abschnitte 6.1 und 7.2.4 im Kapitel 3.1 aufgeführt, diese Bestimmungen auszugsweise zitiert (in Kursivschrift) und die entsprechenden Abschnitte angegeben, um später deren einfachere Zuordnung zum Nachweiskonzept zu ermöglichen:

5.2 *[...] Da zukünftige menschliche Aktivitäten nicht prognostiziert werden können, sind Referenzszenarien für ein unbeabsichtigtes menschliches Eindringen in das Endlager, denen derzeit übliche menschliche Aktivitäten zugrunde liegen, zu analysieren. Im Rahmen dieser Optimierung ist auf eine Reduzierung der Wahrscheinlichkeit ihres Eintretens und ihrer radiologischen Auswirkungen auf die allgemeine Bevölkerung hinzuwirken.*

- 6 Die Strahlenschutzverordnung enthält keine Kriterien, mit denen der Schutz zukünftiger Generationen und der Umwelt vor ionisierender Strahlung zu bewerten ist. [...] International besteht Einvernehmen, dass berechnete oder abgeschätzte Risiken oder Dosen in dieser Phase nur als Indikatoren für das mit der Endlagerung zu erzielende Schutzniveau interpretiert werden dürfen. Für diese Indikatoren gelten folgende Bewertungskriterien.
- 6.2 Für die Nachverschlussphase ist nachzuweisen, dass für wahrscheinliche Entwicklungen durch Freisetzung von Radionukliden, die aus den eingelagerten radioaktiven Abfällen stammen, für Einzelpersonen der Bevölkerung nur eine zusätzliche effektive Dosis im Bereich von 10 Mikrosievert³ im Jahr auftreten kann. Dabei sind Einzelpersonen mit einer heutigen Lebenserwartung, die während der gesamten Lebenszeit exponiert werden, zu betrachten. [...]
- 6.3 Für weniger wahrscheinliche Entwicklungen in der Nachverschlussphase ist nachzuweisen, dass die durch Freisetzung von Radionukliden, die aus den eingelagerten radioaktiven Abfällen stammen, verursachte zusätzliche effektive Dosis für die dadurch betroffenen Menschen 0,1 Millisievert pro Jahr⁴ nicht überschreitet. [...]
- 6.4 Für unwahrscheinliche Entwicklungen wird kein Wert für zumutbare Risiken oder zumutbare Strahlenexpositionen festgelegt. [...] Unwahrscheinliche Entwicklungen sind Entwicklungen, deren Eintreten am Standort selbst unter ungünstigen Annahmen nicht erwartet wird und die bei vergleichbaren Standorten oder vergleichbaren geologischen Situationen nicht beobachtet wurden. Zustände und Entwicklungen für technische Komponenten, die durch zu treffende Maßnahmen praktisch ausgeschlossen werden können sowie das gleichzeitige unabhängige Versagen von mehreren Komponenten werden den unwahrscheinlichen Entwicklungen zugeordnet.
- 6.5 Für Entwicklungen aufgrund eines unbeabsichtigten Eindringens in den einschlusswirksamen Gebirgsbereich wird kein Wert für zumutbare Risiken oder zumutbare Strahlenexpositionen festgelegt.

³ In Anlehnung an ICRP 104 (triviale Dosis)

⁴ In Anlehnung an ICRP 81 (Risiko kleiner $10^{-5}/a$)

7.2 *Zum Nachweis der Langzeitsicherheit ist vor jeder wesentlichen Festlegung gemäß Kapitel 5.1 eine umfassende, standortspezifische Sicherheitsanalyse und Sicherheitsbewertung, die einen Zeitraum von einer Million Jahre umfasst, vorzunehmen. [...] Diese Bewertung und deren Dokumentation müssen insbesondere folgende Punkte umfassen:*

- *Das jeweils zugrunde liegende Endlagerkonzept.*
- *Die qualitätsgesicherte Erhebung von Daten und Informationen aus Standorterkundung, Forschung und Entwicklung.*
- *Die qualitätsgesicherte Umsetzbarkeit der Anforderungen an technische Barrieren.*
- *Die Identifizierung, Charakterisierung und Modellierung sicherheitsrelevanter Prozesse sowie die diesbezügliche Vertrauensbildung und Qualifizierung der Modelle.*
- *Die umfassende Identifizierung und Analyse sicherheitsrelevanter Szenarien und ihre Einordnung in die Wahrscheinlichkeitsklassen gemäß Kapitel 6.*
- *Die Darstellung und Umsetzung einer systematischen Strategie zur Identifizierung, Bewertung und Handhabung von Unsicherheiten.*

Diese Bewertung der Langzeitsicherheit muss sich darüber hinausgehend auf mindestens folgende Erkenntnisse abstützen:

7.2.1 *Langzeitaussage zur Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs: Für die wahrscheinlichen Entwicklungen ist für den einschlusswirksamen Gebirgsbereich auf der Grundlage einer geowissenschaftlichen Langzeitprognose nachzuweisen, dass die Integrität dieses Gebirgsbereichs über den Nachweiszeitraum von einer Million Jahre sichergestellt ist. Hierfür ist vom Antragsteller der einschlusswirksame Gebirgsbereich räumlich und zeitlich eindeutig zu definieren und unter Berücksichtigung der eingelagerten Abfälle und der technischen Barrieren zu zeigen, dass*

- *die Ausbildung von solchen sekundären Wasserwegsamkeiten innerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs ausgeschlossen ist, die zum*

Eindringen oder Austreten ggf. schadstoffbelasteter wässriger Lösungen führen können und dass

- *ggf. im einschlusswirksamen Gebirgsbereich vorhandenes Porenwasser nicht am hydrogeologischen Kreislauf im Sinne des Wasserrechts außerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs teilnimmt. Dies gilt als erfüllt, wenn die Ausbreitung von Schadstoffen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich durch advective Transportprozesse allenfalls vergleichbar zur Ausbreitung durch diffusive Transportprozesse erfolgt.*

Bei Salinar- und Tongesteinen ist die Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs zusätzlich anhand folgender Kriterien zu prüfen:

- *Die zu erwartenden Beanspruchungen dürfen die Dilatanzfestigkeiten der Gesteinsformationen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs außerhalb der Auflockerungszonen nicht überschreiten.*
- *Die zu erwartenden Fluiddrücke dürfen die Fluiddruckbelastbarkeiten der Gesteinsformationen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht in einer Weise überschreiten, die zu einem erhöhten Zutritt von Grundwässern in diesen einschlusswirksamen Gebirgsbereich führt.*
- *Durch die Temperaturentwicklung darf die Barrierewirkung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs nicht unzulässig beeinflusst werden.*

7.2.2 Radiologische Langzeitaussage: Für wahrscheinliche und weniger wahrscheinliche Entwicklungen ist nachzuweisen, dass die in den Kapiteln 6.2 und 6.3 aufgeführten Kriterien eingehalten sind. Soweit hinreichend zuverlässige Aussagen für den Nachweiszeitraum von einer Million Jahre über die Wirksamkeit von Sicherheitsfunktionen des Deck- und Nebengebirges des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs gemacht werden können, kann die radiologische Langzeitaussage diese einbeziehen.

Eine vereinfachte radiologische Langzeitaussage ist zulässig, falls die jährlich aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich freigesetzten radioaktiven Stoffe für die Bevölkerung höchstens zu 0,1 Personen-Millisievert pro Jahr für wahrscheinliche und höchstens zu 1 Personen-Millisievert pro Jahr für weniger wahrscheinliche Entwicklungen führen. Hierdurch wird sichergestellt, dass nur sehr geringe Gesamtmengen an radioaktiven Schadstoffen freigesetzt werden

können. Diese Personen-Millisievert sind anhand eines für Betrachtungen zur Langzeitsicherheit anerkannten generischen Expositionsmodells zu ermitteln, für das anzunehmen ist, dass

- die betrachtete Referenzgruppe 10 Personen umfasst, die während ihrer Lebenszeit den gesamten für die Ernährung (Trinken, Tränken, Beregnen) notwendigen jährlichen Wasserbedarf aus einem Brunnen deckt und
- dieses Brunnenwasser sämtliche aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich in dem jeweiligen Jahr ausgetretenen Radionuklide enthält. Dabei ist die Verdünnung des Brunnenwassers auf einen Mineralgehalt zu berücksichtigen, der die Nutzung des Brunnenwassers als Trinkwasser zuließe.

Da praktisch auszuschließen ist, dass alle freigesetzten Radionuklide in genau einem Brunnen angesammelt werden und keine weiteren Verteilungen oder Rückhaltungen im Deck- oder Nebengebirge stattfinden, stellt dieses Berechnungsmodell sicher, dass die unter 6.1 bis 6.3 genannten Werte eingehalten werden.

7.2.3 *Nachweis der Robustheit technischer Komponenten des Endlagersystems: Die langfristige Robustheit technischer Komponenten des Endlagersystems muss auf der Basis theoretischer Überlegungen prognostiziert und dargelegt werden. [...]*

- *Beim Nachweis der Integrität bzw. des Einschlusses sind die technisch unvermeidbaren Barriereperforationen (z. B. Schächte) und die Verfüllung des Endlagers zu berücksichtigen. Es ist zu zeigen, dass die von der geologischen Barriere geforderte Integrität und der von ihr zu gewährleistende Einschluss auch bei Berücksichtigung der technischen Abdichtungs- und Verschlussbauwerke sowie Verfüllung erhalten bleiben. Zum Nachweis sind unter anderem die für die Funktionstüchtigkeit der technischen Verschlussbauwerke maßgeblichen Beanspruchungszustände und Eigenschaften der Baustoffe zu untersuchen. Die hinreichende Belastbarkeit und Alterungsbeständigkeit dieser Baustoffe ist für den Zeitraum nachzuweisen, für den die Funktionstüchtigkeit der Bauwerke gegeben sein muss. Soweit notwendig müssen sofort wirksame Barrieren*

den Einschluss der Abfälle für den Zeitraum übernehmen, in dem die volle Wirksamkeit der langfristig wirksamen Barrieren noch nicht gegeben ist.

7.3 *Für die numerische Analyse des Langzeitverhaltens des Endlagers im Hinblick auf*

- Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs*
- radiologische Konsequenzen*
- Mobilisierung natürlicher Radionuklide*
- Eigenschaften von Behälter und Versatz*
- Eigenschaften der Verschlussbauwerke*

sind deterministische Rechnungen auf der Basis einer möglichst realitätsnahen Modellierung (z. B. Medianwerte als Eingangsparameter) durchzuführen. Zielsetzungen dieser Rechnungen sind:

- Demonstration des erwarteten Systemverhaltens*
- Ableitung von gegebenenfalls zeitabhängigen Anforderungen an die Komponenten des Endlagersystems*
- Optimierung des Endlagersystems*

Zusätzlich sind Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen durchzuführen, um den möglichen Lösungsraum aufzuzeigen sowie den Einfluss der Unsicherheiten einschätzen zu können. Dabei sind auch Modellunsicherheiten zu berücksichtigen. Die Einhaltung von numerischen Kriterien, die sich aus diesen Sicherheitsanalysen ergeben oder daraus abgeleitet wurden, muss unter Berücksichtigung der Unsicherheiten mit ausreichender Zuverlässigkeit gegeben sein. Bei den Analysen gegebenenfalls resultierende numerische Verletzungen dieser Kriterien sind in ihrer Relevanz zu bewerten.

Weiter sind ggf. Referenzmodelle (z. B. Referenzbiosphäre) für den Zeitraum zu verwenden, für den die Unsicherheit der Eingangsdaten und Rechenmodelle hoch ist. Für diesen Zeitraum sind ergänzend auch qualitative Argumente heranzuziehen.

7.9 *Es ist zu untersuchen, inwieweit natürlich im Endlagersystem vorkommende radioaktive oder sonstige grundwasser- oder bodenrelevante Stoffe mobilisiert werden können und inwieweit Grundwasserströme in sicherheitsrelevantem Umfang verändert werden könnten. Dies könnte zum Beispiel aufgrund der hohen Wärmeleistung der eingelagerten Abfälle oder aufgrund veränderter geochemischer Bedingungen der Fall sein.*

Im Langzeitsicherheitsnachweis sind Freisetzungen von Radionukliden aus natürlich vorkommenden Materialien (Versatz und Gebirge) gesondert von Freisetzungen von Radionukliden aus den endgelagerten Abfällen zu bewerten.

4.2 Grundlagen und Elemente des Nachweiskonzeptes

Ausgangspunkt für die Entwicklung des Nachweiskonzeptes ist der sichere Einschluss der Radionuklide und sonstigen Inhaltsstoffe der radioaktiven Abfälle in der Nachverschlussphase in einem ewG, der einen definierten Bereich um die Grubenbaue des Endlagerbergwerks im Salzgestein, mindestens um die Grubenbaue der Einlagerungsbereiche, darstellt /MÖN 12/. Als sicherer Einschluss wird der Zustand des Endlagersystems bezeichnet, bei dem es im Nachweiszeitraum allenfalls zu einer geringfügigen Freisetzung von Radionukliden aus dem ewG kommt. Dieser Ansatz basiert auf der Anforderung gemäß Abschnitt 4.2 der Sicherheitsanforderungen /BMU 10/, dass die Freisetzungen radioaktiver Stoffe aus dem Endlager langfristig die aus der natürlichen Strahlenexposition resultierenden Risiken nur sehr wenig erhöhen dürfen. Gleichzeitig muss für den ewG gemäß Abschnitt 7.2.1 der Sicherheitsanforderungen gezeigt werden, dass dessen Integrität für alle wahrscheinlichen Entwicklungsmöglichkeiten nachgewiesen werden kann.

Die Inhalte des Nachweiskonzeptes orientieren sich an den Elementen eines vorliegenden Nachweiskonzeptes für eine Salzformation in steiler Lagerung, siehe Abbildung 4.1. Aus dem Nachweiskonzept leiten sich die konkreten Modellrechnungen und Sicherheitsanalysen im Vorhaben KOSINA ab, die in der Synthese schließlich zu einer sicherheitlichen Gesamtbewertung des generischen Systems führen.

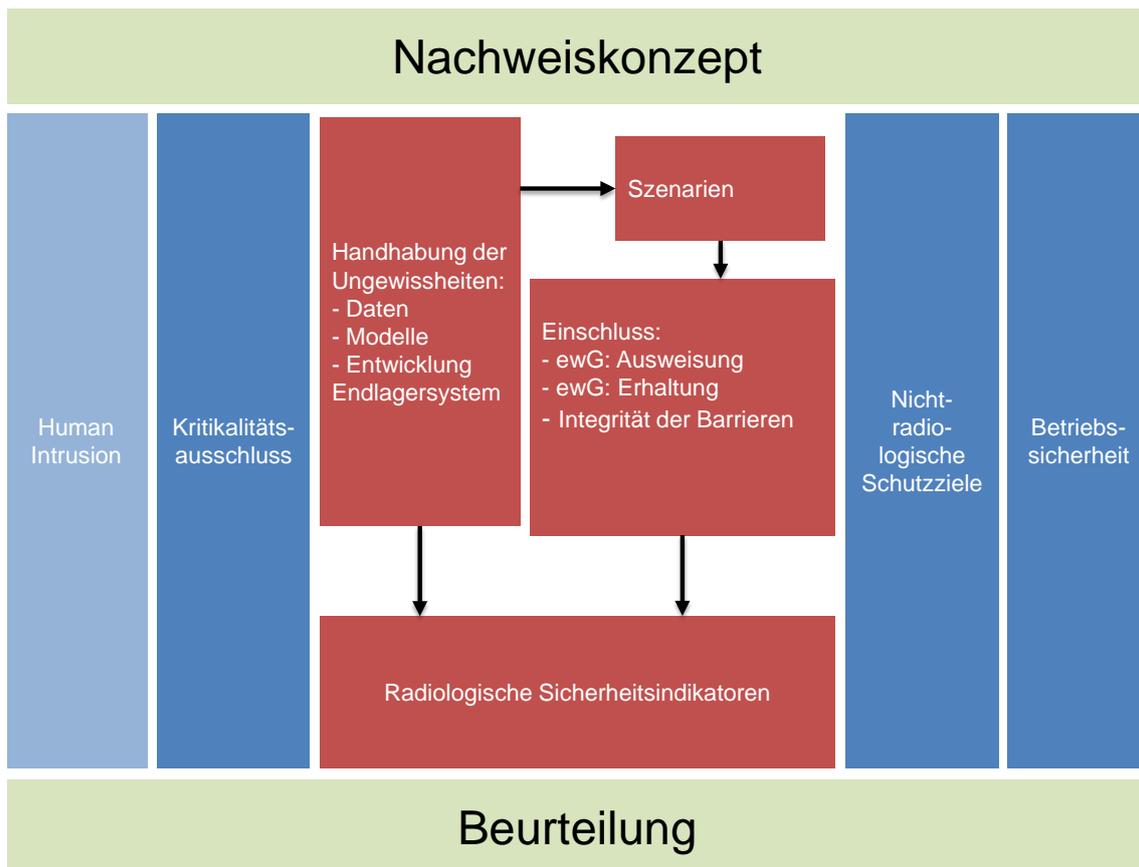


Abb. 4.1 Elemente des Nachweiskonzeptes für eine Salzformation in steiler Lagerung nach /BOL 13/

Das Nachweiskonzept umfasst die folgenden Aspekte:

- Vorgehensweise zur Ausweisung der Lage und Grenze des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (→ Abschnitte 5.1, 7.2.1 und 8.3 der Sicherheitsanforderungen /BMU 10/)
- Erhalt des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs im Nachweiszeitraum
 - Mächtigkeit der Salzbarriere im einschlusswirksamen Gebirgsbereich
 - Integrität der geologischen Barriere (→ Abschnitte 7.2.1 und 7.3 der Sicherheitsanforderungen /BMU 10/)
 - Integrität der geotechnischen Verschlussbauwerke (→ Abschnitte 6.4, 7.2.3 und 7.3 der Sicherheitsanforderungen /BMU 10/)
- Kritikalitätsausschluss (→ Abschnitt 7.2.4 der Sicherheitsanforderungen /BMU 10/)

- Wirksamkeit des Einschlusses der Radionuklide im einschlusswirksamen Gebirgsbereich (→ Abschnitte 6.1, 6.2, 6.3, 7.2.2 und 7.2.3 und 7.3 der Sicherheitsanforderungen /BMU 10/)
- Radiologische Konsequenzen in der Biosphäre anhand der Kriterien der Sicherheitsanforderungen bei Freisetzung von Radionukliden aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich (→ Abschnitte 6.2, 6.3, 7.2.2 , 7.2.3 und 7.3 der Sicherheitsanforderungen /BMU 10/)

Gemäß den Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ sind diese Aspekte für sämtliche Entwicklungsmöglichkeiten des Endlagersystems zu bewerten, deren Eintreten als wahrscheinlich oder weniger wahrscheinlich eingestuft wird. Im Vorhaben KOSINA wurde keine umfassende Szenarienanalyse wie in der VSG durchgeführt. Die Bewertung erfolgte mit Hilfe einer Auswahl möglichst abdeckender Rechenfälle (expert judgement) für die Entwicklungen des Endlagersystems. Dabei wurden die Ergebnisse aus den Vorhaben ISIBEL /BUH 08b/, VSG /BEU 12a/ und ISIBEL-II /BUH 16/ berücksichtigt. Bei Entwicklungsmöglichkeiten, bei denen es zu einer Freisetzung von Radionukliden aus den Abfällen kommen kann, wird im Rahmen von KOSINA ausschließlich der Lösungspfad berücksichtigt. In den folgenden Unterkapiteln wird auf jeden der oben genannten Aspekte des Nachweiskonzeptes ausführlich eingegangen.

Im Hinblick auf den dauerhaften Schutz von Mensch und Umwelt vor sonstigen schädlichen Wirkungen der radioaktiven Abfälle wird Abschnitt 3 der Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ für die durchzuführenden Arbeiten im Vorhaben KOSINA dahingehend interpretiert, dass die Voraussetzungen zum Nachweis eines solchen Schutzes gegeben sind, wenn der dauerhafte Schutz von Mensch und Umwelt vor der ionisierenden Strahlung auf Basis der radiologischen Sicherheitsindikatoren nachgewiesen werden kann.

4.3 Vorgehensweise zur Ausweisung der Lage und Grenzen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs

Die Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ machen keine konkreten Vorgaben bzw. Einschränkungen für die Größe des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (ewG). Allerdings würde ein ewG mit einer sehr großen räumlichen Erstreckung dem den Sicherheitsanforderungen des BMU innewohnenden Gedanken widersprechen, die

Abfälle am Ort der Einlagerung zu konzentrieren. In einem Genehmigungsverfahren ist gemäß /BMU 10/ der ewG vom Antragsteller räumlich und zeitlich zu definieren.

Um den Einschluss der radioaktiven Abfälle im ewG bewerten zu können, müssen dessen Lage und Größe festgelegt sein. Je nach Entwicklung des Endlagersystems erfolgt der Austrag der Radionuklide aus dem ewG lokal, z. B. über den Schacht, oder flächig über die geologische Barriere. Für die Bewertung des Einschlussvermögens wird der jährliche Radionuklidfluss lokal oder über die Außenfläche des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs berechnet und in Bezug zu geeigneten Indikatorwerten gesetzt (siehe Kapitel 4.6.1). Unter der Voraussetzung, dass die Integrität der geologischen Barriere des ewG nachgewiesen werden kann und folglich keine Wegsamkeiten durch das Salzgestein bestehen oder sich ausbilden, können Radionuklide den ewG lediglich entlang der bei der Auffahrung geschaffenen Durchörterungen verlassen, sofern ein Transportmedium zur Verfügung steht und die geotechnischen Verschlussbauwerke oder der Versatz keine vollständige Rückhaltung gewährleisten. Für diese Situation kommen auf Basis der Endlagerkonzepte verschiedene Lokationen für die Bewertung des Einschlussvermögens der radioaktiven Abfälle im ewG in Betracht, z. B.:

- Die Stirnfläche der Streckenverschlüsse auf der Seite des Infrastrukturbereichs und
- die Oberseite der unteren Dichtelemente der Schachtverschlussbauwerke.

Mit dem Vorhaben VSG wurde erstmalig eine Bewertung des Einschlussvermögens der radioaktiven Abfälle in einem ewG auf der Grundlage der am Standort Gorleben angetroffenen geologischen Situation in Verbindung mit dem gewählten Endlagerkonzept und vor dem Hintergrund systematisch abgeleiteter Szenarien zur Beschreibung möglicher zukünftiger Entwicklungen durchgeführt /MÖN 12/. Dort wurde der ewG nicht vorab, d. h. nicht vor Durchführung der numerischen Analysen zur Integrität der Salzbereiche und zum Radionuklidtransport, festgelegt, sondern mittels numerischer Analysen und unter Einbezug anderer Argumente (Homogenität, Größe etc.) die beiden oben genannten Optionen geprüft. Da der Nachweis des sicheren Einschlusses untrennbar mit der Ausweisung von Lage und Ausdehnung des ewG verbunden ist, wird auch im Vorhaben KOSINA in ähnlicher Weise bei der Ausweisung des ewG vorgegangen.

Bei entsprechend positiven Ergebnissen der numerischen Analysen zur Integrität der Salzbereiche und zum Radionuklideinschluss können Lage und Abmessung eines ewG

ausgewiesen werden. Für die wahrscheinlichen Entwicklungen muss gemäß /BMU 10/ die Integrität des ewG über den Nachweiszeitraum von einer Million Jahren nachgewiesen werden. Lassen die Befunde Spielräume für die Festlegung des ewG zu, d. h. gibt es mehrere sinnvolle Alternativen hinsichtlich Lage und Ausdehnung, dann erfolgt die Festlegung des ewG mittels eines Abwägungsverfahrens, welches das Einschlussvermögen, das potenzielle Freisetzungverhalten sowie die Robustheit der Integrität und des Einschlusses sowie die Robustheit des Nachweises würdigt. Die Festlegung des ewG erfolgt anhand von Kriterien, die sich an den grundlegenden Anforderungen an einen ewG orientieren und folgende Aspekte umfassen:

1. Die Charakterisierbarkeit und Prognostizierbarkeit der betreffenden Gebirgsbereiche sowie der geotechnischen Barrieren und die allgemeine Datenlage,
2. die Qualität des Einschlusses (mittels RGI; Kapitel 4.6.1) unter Berücksichtigung der Ungewissheiten der Freisetzungsberechnungen einschließlich der ihnen zu Grunde liegenden Annahmen bzgl. der zukünftigen Entwicklungsmöglichkeiten des Endlagersystems und
3. die Aussagesicherheit des Integritätsnachweises unter Berücksichtigung der Ungewissheiten des Integritätsnachweises (z. B. Homogenität der geomechanischen Materialeigenschaften, Einbeziehung der Modellungsgewissheiten).

Die Überprüfung des ewG erfolgt anschließend anhand einer Gesamtwürdigung der numerischen Analysenergebnisse. Festlegung und Überprüfung des ewG für das Vorhaben KOSINA sind in /KIN 18/ dargelegt.

4.4 Erhalt des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches im Nachweiszeitraum

4.4.1 Mächtigkeit der Salzbarriere im einschlusswirksamen Gebirgsbereich

Eine zentrale Forderung im Sicherheitskonzept ist, dass der ausgewiesene ewG über den gesamten Nachweiszeitraum erhalten bleibt und seine gemäß /BMU 10/ geforderte Barrierefunktion weder durch interne noch durch externe Vorgänge und Prozesse beeinträchtigt wird. Daher ist auch zu prüfen, ob in diesem Zeitraum die Mächtigkeit der Salzbarriere im ewG durch geologische Prozesse von außen reduziert wird. Nach heutigem Kenntnisstand sind für diese Fragestellung zu berücksichtigen /MÖN 12/:

- Subrosion,

- Erosion,
- Glazigene Rinnenbildung sowie
- Salzaufstieg (Diapirismus).

Um den Erhalt des ewG für den Nachweiszeitraum zu zeigen, muss auf Basis einer geologischen Langzeitprognose für den Standort geprüft werden, ob die Salzgesteinsbereiche, die durch geologische Prozesse abgetragen werden können, stets außerhalb der Grenzen des ewG liegen, wobei die Ungewissheiten bezüglich der Prozesse und ihrer Ausprägungen berücksichtigt werden müssen. Von Bedeutung bei Anwendung dieses Kriteriums für flach lagernde Salzformationen sind insbesondere die Subrosion über den gesamten Zeitraum und glazigene Rinnenbildung. Salinare Schichten zwischen dem Rand des ewG und wasserführenden Schichten des Deckgebirges wirken als zusätzliche geologische Barriere, deren Aufgabe vorrangig im physischen Schutz des ewG besteht. Für den Erhalt der Barrierefunktion des ewG als relevant erachtete langzeitige geologische Prozesse werden üblicherweise in einer geologischen Langzeitprognose bewertet, wie z. B. im Vorhaben VSG /MRU 11/. Im Vorhaben KOSINA ist eine geologische Langzeitprognose nicht Gegenstand der Arbeiten.

4.4.2 Integrität der geologischen Barriere

Das unverritzte Salz im ewG stellt den über den gesamten Nachweiszeitraum primär relevanten Teil der geologischen Barriere dar, der den Einschluss der Schadstoffe im einschlusswirksamen Gebirgsbereich sicherstellen muss. Wichtige Voraussetzung dafür ist, dass diese Salzbereiche keine Wegsamkeiten für den Zutritt von Lösungen zu den Abfällen bzw. für den Transport von Radionukliden und sonstigen Schadstoffen zwischen dem Grubengebäude und wasserführenden Schichten außerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs oder der Biosphäre aufweisen. Bei der Betrachtung sind alle geologischen Prozesse, wie die Ausbildung von tektonisch oder hydraulisch induzierten Rissen im Salzgestein zu berücksichtigen, die die hydraulische Dichtwirkung des Salzgesteins im einschlusswirksamen Gebirgsbereich beeinträchtigen können.

Die Integrität der geologischen Barriere wird mit den folgenden Kriterien überprüft:

- Dilatanzkriterium:
Der Spannungszustand muss unterhalb der Dilatanzgrenze bleiben.

- **Minimalspannungskriterium:**

Die minimale Hauptspannung muss größer sein als der rechnerische hydrostatische Lösungsdruck in der entsprechenden Teufe.

Die Nachweisführung erfolgt über gebirgsmechanische Modellrechnungen für den gesamten Gebirgsbereich. Die Integrität eines Gebirgsbereiches bleibt erhalten, wenn beide Kriterien in diesem Bereich – mit Ausnahme eines eng begrenzten Bereichs um die bergmännisch geschaffenen Hohlräume (Auflockerungszone) – nicht verletzt werden. Anhand der Ergebnisse der numerischen Modellrechnungen werden die Gebirgsbereiche identifiziert, in denen die Integrität nicht gegeben ist. Solange die Integrität der geologischen Barriere zumindest im einschlusswirksamen Gebirgsbereich gewährleistet ist, kann ausgeschlossen werden, dass sich Wegsamkeiten für den Zutritt von Lösungen zu den Abfällen oder für den Transport von Radionukliden und sonstigen Schadstoffen zwischen dem Grubengebäude und wasserführenden Schichten außerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs oder der Biosphäre bilden.

Für die geologische Barriere soll weiterhin im Nachweiszeitraum die Bedingung erfüllt sein, dass in Salzbereichen, die einen nennenswerten Anteil kristallwasserhaltiger Salzminerale enthalten (wie z. B. Carnallit), bei den lokal auftretenden Gebirgsbedingungen (Einspanndruck und Temperatur) eine thermische Zersetzung dieser Salzminerale auszuschließen ist. Dies wird durch die Maßnahmen M12 in Verbindung mit Maßnahme M15 erreicht, siehe Kapitel 3.3.2. Zum Nachweis der Wirksamkeit der Maßnahmen wurden thermomechanische Modellrechnungen durchgeführt, um die lokalen Temperaturen und minimalen Hauptspannungen in den kristallwasserhaltigen Salzpartien zu ermitteln. Unter Berücksichtigung der den Modellrechnungen innewohnenden Ungewissheiten wurde geprüft, ob jeweils bei den lokalen Randbedingungen eine Zersetzung der kristallwasserhaltigen Minerale erfolgen kann. In einem späteren Sicherheitsnachweis müssten entsprechende Nachweisrechnungen mit den tatsächlichen Geometrien und aktuellen thermischen Daten für die Abfallgebinde durchgeführt werden. Die Ergebnisse der gebirgsmechanischen und thermischen Modellrechnungen zur Bewertung der Integrität der geologischen Barriere sind in /LIU 18/ dargestellt.

4.4.3 Integrität der geotechnischen Verschlussbauwerke

Das Verschlusskonzept für die im Vorhaben KOSINA untersuchten Endlagerkonzepte sieht geotechnische Verschlussbauwerke und die Verfüllung von Hohlräumen mit kompaktierendem Salzgrus vor.

Als geotechnische Verschlussbauwerke sind die Schachtverschlüsse und Streckenverschlüsse in den Zugangsstrecken zu den Einlagerungsbereichen zu betrachten. Sie gewährleisten als schnell wirksame Barrieren im Verbund mit dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich den Einschluss der Abfälle in dem Zeitraum, in dem der Salzgrusversatz seine Dichtwirkung noch nicht entfaltet. Die Integrität der Verschlussbauwerke muss deshalb mindestens über den Zeitraum gegeben sein, in dem der Salzgrusversatz in den Einlagerungsbereichen und den Zugangsstrecken noch keine ausreichende Dichtfunktion übernimmt. Die Anforderung an ein geotechnisches Verschlussbauwerk ist dann erfüllt, wenn der vorgegebene hydraulische Widerstand des Verschlusses inklusive der Kontakt- und Auflockerungszone, sowie die Integrität des Baukörpers über die vorgesehene Funktionsdauer gegeben sind.

Für eine Festlegung der erforderlichen Funktionsdauer wird im Vorhaben KOSINA auf Erkenntnisse in der VSG zurückgegriffen /MÖN 12/. Hinsichtlich der Geschwindigkeit der Kompaktion von Salzgrus und der Durchlässigkeit von kompaktiertem Salzgrus in Relation zum jeweiligen Kompaktionsgrad, insbesondere bei weit fortgeschrittener Kompaktion des Salzgruses, d. h. bei sehr kleinen Porositäten, bestehen jedoch noch erhebliche Ungewissheiten. Die Kompaktion des Salzgruses bis zum Erreichen der geforderten Eigenschaften ist standortspezifisch und kann, je nach Kriechvermögen des umgebenden Gebirges, nach mineralogischer Zusammensetzung vom Salzgrus, nach herrschender Temperatur und Anwesenheit von Feuchte, einige zehner Jahre bis zu einigen tausend Jahren betragen. Wegen der bestehenden Ungewissheiten sowie der generischen Standortvorgaben erfolgt die Auslegung der Verschlussbauwerke im Vorhaben KOSINA – gleich wie in der VSG – mit einem abdeckenden Zielwert für die Funktionsdauer der geotechnischen Verschlussbauwerke von 50.000 Jahren.

Die Auslegung der Verschlussbauwerke erfolgt mit Modellrechnungen, bei denen gekoppelte thermo-mechanische, hydraulische und geochemische Prozesse berücksichtigt werden. Entsprechende Rechnungen wurden in der VSG exemplarisch durchgeführt, im Vorhaben KOSINA erfolgte lediglich eine verbale Auseinandersetzung mit den Auslegungskriterien. Dabei wurden die folgenden Aspekte beleuchtet:

- Rissbeschränkung,
- Standsicherheit,
- Dauerhaftigkeit (Alterungsbeständigkeit),
- Integrale Permeabilität sowie
- Wahrscheinlichkeit des Ausfalls.

Mit Rechnungen zur Ermittlung der Auslegungsanforderungen wird u. a. der Zeitpunkt ermittelt, ab dem der durch Kompaktion infolge von Salzkriechen verdichtete Salzgrus eine ausreichend hohe hydraulische Dichtwirkung erreicht, um einen Zutritt von nennenswerten Lösungsmengen zu den Abfällen zu verhindern. Die Rechnungen basieren auf einem Stoffmodell, das einen phänomenologischen Zusammenhang zwischen der Porosität des Salzgruses und der zeitabhängigen Permeabilität herstellt /MÜL 99/. Bis zu dem ermittelten Zeitpunkt muss die Integrität der Verschlussbauwerke gewährleistet sein.

Die Modellrechnungen zur Auslegung der geotechnischen Verschlussbauwerke sind mit Ungewissheiten verbunden. Wie oben ausgeführt, ergibt sich die Anforderung an den Wirkungszeitraum des Verschlussbauwerks aus dem zur Kompaktion des Salzgruses benötigten Zeitraum. Hieraus folgt, dass zum einen das Stoffmodell für das Salzkriechen, aus dem die Hohlraumkonvergenz abgeleitet wird, standortspezifisch zu validieren ist. Zum anderen ist der Zusammenhang zwischen Porosität und Permeabilität für kleine Porositätswerte noch mit Ungewissheiten behaftet /POP 12/. Die bei der Salzgruskompaktion unter Endlagerbedingungen erreichbaren Werte der Porosität und der Permeabilität sowie der Wert der Porosität, ab dem der Versatz hydraulisch undurchlässig ist, sind nicht bekannt. Auf der Grundlage des heutigen Kenntnisstandes wird davon ausgegangen, dass bei einem angefeuchteten Versatz (etwa 0,5 bis 1 Vol.% Feuchte) unter Endlagerbedingungen in einem Zeitraum kleiner als 1000 Jahre – der deutlich kürzer als die projektierte Funktionsdauer von Verschlussbauwerken ist – sehr kleine Porositätswerte erreichbar sind, bei denen der Versatz als hydraulisch undurchlässig angesehen werden kann, siehe /MIN 15/.

Gemäß Abschnitt 7.2.3 der Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ muss gezeigt werden, dass die Herstellung und Errichtung der geotechnischen Verschlussbauwerke grundsätzlich erprobt sind, falls keine anerkannten Regeln der Technik vorliegen. Im Vorhaben KOSINA wurde davon ausgegangen, dass entsprechende Nachweise in der Zukunft geführt werden können. Außerdem ist die Robustheit der Bauwerke zu zeigen, d. h. die Unempfindlichkeit gegenüber Störungen und äußeren Einflüssen sowie die Unempfindlichkeit gegenüber Wechselwirkungen im zeitlich gestaffelten Wirken von Barrieren.

Der Integritätsnachweis für den geotechnischen Baukörper besteht aus dem Nachweis der Rissbeschränkung, dem Nachweis der chemischen Langzeitbeständigkeit und dem Nachweis der mechanischen Stabilität des Baukörpers /KRE 08/. Diese Nachweise

sind mindestens für alle zu betrachtenden Lastfälle, die sich aus den wahrscheinlichen Entwicklungen ableiten, zu erbringen. Aufgrund des Wärmeeintrags in das Salzgestein durch die Einlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle kommt es in den ersten paar tausend Jahren zu stark transienten Temperaturentwicklungen in den Salzpartien um die eingelagerten Abfälle, die relevante geomechanische Lastfälle für die geotechnischen Verschlussbauwerke darstellen. Langfristig können vor allem chemische Veränderungen des Baukörpers die Integrität eines Verschlussbauwerkes beeinflussen.

Im Vorhaben VSG wurden umfangreiche Untersuchungen zur Integrität geotechnischer Barrieren durchgeführt /MÜL 12a, MÜL 12b/. Im Rahmen des Vorhabens KOSINA erfolgt keine weitergehende Auseinandersetzung mit der Integritätsbewertung der geotechnischen Verschlussbauwerke

4.5 Kritikalitätsausschluss

Im Rahmen von KOSINA werden keine neuen Nachweise des Kritikalitätsausschlusses durchgeführt, sondern nachfolgend auf das vorliegende und nach wie vor gültige Nachweiskonzept für den Kritikalitätsausschluss des Vorhabens VSG zurückgegriffen /MÖN 12/.

In einem Endlager für hoch radioaktive Abfälle befindet sich spaltbares Material. Es muss ausgeschlossen werden, dass sich dieses Material in einer kritischen Anordnung sammelt. Diese Kritikalität kann nur auftreten, wenn eine genügend große Menge an spaltbarem Material in Gegenwart einer ausreichenden Menge Wasser (oder einem anderen Neutronen-Moderator) vorhanden ist. Kritische Anordnungen müssen für alle als wahrscheinlich oder weniger wahrscheinlich eingestuften Szenarien ausgeschlossen werden /BMU 10/.

Für die Bewertung des Kritikalitätsausschlusses sind die Randbedingungen und Ereignisabläufe der zu betrachtenden Szenarien zu berücksichtigen. Dies betrifft die Moderatormenge, die mit dem spaltbaren Material in Kontakt treten kann, den Zeitpunkt der möglichen Kritikalität und die Berücksichtigung der Ungewissheiten in den Parameterwerten. Die Betrachtungen können auch auf Basis abdeckender Rechenfälle und ungünstiger Modellannahmen, wie z. B. Nichtberücksichtigung des durch den Abbrand des Brennstoffs im Reaktor verringerten Gehaltes an spaltbarem Uran, durchgeführt werden.

Als Indikator für den Nachweis des Kritikalitätsausschlusses wird der Multiplikationsfaktor k_{eff} verwendet, der angibt, wie viele Neutronen im Verhältnis zu den vorher vorhandenen Neutronen bei einem Kernspaltprozess entstehen. Eine Kritikalität kann bei einem Wert

$$k_{eff} < 0,95 \quad (4.1)$$

ausgeschlossen werden.

Im Vorhaben VSG wurde der Nachweis des Kritikalitätsausschlusses für die gleichermaßen in KOSINA verwendeten Behältertypen POLLUX[®], BSK und CASTOR[®] erfolgreich geführt /KIL 12/.

4.6 Einschluss der Radionuklide im ewG

Wie in Kapitel 3 ausgeführt, ist der sichere Einschluss der Radionuklide und sonstigen Inhaltsstoffe der radioaktiven Abfälle im einschlusswirksamen Gebirgsbereich ein Leitgedanke des Sicherheitskonzeptes. Der sichere Einschluss ist dann gegeben, wenn es allenfalls zu Freisetzungen von Radionukliden aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich kommt, die im Hinblick auf ihre radiologischen Auswirkungen als geringfügig einzustufen sind. Ein noch besseres Einschlussvermögen ist beim vollständigen Einschluss der Radionuklide gegeben, bei dem überhaupt keine Radionuklide aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich freigesetzt werden.

Die Bewertung des Einschlussvermögens des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs für die Radionuklide und sonstigen chemotoxischen Inhaltsstoffe der radioaktiven Abfälle ist daher eines der zentralen Elemente des Nachweiskonzeptes im Vorhaben KOSINA. Diese Bewertung erfolgt anhand einer Betrachtung der potenziellen Freisetzungen der Radionuklide über den Lösungspfad für alle wahrscheinlichen und weniger wahrscheinlichen Szenarien. Auf diese Weise für die Nachverschlussphase berechnete oder abgeschätzte Risiken oder Strahlenexpositionen stellen keine Prognose einer tatsächlichen radiologischen Belastung von in der Zukunft lebenden Personen dar, sondern sind gemäß /BMU 10/ nur als Indikatoren für das mit der Endlagerung zu erzielende Schutzniveau zu interpretieren /MÖN 12/.

Zur Bewertung des Einschlussvermögens bietet sich die in Abschnitt 7.2.2 der Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ beschriebene „vereinfachte radiologische Langzeit-

aussage“ an, bei der die potenzielle Freisetzung von Radionukliden am Rand des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs betrachtet wird /DAE 17/.

Zur Bewertung des Einschlussvermögens in einem bestimmten Gebirgsbereich werden verschiedene Aufpunkte entlang der Transportwege der Radionuklide festgelegt. Hierbei sind alle Wegsamkeiten, die zu einem Transport von Radionukliden aus dem Gebirgsbereich beitragen können, zu berücksichtigen. Zur Bewertung des Einschlussvermögens werden an den Aufpunkten die potenziellen Freisetzungen von Radionukliden analysiert und ein radiologischer Indikator errechnet.

4.6.1 Bewertung des Radionuklideinschlusses im ewG für in Lösung befindliche Radionuklide

Gemäß /BMU 10/ ist eine vereinfachte radiologische Langzeitaussage für in Lösung befindliche Radionuklide zulässig, wenn rechnerisch gezeigt werden kann, dass die jährlich aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich freigesetzten radioaktiven Stoffe bei einer Referenzgruppe von 10 Personen der Bevölkerung höchstens zu 0,1 Personen-Millisievert pro Jahr für wahrscheinliche und höchstens zu 1 Personen-Millisievert pro Jahr für weniger wahrscheinliche Entwicklungen führen. Der Berechnung dieser fiktiven Kollektivdosis muss ein anerkanntes generisches Expositionsmodell zugrunde liegen. Gemäß /BMU 10/ ist zu unterstellen, dass die betrachtete Referenzgruppe „während ihrer Lebenszeit den gesamten für die Ernährung (Trinken, Tränken, Beregnen) notwendigen jährlichen Wasserbedarf aus einem Brunnen deckt und dieses Brunnenwasser sämtliche aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich in dem jeweiligen Jahr ausgetretenen Radionuklide enthält“. Laut /BMU 10/ ist dabei „die Verdünnung des Brunnenwassers auf einen Mineralgehalt zu berücksichtigen, der die Nutzung des Brunnenwassers als Trinkwasser zuließe“. Diese Vorgaben sind jedoch nicht eindeutig und führen in der praktischen Anwendung zu Problemen, da quantitative Angaben zum anzusetzenden Wasservolumen für die Aufnahme der Radionuklide fehlen. Des Weiteren ist den Sicherheitsanforderungen nicht zu entnehmen, wie die Kollektivdosis zu ermitteln ist. Hierzu liegen auch keine weiterführenden Empfehlungen, z. B. der SSK, vor.

Im Vorhaben KOSINA wird ein Verfahren zur Bewertung des Einschlussvermögens des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs angewendet, das auf einem Vorschlag des Vorhabens ISIBEL /BUH 10a/ beruht und kompatibel mit der Vorgehensweise für den vereinfachten Nachweis nach /BMU 10/ ist. Der im Vorhaben KOSINA verwendete In-

dikator zur Bewertung der Ergebnisse der Modellrechnungen für in Lösung befindliche Radionuklide ist ein relativer Index, der das Ausmaß der Radionuklidfreisetzung aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich im Verhältnis zu einem Freisetzungswert angibt, der als geringfügig angesehen wird. Der Indikator wird **Radiologischer Geringfügigkeitsindex (RGI)** genannt und ist eine dimensionslose Zahl.

Der Indikator RGI wird aus den jährlichen Radionuklidströmen S_i [Bq/a] über den Rand des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, d. h. bei Undurchlässigkeit der geologischen Barriere des ewG lediglich über die geotechnischen Verschlussbauwerke am Rand des ewG, berechnet. Dieser Radionuklidstrom wird auf die jährlich geschöpfte Wassermenge [m³/a] des Versorgungsbrunnens für das Kollektiv von 10 Erwachsenen verteilt. Mit Hilfe von nuklidspezifischen Dosiskonversionsfaktoren DKF_i [Sv/a / Bq/m³] und dem Bezugswert für eine geringfügige Freisetzung K_{RGI} [Sv/a] ergibt sich daraus die Berechnungsvorschrift für den Indikator RGI,

$$RGI = \frac{10 \cdot \sum_i S_i \cdot DKF_i}{K_{RGI} \cdot W} \quad (4.2)$$

Bei einem Wert für den RGI ≤ 1 ist die Freisetzung geringfügig.

Die Berechnung des RGI-Wertes wird analog zu /MÖN 12/ wie folgt durchgeführt:

- Die Wassermenge W , in der die Radionuklide verteilt werden, beträgt 5000 m³ pro Jahr⁵ für ein Kollektiv von 10 Erwachsenen.
- Die nuklidspezifischen Dosiskonversionsfaktoren DKF_i werden gemäß der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift /BMU 12/ ermittelt, siehe Kapitel 4.6.3.
- Der Bezugswert für eine geringfügige Freisetzung K_{RGI} beträgt für wahrscheinliche Szenarien 0,1 Personen-Millisievert pro Jahr, für weniger wahrscheinliche Szenarien 1 Personen-Millisievert pro Jahr.

⁵ Für eine Personengruppe, die den gesamten für ihre Ernährung notwendigen Bedarf selbst decken kann, wurden eine notwendige Gruppengröße von 30 Personen und ein Wasserbedarf von 20.000 m³/a abgeschätzt /PRÖ 02/. Die zur Berechnung des RGI-Wertes in VSG zugrunde gelegte Wassermenge ergibt sich aus der konservativen Annahme, dass der durchschnittliche Wasserbedarf bei einer Gruppe von 10 Personen, die sich selbst versorgt, pro Person 500 m³/a beträgt.

Daten- und Modellungswissheiten müssen bei der Bewertung der Langzeitsicherheit entsprechend berücksichtigt werden, siehe Kapitel 5. Die Ergebnisse der Modellrechnungen zur Bewertung der Wirksamkeit des Radionuklideinschlusses im ewG sind in /KIN 18/ dargestellt.

4.6.2 Bewertung des Radionuklideinschlusses im ewG für gasförmig freigesetzte Radionuklide

In den Sicherheitsanforderungen des BMU /BMU 10/ wird die vereinfachte radiologische Langzeitaussage nur für in der wässrigen Phase gelöste Radionuklide skizziert. Dieses Verfahren ist auf Radionuklide anwendbar, die auf dem Lösungspfad freigesetzt werden oder die gasförmig aus den Abfällen freigesetzt und entlang ihres Transportweges innerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs in der Porenfeuchte gelöst werden.

Nicht-lösliche gasförmige Radionuklide verbleiben in der Gasphase und werden, soweit sie nicht durch Sorptions- und andere Rückhalteprozesse zurückgehalten werden, mit dem Gasstrom transportiert und können mit diesem gegebenenfalls den einschlusswirksamen Gebirgsbereich verlassen. In /BMU 10/ finden sich jedoch keine Hinweise zu einer vereinfachten radiologischen Langzeitaussage für Radionuklide, die in der Gasphase den einschlusswirksamen Gebirgsbereich verlassen.

Im Vorhaben VSG wurde für die Freisetzungen in der Gasphase ein zu den gelösten Radionukliden analoges Verfahren zur Bewertung des Einschlusses im einschlusswirksamen Gebirgsbereich sowie ein anerkanntes generisches Expositionsmodell für gasförmige Radionuklide verwendet /LAR 13/. Im Vorhaben KOSINA werden ausschließlich Freisetzungen über den Lösungspfad bewertet.

4.6.3 Bewertung der Modellrechnungen zur radiologischen Langzeitaussage

Die Ergebnisse der Modellrechnungen zur Radionuklidfreisetzung aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich werden in vier Stufen bewertet, siehe Abbildung 4.2, wobei auch die Art des Radionuklidtransports (advektiv oder diffusiv) in die Bewertung einfließt. In den ersten drei, in der Abbildung grün dargestellten Stufen wird der sichere Einschluss der radioaktiven Abfälle gemäß BMU-Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ nachgewiesen. Bei Nichteinhaltung der Schutzziele in der Biosphäre gemäß Kap. 6.2 bzw. 6.3 der BMU-Sicherheitsanforderungen – Stufe 4 – wird das Endlagersystem in

der der Bewertung zugrundeliegenden Form als ungeeignet bewertet. Die Bewertung der Modellrechnungen zur radiologischen Langzeitaussage im Vorhaben KOSINA erfolgt ausschließlich für eine Freisetzung von Radionukliden über den Lösungspfad in /KIN 18/.

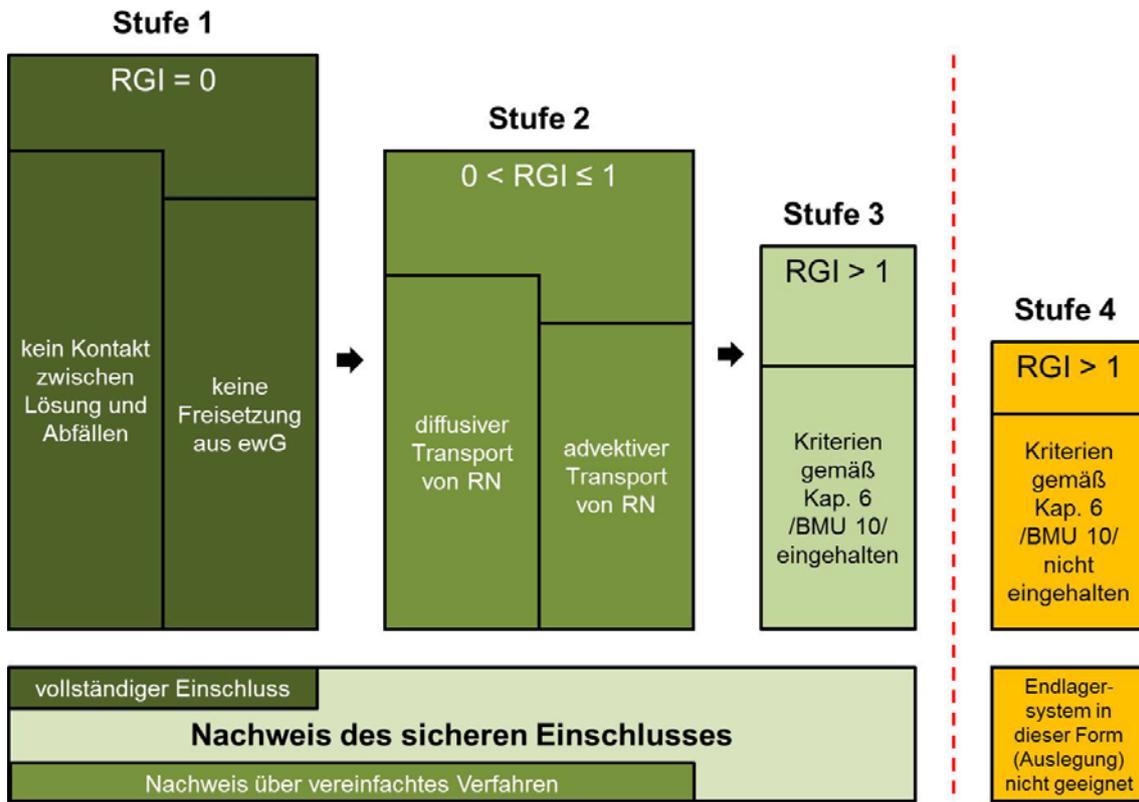


Abb. 4.2 Schema des gestuften Bewertungsverfahrens für die radiologische Langzeitaussage nach /MÖN 12/

Stufe 1: Das optimale Einschlussvermögen des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs ist gegeben, wenn es zu keinem Kontakt zwischen Lösungen und Abfällen kommt und wenn keine Radionuklide freigesetzt werden. Ein vollständiger Einschluss ist auch dann gegeben, wenn es zwar zu einem Lösungskontakt mit den Abfällen kommt, aber keine Radionuklide aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich freigesetzt werden. In diesen Fällen ist der RGI-Wert gleich 0. Die Berechnung einer Strahlenexposition in der Biosphäre als radiologischer Sicherheitsindikator ist in diesem Fall überflüssig.

Stufe 2: Der sichere Einschluss der Radionuklide ist mit dem vereinfachten Verfahren nach /BMU 10/ nachgewiesen, wenn die aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich freigesetzten Mengen einen RGI-Wert von kleiner gleich 1 ergeben. In der Bewertung wird zusätzlich unterschieden, welche Transportprozesse vorrangig zur

Radionuklidfreisetzung beitragen. Eine Freisetzung vorrangig über Diffusionsprozesse wird dabei positiver bewertet als eine überwiegend advective Freisetzung. Bei einer vorrangig advectiven Freisetzung der Radionuklide aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich ist gemäß Abschnitt 7.2.1 der Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ zu zeigen, dass ggf. im einschlusswirksamen Gebirgsbereich vorhandenes Porenwasser nicht am hydrogeologischen Kreislauf im Sinne des Wasserrechts außerhalb des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs teilnimmt.

Stufe 3: Bei einem RGI-Wert > 1 ist zu prüfen, ob die Bewertungskriterien für die als Sicherheitsindikator berechneten Strahlenexpositionen in der Biosphäre gemäß Abschnitt 6 der Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ eingehalten werden. Die durch die Freisetzung von Radionukliden aus dem ewG verursachte zusätzliche effektive jährliche Individualdosis darf maximal bei wahrscheinlichen Entwicklungen des Endlagersystems $10 \mu\text{Sv/a}$ und bei weniger wahrscheinlichen Entwicklungen des Endlagersystems $0,1 \text{ mSv/a}$ betragen. Bei diesen Berechnungen ist auch der Transport der Radionuklide auf dem Lösungspfad und auf dem Gaspfad durch das Deckgebirge bis in die Biosphäre zu betrachten. Dazu ist auch die Hydrogeologie des Deckgebirges zu modellieren. Da über den Zustand des Deckgebirges nach einer Glazialzeit mit Eisüberfahung keine Prognose möglich ist, wird für die Modellrechnungen ein stilisiertes hydrogeologisches Deckgebirgsmodell in Ansatz gebracht. Aus den rechnerisch ermittelten Radionuklidkonzentrationen im Grundwasser werden nach der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift /BMU 12/ radiologische Indikatorwerte zur Bewertung des erzielten Schutzniveaus berechnet.

Abbildung 4.3 zeigt schematisch die Expositionspfade in der Biosphäre bei Nutzung von radioaktiv kontaminiertem Grundwasser. Diese Expositionspfade werden bei der Berechnung der Dosiskonversionsfaktoren betrachtet, vgl. die Angaben in /PRÖ 02/. Dieselben Dosiskonversionsfaktoren werden auch bei der Berechnung des RGI eingesetzt.

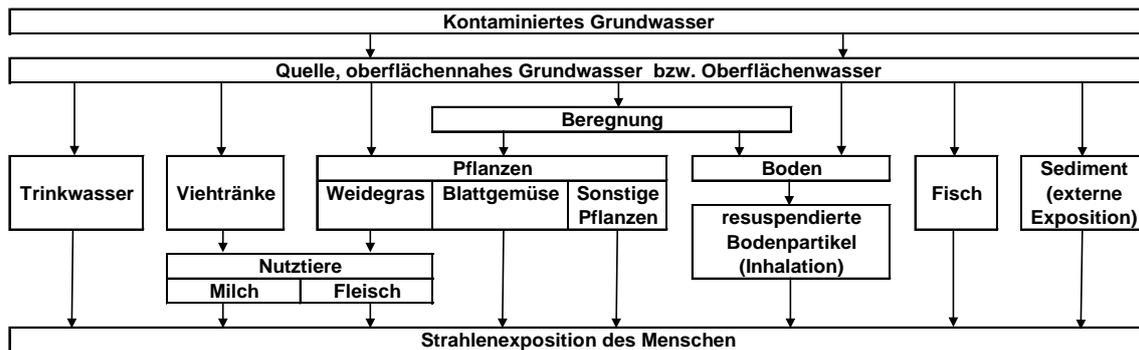


Abb. 4.3 Expositionspfade bei Nutzung radioaktiv kontaminierten Grundwassers /MÖN 12/

Wird die Unterschreitung der Bewertungskriterien gezeigt, ist der Nachweis des sicheren Einschlusses gemäß den Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ erbracht.

Beim Nachweis des sicheren Einschlusses der Radionuklide kann davon ausgegangen werden, dass die Voraussetzungen zum Nachweis des sicheren Einschlusses auch für die sonstigen chemotoxischen Inhaltsstoffe der radioaktiven Abfälle und damit zum Nachweis des dauerhaften Schutzes von Mensch und Umwelt vor den sonstigen schädlichen Wirkungen der radioaktiven Abfälle gegeben sind (siehe Kapitel 4.2).

Stufe 4: Bei einer Überschreitung der Bewertungskriterien gemäß den Kapiteln 6.2 und 6.3 der Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ für den Indikator zusätzliche effektive jährliche Individualdosis ist der langzeitsichere Einschluss der Radionuklide auf Basis des untersuchten Endlagersystems nicht nachgewiesen. In diesem Fall kann ggf. durch eine geänderte Auslegung des Endlagerbergwerks sowie durch weitere bzw. andere technische Maßnahmen der sichere Einschluss erreicht bzw. durch den Abbau von Konservativitäten in der Nachweisführung der Nachweis des sicheren Einschlusses geführt werden. Dazu wären neue Sicherheitsanalysen durchzuführen. Erst wenn die Optimierungspotenziale des Endlagersystems ausgeschöpft sind und trotzdem der Nachweis des langzeitsicheren Einschlusses nicht erfolgreich geführt werden kann, kann an dem Standort kein sicheres Endlager errichtet werden.

4.7 Bewertung von Human-Intrusion-Szenarien

Die Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ fordern, Szenarien mit zukünftigen unbeabsichtigten menschlichen Eingriffen zu analysieren, um festzustellen, ob und wenn ja welche auslegungstechnischen Optimierungsmaßnahmen möglich sind. Mögliche An-

satzpunkte für die Optimierung sind gemäß /BMU 10/ die Senkung der Eintrittswahrscheinlichkeit des menschlichen Eindringens oder die Verringerung der radiologischen Auswirkungen, wobei der Maßstab dafür die radiologischen Konsequenzen für die allgemeine Bevölkerung und nicht für die direkt eingreifenden Personen ist. Im Rahmen der Optimierung des Endlagerkonzepts ist der Aspekt Human Intrusion jedoch nachrangig unter Beachtung der Ausgewogenheit der im Abschnitt 5.1 von /BMU 10/ genannten Optimierungsziele zu berücksichtigen.

Im Hinblick auf das menschliche Eindringen in ein Endlager im Wirtsgestein Salz wurden im Vorhaben VSG Untersuchungen durchgeführt /BEU 12b/. Hierbei wurden unter Human Intrusion alle menschlichen Aktivitäten nach Verschluss des Endlagerbergwerks verstanden, die die Barrieren innerhalb des verfüllten und verschlossenen Grubengebäudes oder den einschlusswirksamen Gebirgsbereich unmittelbar schädigen. Allerdings wurden von den menschlichen Handlungen, die zu einem Eindringen in das Endlager führen, nur solche berücksichtigt, die unbeabsichtigt, d. h. in Unkenntnis der Existenz des Endlagers bzw. des ihm innewohnenden Gefahrenpotenzials erfolgen. Zur Bewertung wurden in /BEU 12b/ stilisierte Szenarien verwendet, die außerhalb der formellen Szenarienentwicklung festgelegt wurden. Dazu werden im systematischen Prozess auf Basis des heutigen Standes von Wissenschaft und Technik Verhaltensweisen der menschlichen Gesellschaft identifiziert, die zum Eindringen in den tiefen Untergrund und damit in den einschlusswirksamen Gebirgsbereich führen können.

Im Rahmen des Vorhabens KOSINA wurden Human-Intrusion-Szenarien nicht weiter betrachtet.

5 Umgang mit Ungewissheiten

Die Sicherheitsanforderungen /BMU 10/, ebenso wie die einschlägigen internationalen Regelwerke, fordern für die Sicherheitsanalyse eine Bewertung der Ungewissheiten. Insbesondere wird in /BMU 10/ im Abschnitt 7.2 „*die Darstellung und Umsetzung einer systematischen Strategie zur Identifizierung, Bewertung und Handhabung von Unsicherheiten*“ gefordert. Des Weiteren wird in Abschnitt 7.3 für die numerische Analyse des Langzeitverhaltens des Endlagers ausgeführt: „*Zusätzlich sind Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen durchzuführen, um den möglichen Lösungsraum aufzuzeigen sowie den Einfluss der Unsicherheiten einschätzen zu können. Dabei sind auch Modellunsicherheiten zu berücksichtigen. Die Einhaltung von numerischen Kriterien, die sich aus diesen Sicherheitsanalysen ergeben oder daraus abgeleitet wurden, muss unter Berücksichtigung der Unsicherheiten mit ausreichender Zuverlässigkeit gegeben sein. Bei den Analysen gegebenenfalls resultierende numerische Verletzungen dieser Kriterien sind in ihrer Relevanz zu bewerten.*“

Die allgemeine, international anerkannte Strategie zum Umgang mit Ungewissheiten⁶ lässt sich in den folgenden Schritten zusammenfassen /VIG 07/:

1. Identifizieren
2. Beurteilen und Quantifizieren
3. Reduzieren und Vermeiden

Diese Vorgehensweise ist dabei als iterativer Prozess zu verstehen, der bei jeder neuen Fassung eines Sicherheitsnachweises (im Sinne eines Safety Case) wiederholt werden muss. In einem frühen Stadium wird vor allem das Ziel verfolgt, die Erkundung des Standortes sowie die Auslegung des Endlagers zu steuern und durch Forschungsarbeiten das Verständnis der im Endlagersystem ablaufenden Prozesse zu vertiefen. In dieser Phase bestehen vielfältige Möglichkeiten, erkannte Ungewissheiten zu umgehen bzw. zu reduzieren und zum Teil sogar zu eliminieren, wobei unter Umständen auch neue Ungewissheiten auftreten können. Letztlich werden aber niemals alle Ungewissheiten zu reduzieren oder gänzlich vermeidbar sein. Die nicht zu vermeidenden Unge-

⁶ Auf den Begriff „Unsicherheit“, der teilweise synonym mit dem Begriff „Ungewissheit“ verwendet wird, wird hier verzichtet, da er mit der Unsicherheit im Sinne einer möglichen Gefährdung verwechselt werden kann.

wissheiten müssen benannt und ihre Auswirkungen auf die Sicherheitsaussage bewertet werden. Der Umgang mit Ungewissheiten erstreckt sich sowohl auf das Sicherheitskonzept als auch auf das Nachweiskonzept.

In einer Sicherheitsanalyse müssen die inhärenten Ungewissheiten im Hinblick auf die vorliegenden Standortdaten, die modellhafte Vorstellung des Endlagersystems, die zukünftige Entwicklung des Endlagersystems aber auch bezüglich der Beschreibung einzelner Prozesse und des Zusammenwirkens von Prozessen identifiziert und ihre Auswirkungen auf die Aussagen zur Sicherheit des Endlagersystems über den Nachweiszeitraum bewertet werden. Die Ungewissheiten werden in der Regel in Szenariungewissheiten (Ungewissheiten bezüglich der zukünftigen Entwicklung des Endlagersystems), Daten- und Parameterungewissheiten sowie Modellungewissheiten eingeteilt.

Für das Vorhaben KOSINA anwendbare Strategien zur Behandlung von Ungewissheiten im Langzeitsicherheitsnachweis für ein HAW-Endlager im Salzgestein wurden in den FuE-Vorhaben ISIBEL /BUH 10b/ und VSG /MÖN 12/ entwickelt. Deren wesentliche Elemente, soweit sie auf den Umgang mit Ungewissheiten in den langzeitsicherheitlichen Bewertungen im Rahmen des Vorhabens KOSINA übertragbar sind, werden in den folgenden Kapiteln zusammenfassend wiedergegeben.

5.1 Umgang mit Ungewissheiten im Vorhaben KOSINA

Der Umgang mit Ungewissheiten im Vorhaben KOSINA gründet sich auf die vorliegenden Erfahrungen aus den Vorhaben ISIBEL und VSG /BUH 08b, MÖN 12/. Den bestehenden Ungewissheiten ist Rechnung zu tragen, wobei eine bedeutende Quelle von Ungewissheiten im Vorhaben KOSINA aus der allein generischen Beschreibung eines Standortes resultiert. Während in der VSG für den Standort Gorleben die obertägige Erkundung abgeschlossen und die untertägige Erkundung in einem Teilbereich des Salzkörpers erfolgt ist /BOR 03/, bestehen im Vorhaben KOSINA keine ortsspezifischen Kenntnisse zu den generischen Standortdaten und ihren Bandbreiten sowie zu Entwicklungen des Endlagerstandortes. Darüber hinaus bestehen Ungewissheiten in Bezug auf das Verhalten und die Entwicklung von wesentlichen Komponenten des Sicherheitskonzeptes wie der geotechnischen Barrieren. Als Beispiel ist das langfristige Kompaktionsverhalten von Salzgrusversatz zu nennen. Die bestehenden Ungewissheiten sind von Einfluss u. a. für die Planung und Auslegung des Endlagerbergwerks, die

Modellierung der Prozesse im Endlagersystem, die Datenbereitstellung und die Prognose der Endlagersystementwicklung.

Um exemplarische Sicherheitsbetrachtungen durchführen zu können, muss mit den bestehenden Ungewissheiten in geeigneter Weise umgegangen werden. Dies geschieht beispielsweise durch plausible, fachlich begründete Annahmen, da die Ungewissheiten für generische Betrachtungen nicht durch Standorterkundungen bzw. durch ein gezieltes F+E Programm reduziert oder beseitigt werden können. Diese fachlich begründeten Annahmen werden mittels Expertenurteil abgeleitet. Bei einer späteren Betrachtung eines realen Standortes müssten die in einer frühen Phase in den Sicherheitsbetrachtungen postulierten Annahmen durch ein gezieltes Erkundungsprogramm so weit wie möglich Bestätigung finden oder weiter untermauert werden.

Wesentliche, im Vorhaben KOSINA zugrunde gelegte Annahmen sind:

- Die strukturgeologische und lithologische Ausbildung der flach lagernden Salzformationen entspricht dem geologischen Profil /VÖL 17/ und der Teufenbereich des Infrastrukturbereichs und der Einlagerungssohle ist gegeben.
- Die Gesteinseigenschaften im einschlusswirksamen Gebirgsbereich und den ggf. außerhalb liegenden Teilen des Grubengebäudes entsprechen /LIU 16/.
- Das Hauptsalz der Staßfurt-Folge weist eine ausreichende Mächtigkeit für die Aufnahme der Einlagerungsbereiche für alle Endlagerkonzepte auf. Dabei ist der festgelegte Sicherheitsabstand zu den Gesteinsschichten, die potentiell lösungsführend sind oder Wegsamkeiten für Lösungen bilden können, zu berücksichtigen.

Der Umgang mit Ungewissheiten bezüglich der zukünftigen Entwicklung des Endlagersystems sowie mit den Daten-, Parameter- und Modellungswissheiten wird im Folgenden ausführlich behandelt.

5.2 Ungewissheiten bezüglich der zukünftigen Entwicklung

Die zukünftige Entwicklung des generischen Standortes ist nur eingeschränkt prognostizierbar. Die genaue geografische Lage des Standortes ist unbekannt, deshalb sind Zeitpunkte und Ausprägungen zukünftiger Ereignisse am Standort nicht eindeutig bestimmbar. Dies betrifft zum Beispiel die Ausprägung und somit die Auswirkungen zukünftiger Kaltzeiten. Obwohl das mehrfache Auftreten solcher Kaltzeiten mit Permafrostbildung in Deutschland innerhalb der nächsten 1 Million Jahre als gesichert

angesehen werden kann, ist eine exakte Vorhersage, wann diese auftreten und bis in welche Gebiete der mit den Kaltzeiten einhergehende Vorstoß der Inlandeisgletscher aus dem Norden führt, nicht möglich. Aus der geologischen Vergangenheit können lediglich Bandbreiten für das zyklische Auftreten der Kaltzeiten sowie die möglichen Ausprägungen abgeleitet werden.

Wegen der eingeschränkten Prognostizierbarkeit der tatsächlichen Entwicklung des Endlagersystems im Nachweiszeitraum wird auf Basis einer systematischen Analyse relevanter Einflussfaktoren eine begrenzte Anzahl schlüssiger Zukunftsbilder entworfen. Dies geschieht üblicherweise mit Hilfe einer Szenarientwicklung. Im Vorhaben KOSINA wurde mangels konkreter Standortvorgaben auf die Durchführung einer systematischen Szenarientwicklung verzichtet. Stattdessen wird auf die Erfahrung im Vorhaben VSG zurückgegriffen, wo eine ausführliche Szenarientwicklung durchgeführt wurde /BEU 12a/. Hieraus können auch für das Vorhaben KOSINA übertragbare Szenarien für die Ableitung von Rechenfällen herangezogen werden. Ein mögliches Vorgehen für die Durchführung einer systematischen Szenarientwicklung analog dem Vorhaben VSG wird im Folgenden skizziert.

Das Ziel einer Szenarientwicklung ist die Identifizierung, ausführliche Beschreibung und Auswahl von möglichen Szenarien zur Entwicklung des Endlagersystems, die für eine zuverlässige Beurteilung der Sicherheit des Endlagers nach dessen Stilllegung relevant sind. Ein Szenarium bildet jeweils alle oder bestimmte Aspekte einer denkbaren, zukünftigen Systementwicklung ab. Die Gesamtheit der in der Szenarientwicklung abgeleiteten Szenarien soll die Ungewissheiten bezüglich der tatsächlichen zukünftigen Entwicklung des Endlagersystems am jeweiligen Standort abdecken.

In einer Szenarientwicklung werden aus den Kenntnissen zu den jeweiligen Standortgegebenheiten, der Analyse der geologischen Vergangenheit des Standortes (gegebenenfalls auch vergleichbarer Standorte oder geologischer Situationen) und den Wechselwirkungen, die durch die Auffahrung von untertägigen Hohlräumen und die Einbringung von wärmeentwickelnden hochradioaktiven und anderen Abfällen verursacht werden, denkbare zukünftige Entwicklungen des Endlagersystems als Szenarien systematisch abgeleitet. Darüber hinaus werden mögliche Abweichungen von den Auslegungsanforderungen bei den technischen Komponenten berücksichtigt.

Ein Szenarium wird durch Zusammenwirken von Merkmalen, Prozessen und Ereignissen (nach den englischen Begriffen features, events and processes zusammenfassend

als FEP bezeichnet) in jeweils festgelegten Ausprägungen eindeutig charakterisiert /WOL 12a, WOL 12b/.

Die Szenarientwicklung wird in drei Schritten durchgeführt:

1. Zusammenstellung einer Universalliste von Eigenschaften, Prozessen und Ereignissen (FEP), die an einem Endlagerstandort vorkommen,
2. Identifizierung relevanter FEP zur Beschreibung möglicher Entwicklungen des Endlagersystems (FEP-Screening) und
3. Ableitung von Szenarien aus den relevanten FEP und Zuordnung der Szenarien in die Klassen „wahrscheinlich“ oder „weniger wahrscheinlich“. Szenarien der Klasse „unwahrscheinlich“ wurden im Vorhaben VSG nicht abgeleitet.

Die Szenarien sind Ausgangspunkt für die Modellrechnungen, auf deren Ergebnissen die Bewertung der Auswirkungen der Einlagerung der radioaktiven Abfälle in der Nachverschlussphase basiert. Dazu werden Rechenfälle definiert und begründet, die jeweils eine modellmäßige Abstraktion eines Szenariums mit definierten Parameterwerten, Parameterbandbreiten oder Kenngrößen zu den statistischen Verteilungen der Parameterwerte darstellen. Die Ableitung und Beschreibung der Rechenfälle ist im Bericht zur Bewertung der Wirksamkeit des Radionuklideinschlusses /KIN 18/ dargestellt.

5.3 Umgang mit nicht prognostizierbaren Entwicklungen

Eine Herausforderung im Rahmen einer systematischen Szenarientwicklung stellt der Umgang mit Ungewissheiten dar, die Entwicklungen oder bestimmte Teilaspekte davon betreffen, die kaum oder gar nicht zu prognostizieren sind. Durch die Festlegung begründbarer Annahmen, die als Stilisierungen bezeichnet werden, wird auf nachvollziehbare Weise dokumentiert, wie mit diesen Ungewissheiten umgegangen wird. Betreffen stilisierte Annahmen eine Entwicklungsmöglichkeit in ihrer Gesamtheit, wird das resultierende Szenarium als stilisiertes Szenarium bezeichnet. Beispiele dafür, u. a. die Auswirkungen eines menschlichen Eindringens in ein Endlager, werden in /MÖN 12/ diskutiert. Im Rahmen von KOSINA werden nicht prognostizierbare Entwicklungen nicht weiter behandelt.

5.4 Umgang mit Daten- und Parameterungewissheiten

Einige Ungewissheiten, die bei der Beschreibung der ablaufenden Prozesse auftreten, ergeben sich aus Ungenauigkeiten bei der Erhebung der notwendigen Daten oder aus den für die Modellierung notwendigen Abstraktionen, vor allem bei der Parametrisierung der eingesetzten Modelle. Zu ihrer Behandlung werden diese Daten- und Parameterungewissheiten im Zusammenhang mit der Beschreibung der entsprechenden Modelle identifiziert bzw. bei der Auswertung von Modellrechenergebnissen behandelt. Dabei werden Verfahren eingesetzt, die dem Stand von Wissenschaft und Technik entsprechen. So können probabilistische Verfahren zur Berücksichtigung von Parameterungewissheiten bei der Bewertung des Einschusses der Radionuklide im ewG und ggf. bei der radiologischen Konsequenzenanalyse sowie Teilsicherheitsbeiwerte bei der Berücksichtigung von Ungewissheiten der Lastfälle für die geotechnischen Bauwerke eingesetzt werden /BEC 16/.

Im Rahmen des Vorhabens KOSINA werden Datenungewissheiten in den Berichten zu den Modellrechnungen identifiziert und dokumentiert. Die Daten werden hinsichtlich ihrer Qualität bewertet und die mit ihnen verbundenen Ungewissheiten in Form von Bandbreiten und Wahrscheinlichkeitsverteilungen ihrer Ausprägung abgeleitet. Darüber hinaus wird festgestellt, welche der benötigten Daten standortspezifisch zu erheben und daher im Rahmen der generischen Betrachtungen ggf. pauschal abdeckend berücksichtigt wurden.

Daten, die für die Sicherheitsanalyse von Relevanz sind (z. B. zur Beschreibung von Prozessen), aber bislang nicht standortspezifisch erhoben wurden, werden mittels Expertenschätzung aus vergleichbaren Abläufen an anderen Standorten, z. B. dem Standort Gorleben, ermittelt. Dabei wird die Übertragbarkeit dieser Daten begründet. Für eine in einem Genehmigungsverfahren abschließend durchzuführende Sicherheitsanalyse müssen diese Daten standortspezifisch erhoben werden.

5.5 Umgang mit Modellungewissheiten

5.5.1 Ungewissheiten bei der modellhaften Beschreibung der generischen Standortgegebenheiten

Wie weiter oben beschrieben, wird als Quelle von Ungewissheiten die fehlende Vorgabe und Erkundung eines konkreten Standortes identifiziert. Es ergeben sich u. a.

Ungewissheiten hinsichtlich der auf generischen Betrachtungen beruhenden Standortkenntnisse sowie der daraus zu entwickelnden modellhaften Beschreibung der Standortgegebenheiten. Hieraus folgt, dass mit Ungewissheiten, z. B. über den Stoffbestand und die räumliche Verteilung im Wirtsgestein, umzugehen ist. Eine Reduzierung dieser Ungewissheiten kann nur durch eine standortabhängige, untertägige Erkundung erreicht werden.

Es ist jedoch anzumerken, dass auch nach einer umfassenden Erkundung die Kenntnisse über den Standort und seine geowissenschaftlichen Gegebenheiten mit nicht vermeidbaren Ungewissheiten behaftet bleiben werden. Dies liegt in der Natur der geowissenschaftlichen Erkundung und der Notwendigkeit begründet, Befunde, die immer nur in Teilbereichen eines Standortes erhoben werden können, auf größere räumliche Standortbereiche zu übertragen.

Im Vorhaben KOSINA wird wie folgt mit den derzeit sich abzeichnenden Modellungswissheiten umgegangen:

5.5.1.1 Ungewissheiten im Standortmodell

Zur Beschreibung des Standortes wird nach Stand von Wissenschaft und Technik ein generisches geologisches Modell der flach lagernden Salzstruktur sowie der darüber liegenden Deckgebirgsschichten aufgebaut, in das die heutigen Kenntnisse aus den geowissenschaftlichen Erkundungen an konkreten, vergleichbaren Standorten einfließen /REI 14/. Für das Endlagerbergwerk wird auf Grundlage von Ergebnissen untertägiger Erkundungen vergleichbarer Standorte eine modellhafte Vorstellung über den Aufbau und die Gesteinszusammensetzung des generischen Standortes entwickelt /VÖL 17/.

5.5.1.2 Ungewissheiten im Endlagermodell

Die Entwicklung eines Endlagermodells (Endlagerkonzept, Endlagerauslegung) muss auf dem Standortmodell aufbauen. Insofern pflanzen sich die Ungewissheiten im Standortmodell bei der Entwicklung des Endlagermodells fort. Im Rahmen des Vorhabens KOSINA werden auf Grundlage von Erfahrungen am Standort Gorleben Endlagermodelle entwickelt, welche in das generische Standortmodell räumlich eingepasst werden. Der Platzbedarf für das Endlager ergibt sich u. a. aus dem Abfallaufkommen,

den betrieblichen Erfordernissen z. B. hinsichtlich der Wetterführung und den für die Auslegung herangezogenen maximalen Gebirgstemperaturen.

Standortmodell und Endlagermodelle stellen die Basis für die analytischen Nachweise wie etwa die Integritätsnachweise der geologischen Barriere und der geotechnischen Verschlussbauwerke oder den Nachweis des Einschlusses der Radionuklide dar. Daher muss bei einer späteren Würdigung der Analyseergebnisse den Modellungsgewissheiten Rechnung getragen werden.

5.5.2 Ungewissheiten bei der modellhaften Beschreibung von Prozessen

Am Standort ablaufende Prozesse, die für die Beurteilung der Endlagersicherheit von Bedeutung sind, können im Hinblick auf ihre modellhafte Beschreibung und ihre Ungewissheit wie folgt eingeteilt werden:

- Prozesse, für die ein gutes Prozessverständnis, d. h. ein Prozessverständnis mit geringen Ungewissheiten, vorliegt und die gut modellierbar sind,
- Prozesse, für die ein gutes Prozessverständnis vorliegt, die aber nur beschränkt modellierbar sind,
- Prozesse, für die ein weniger gutes Prozessverständnis, d. h. ein Prozessverständnis mit Ungewissheiten, vorliegt.

Im ersten Fall unterliegt die Beschreibung des Prozesses keiner wesentlichen Ungewissheit, ihre Modellierung ist nicht problematisch /REI 16, BEC 16/.

Im zweiten Fall können Gründe für die Beschränkung der Modellierbarkeit beispielsweise die Komplexität des Prozesses sein oder die Beschreibung durch Ansätze, deren Parameter für die numerische Analyse nicht erhoben werden können. Im Vorhaben KOSINA wird den Ungewissheiten durch vereinfachte Ansätze begegnet, die den zu behandelnden Prozess im Hinblick auf die Sicherheitsaussage konservativ abbilden und die in Berichten zu den Modellrechnungen dokumentiert sind. Diese Vorgehensweise erfordert eine belastbare Begründung der Konservativität, was ggf. nicht immer eindeutig möglich sein wird. Die Bewertung der Konservativität stützt sich auf Expertenurteile ab.

Im dritten Fall liegen entweder noch nicht ausreichende Untersuchungen zum Prozessverständnis vor oder aber der Prozess entzieht sich der Befunderhebung, z. B.

durch eine extrem lange Versuchszeit. Diese Ungewissheiten lassen sich nur bedingt reduzieren. Dort wo keine Befunde vorliegen, werden vereinfachte Ansätze herangezogen. Die Ansätze müssen durch Expertenurteil begründet sein und später verifiziert werden.

Für die quantitativen Bewertungen, wie etwa den Integritätsnachweis oder die Bewertung des Einschusses der Radionuklide, werden zur Umsetzung der Modelle und Prozesse in Rechenmodelle qualifizierte, d. h. für die hier ausgewiesenen Einsatzbereiche verifizierte und validierte Rechenverfahren und Stoffgesetze herangezogen.

6 Zusammenfassung

Das Vorhaben KOSINA hatte zum Ziel, erstmalig ein technisches (standortunabhängiges) Konzept für ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle und ausgediente Brennelemente für flach lagernde Steinsalzformationen zu entwickeln. Im vorliegenden Bericht werden das Sicherheitskonzept, das Nachweiskonzept und die Methodik zum Umgang mit Ungewissheiten dargestellt. Diese Themen bildeten eine wichtige Grundlage für die weiteren Untersuchungen im Rahmen des Vorhabens.

Die Entwicklung der Sicherheits- und Nachweiskonzepte für KOSINA erfolgte auf Basis vorliegender Konzepte für Endlagersysteme im Wirtsgestein Salz in steiler Lagerung, wie sie in den FuE-Vorhaben ISIBEL und VSG erarbeitet wurden. Im Vorhaben ISIBEL wurde zum ersten Mal ein Sicherheitskonzept und ein darauf basierendes Nachweiskonzept für eine Salzformation in steiler Lagerung erstellt, das den ewG-Gedanken und die hervorgehobene Sicherheitsfunktion des Einschlusses berücksichtigt /BUH 08a/. Im Vorhaben VSG wurde das Sicherheitskonzept für die Anwendung auf den Standort Gorleben fortentwickelt und das Nachweiskonzept spezifiziert /MÖN 12/ und für eine vorläufige Sicherheitsbewertung angewendet /FIS 13/. Im vorliegenden Bericht werden Anpassungen der vorhandenen Konzepte an die Bedingungen eines Endlagers für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle an einem Standort in flach lagernden Salzformationen abgeleitet und begründet.

Im Sicherheitskonzept wird verbalargumentativ beschrieben, wie die natürlichen Gegebenheiten, Prozesse und technischen Maßnahmen in ihrer Gesamtheit die Sicherheit des Endlagers gewährleisten. Dabei werden vor allem sicherheitsrelevante Aspekte der Nachverschlussphase in einem ganzheitlichen Ansatz widerspruchsfrei berücksichtigt. Aus dem Sicherheitskonzept werden konkrete Anforderungen an den Standort, das Endlagerkonzept, die Endlagerauslegung und die zu erbringenden Bewertungen abgeleitet.

Im Nachweiskonzept wird detailliert die Vorgehensweise dargestellt, wie im Rahmen des Vorhabens KOSINA die Sicherheit des Endlagersystems auf Basis des Sicherheitskonzeptes bewertet und damit Aussagen zum Einschlussvermögen des betrachteten Endlagersystems abgeleitet werden sollen. Die Indikatoren für die Bewertung der Integrität der geologischen Barriere sowie der geotechnischen Verschlussbauwerke werden dargestellt. Die Bewertung der Wirksamkeit des Einschlusses der Radionuklide

im einschlusswirksamen Gebirgsbereich erfolgt anhand des radiologischen Geringfügigkeitsindex RGI als radiologischer Sicherheitsindikator.

Inhärente Ungewissheiten im Hinblick auf die Standortdaten, die zukünftige Entwicklung des Endlagersystems, aber auch bezüglich der Beschreibung einzelner Prozesse und des Zusammenwirkens von Prozessen werden in der methodischen Vorgehensweise bzw. im Rahmen der Modellrechnungen berücksichtigt.

Literaturverzeichnis

- /ABV 17/ Allgemeine Bundesbergverordnung vom 23. Oktober 1995 (BGBl. I S. 1466), zuletzt geändert durch Artikel 4 der Verordnung vom 18. Oktober 2017 (BGBl. I S. 3584).
- /ATG 17/ Gesetz über die friedliche Verwendung der Kernenergie und den Schutz gegen ihre Gefahren (Atomgesetz - AtG) vom 23. Dezember 1959 (BGBl. I S. 814) in der Fassung der Bekanntmachung vom 15. Juli 1985 (BGBl. I S. 1565), zuletzt geändert durch Artikel 2 Absatz 2 des Gesetzes vom 20. Juli 2017 (BGBl. I S. 2808).
- /AKE 02/ AkEnd - Arbeitskreis Endlagerstandorte: Auswahlverfahren für Endlagerstandorte – Empfehlungen des AkEnd-Arbeitskreis Auswahlverfahren Endlagerstandorte. Abschlussbericht, Hannover, 2002.
- /BBG 17/ Bundesberggesetz vom 13. August 1980 (BGBl. I S. 1310), zuletzt geändert durch Artikel 2 Absatz 4 des Gesetzes vom 20. Juli 2017 (BGBl. I S. 2808).
- /BEC 16/ Becker, D.: RepoSTAR – Ein Codepaket zur Steuerung und Auswertung statistischer Rechenläufe mit dem Programmpaket RepoTREND. GRS-411, BMWi-FKZ 02E10367. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, ISBN 978-3-944161-93-8, Braunschweig, 2016.
- /BER 15/ Bertrams, N., Bollingerfehr, W., Dörr, S., Filbert, W., Simo, E., Fahland, S., Hammer, J., Heusermann, S., Kühnlenz, T., Mrugalla, S., Reinhold K., Buhmann, D., Kindlein, J., Mönig, J., Wolf, J., Minkley, W., Popp, T.: Konzeptentwicklung für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle in flach lagernden Salzsichten in Deutschland sowie Entwicklung und Überprüfung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes KOSINA – Zwischenbericht Dezember 2015. TEC-37-2015-Z, BMWi-FKZ 02E11395/02E11405, Zwischenbericht, Peine, 2015.

- /BER 17/ Bertrams, N., Herold, P., Herold, M., Krone, J., Lommerzheim, A., Prignitz, S., Kuate, E.S.: Entwicklung eines technischen Konzeptes für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle und ausgediente Brennelemente im Kristallingestein in Deutschland. TEC-20-2017-AB, BMWi-FKZ 02E11516, Abschlussbericht, Peine, 2017.
- /BEU 12a/ Beuth, T., Bracke, G., Buhmann, D., Dresbach, C., Keller, S., Krone, J., Lommerzheim, A., Mönig, J., Mrugalla, S., Rübel, A., Wolf, J.: Szenari-entwicklung: Methodik und Anwendung. Bericht zum Arbeitspaket 8, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-284, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, ISBN 978-3-939355-60-1, Köln, 2012.
- /BEU 12b/ Beuth, T., Baltés, B., Bollingerfehr, W., Buhmann, D., Charlier, F., Filbert, W., Fischer-Appelt, K., Mönig, J., Rübel, A., Wolf, J.: Untersuchungen zum menschlichen Eindringen in ein Endlager. Bericht zum Arbeitspaket 11, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-280, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, ISBN 978-3-939355-56-4, Köln, 2012.
- /BMI 83/ Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk, RdSchr. d. BMI v. 20.4.1983 – RS – AGK 3 – 515 790/2.
- /BMU 10/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle. Bonn, Stand: 30. September 2010.
- /BMU 12/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Allgemeine Verwaltungsvorschrift zu § 47 der Strahlenschutzverordnung: Ermittlung der Strahlenexposition durch die Ableitung radioaktiver Stoffe aus kerntechnischen Anlagen oder Einrichtungen. Bundesanzeiger AT 05.09.2012 B1: Bonn, 28. August 2012.
- /BOL 11/ Bollingerfehr, W., Filbert, W., Lerch, C., Tholen, M.: Endlagerkonzepte. Bericht zum Arbeitspaket 5, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-272, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, ISBN 978-3-939355-48-9, Köln, 2011.

- /BOL 12/ Bollingerfehr, W., Filbert, W., Dörr, S., Herold, P., Lerch, C., Burgwinkel, P., Charlier, F., Thomauske, B., Bracke, G., Kilger, R.: Endlagerauslegung und -optimierung. Bericht zum Arbeitspaket 6, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-281, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, ISBN 978-3-939355-57-1, Köln, 2012.
- /BOL 13/ Bollingerfehr, W., Buhmann, D., Filbert, W., Keller, S., Krone, J., Lommerzheim, A., Mönig, J., Mrugalla, S., Müller-Hoeppe, N., Weber, J., Wolf, J.: Status of the safety concept and safety demonstration for an HLW repository in salt – Summary report. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, DBE Technology GmbH (DBE Tec), Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), TEC-15-2013-AB, BMWi-FKZ 02E10719 und 02E10729, Abschlussbericht, Peine, 2013.
- /BOR 03/ Bornemann, O., Behlau, J., Keller, S., Mingerzahn, G., Schramm, M.: Standortbeschreibung Gorleben, Teil III. Ergebnisse der Erkundung des Salinars. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover, 2003.
- /BUH 08a/ Buhmann, D., Mönig, J., Wolf, J., Heusermann, S., Keller, S., Weber, J.R., Bollingerfehr, W., Filbert, W., Kreienmeyer, M., Krone, J., Tholen, M.: Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW – ISIBEL. Zusammenfassender Abschlussbericht. DBE TECHNOLOGY GmbH, BGR und GRS. TEC-09-2008-AB. BMWi-FKZ 02E10065 und 02E10055. Peine, 2008.
- /BUH 08b/ Buhmann, D., Mönig, J., Wolf, J.: Untersuchungen zur Ermittlung und Bewertung von Freisetzungsszenarien. Teilbericht zum Projekt ISIBEL: „Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW“. GRS-233, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH. ISBN 978-3-939355-07-6, BMWi-FKZ 02E10055. Braunschweig, 2008.

- /BUH 10a/ Buhmann, D., Mönig, J., Wolf, J., Keller, S., Mrugalla, S., Weber, J.R., Krone, J., Lommerzheim, A.: Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW – ISIBEL. Nachweis und Bewertung des Isolationszustandes "Sicherer Einschluss". DBE TECHNOLOGY GmbH, BGR und GRS, BMWi-FKZ 02E10065 und 02E10055. Peine, 2010.
- /BUH 10b/ Buhmann, D., Mönig, J., Wolf, J., Keller, S., Mrugalla, S., Weber, J.R., Krone, J., Lommerzheim, A.: Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW – ISIBEL. Behandlung von Ungewissheiten im Langzeitsicherheitsnachweis für ein HAW-Endlager im Salzgestein. DBE TECHNOLOGY GmbH, BGR und GRS, BMWi-FKZ 02E10065 und 02E10055. Peine, 2010.
- /BUH 16/ Buhmann, D., Becker, D.-A., Laggiard, E., Rübel, A., Spießl, S., Wolf, J.: Probabilistische Bewertung von Szenarien in Langzeitsicherheitsanalysen – Ergebnisse des Vorhabens ISIBEL. GRS-416, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, ISBN 978-3-944161-98-3, BMWi-FKZ 02E10719. Braunschweig, 2016.
- /DAE 17/ Deutsche Arbeitsgemeinschaft für Endlagerforschung: Standortauswahl für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle: Empfehlungen der DAEF zu Rolle und Methodik der im Standortauswahlgesetz vorgesehenen Sicherheitsuntersuchungen. www.endlagerforschung.de, 2017.
- /DOE 18/ U.S. Department of Energy: Waste Isolation Pilot Plant, operated by Nuclear Waste Partnership LLC, www.wipp.energy.gov, Carlsbad (NM), 2018.
- /FIS 13/ Fischer-Appelt, K., Baltés, B., Buhmann, D., Larue, J., Mönig, J.: Synthesebericht für die VSG. Bericht zum Arbeitspaket 13, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-290, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, ISBN 978-3-939355-66-3, Köln, 2013.

- /IAEA 06/ International Atomic Energy Agency: Geological Disposal of Radioactive Waste. Safety Requirements. IAEA Safety Standards Series No. WS-R-4, ISBN 92-0-10570-9, Wien, 2006.
- /IAEA 11/ International Atomic Energy Agency: Disposal of Radioactive Waste. IAEA Safety Standards Series, ISSN 1020-525X; no. SSR-5, STI/PUB/1449, Wien, 2011.
- /KIL 12/ Kilger, R., Bock, M., Moser, E., Gmal, B.: Betrachtungen zum Kritikalitätsausschluss in der Nachverschlussphase. Technischer Bericht zum Arbeitspaket 6, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH: München, März 2012.
- /KIN 18/ Kindlein, J., Buhmann, D., Mönig, J., Spießl, S., Wolf, J.: Bewertung der Wirksamkeit des Radionuklideinschlusses für ein Endlager in flach lagernden Salzformationen – Ergebnisse aus dem Vorhaben KOSINA. GRS-496, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, ISBN 978-3-946607-81-6, BMWi-FKZ 02E11405B, Braunschweig, Mai 2018.
- /KOC 12/ Kock, I., Eickemeier, R., Frieling, G., Heusermann, S., Knauth, M., Minkley, W., Navarro, M., Nipp, H.-K., Vogel, P.: Integritätsanalyse der geologischen Barriere. Bericht zum Arbeitspaket 9.1, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-286, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Institut für Gebirgsmechanik GmbH (IfG), ISBN 978-3-939355-62-5, Köln, Juli 2012.
- /KRE 08/ Kreienmeyer, M., Lerch, Ch., Polster, M., Tholen, M.: Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW – ISIBEL. Nachweiskonzept zur Integrität der einschlusswirksamen technischen Barrieren. DBE TECHNOLOGY GmbH, TEC-15-2008-AP, BMWi-FKZ 02E10065, Peine, April 2008.

- /LAR 13/ Larue, J., Baltés, B., Fischer, H., Frieling, G., Kock, I., Navarro, M., Seher, H.: Radiologische Konsequenzenanalyse. Bericht zum Arbeitspaket 10, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-289, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, ISBN 978-3-939355-65-6, Köln, 2013.
- /LIU 16/ Liu, W., Völkner, E., Minkley, W., Popp, T.: Zusammenstellung der Materialparameter für THM-Modellberechnungen – Ergebnisse aus dem Vorhaben KOSINA. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), BMWi-FKZ 02E11395, Hannover, 2016.
- /LIU 18/ Liu, W., Knauth, M., Eickemeier, R., Fahland, S., Popp, T., Minkley, W.: TM- und THM-gekoppelte Modellberechnung zur Integritätsanalyse der geologischen Barrieren in flach Lagernden Salzformationen – Ergebnisse aus dem Vorhaben KOSINA. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover, und Institut für Gebirgsmechanik (IfG), Leipzig, BMWi-FKZ 02E11395/02E11405, April 2018.
- /MIN 10/ Minkley, W., Wüste, U., Popp, T., Neumann, D., Wiedemann, M., Bobinsky, J.: Beweissicherungsprogramm zum geomechanischen Verhalten von Salinarbarrieren nach starker dynamischer Beanspruchung und Entwicklung einer Dimensionierungsrichtlinie zum dauerhaften Einschluss, BMWi-FKZ: 02C1264, IfG-Institut für Gebirgsmechanik GmbH, Leipzig, 31.01.2010.
- /MIN 15/ Minkley, W., Knauth, M., Brückner, D., Lüdeling C.: Integrity of saliferous barriers for heat-generating radioactive waste – natural analogues and geomechanical requirements. Mechanical Behavior of Salt VIII, Rapid City, USA, 26-28 May 2015, 159-170, 2015.
- /MÖN 12/ Mönig, J., Buhmann, D., Rübél, A., Wolf, J., Baltés, B., Fischer-Appelt, K.: Sicherheits- und Nachweiskonzept. Bericht zum Arbeitspaket 4, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-277, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, ISBN 978-3-939355-53-3, Köln, 2012.

- /MRU 11/ Mrugalla, S.: Geowissenschaftliche Langzeitprognose. Bericht zum Arbeitspaket 2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-275, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, ISBN 978-3-939355-51-9, Köln, 2011.
- /MÜL 99/ Müller-Lyda, I., Birthler, H., Fein, E.: Ableitung von Permeabilitäts-Porositätsrelationen für Salzgrus. GRS-148, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, ISBN 3-931995-10-0, BMWi-FKZ 02E8855-2; Braunschweig, 1999.
- /MÜL 12a/ Müller-Hoeppe, N., Buhmann, D., Czaikowski, O., Engelhardt, H.J., Herbert, H.-J., Lerch, C., Linkamp, M., Wieczorek, K., Xie, M.: Integrität geotechnischer Barrieren – Teil 1: Vorbemessung. Bericht zum Arbeitspaket 9.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-287, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, ISBN 978-3-939355-63-2, Köln, 2012.
- /MÜL 12b/ Müller-Hoeppe, N., Breustedt, M., Czaikowski, O., Wieczorek, K., Wolf, J.W.: Integrität geotechnischer Barrieren – Teil 2: Vertiefte Nachweisführung. Bericht zum Arbeitspaket 9.2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-288, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, ISBN 978-3-939355-64-9, Köln, 2012.
- /NEA 04/ Nuclear Energy Agency: Post-Closure Safety Case for Geological Repositories. Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), NEA No. 3679, ISBN 92-64-02075-6, Paris, 2004.
- /NEA 09/ Nuclear Energy Agency: International Experiences in Safety Cases for Geological Repositories (INTESC), NEA No. 6251, ISBN 978-92-64-99103-3, Paris, 2009.
- /PAP 97/ Papp, R.: GEISHA - Gegenüberstellung von Endlagerkonzepten in Salz und Hartgestein. Bericht FZKA-PTE Nr. 3, Projektträger des BMBF für Entsorgung, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe, 1997.

- /POP 12/ Popp, T., Salzer, K., Schulze, O., Stührenberg, D.: Hydro-mechanische Eigenschaften von Salzgrusversatz – Synoptisches Prozessverständnis und Datenbasis. Memorandum, Institut für Gebirgsmechanik (IFG), Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Leipzig, 30.05.2012.
- /POP 93/ Popp, T.; Kern, H.: Thermal dehydration reactions characterized by combined measurements of electrical conductivity and elastic wave velocities. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 120: 43-57, 1993.
- /PRI 18/ Prignitz, S., Bertrams, N., Filbert, W.: Bewertung der Betriebssicherheit für ein Endlager in flach lagernden Salzformationen – Ergebnisse aus dem Vorhaben KOSINA. DBE TECHNOLOGY GmbH, TEC-12-2017-AP, BMWi-FKZ 02E11405, Peine, 2018.
- /PRÖ 02/ Pröhl, G., Gering, F.: Dosiskonversionsfaktoren zur Berechnung der Strahlenexposition in der Nachbetriebsphase von Endlagern nach dem Entwurf der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zu § 47 Strahlenschutzverordnung. GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, Institut für Strahlenschutz. Neuherberg, 2002.
- /REI 14/ Reinhold, K., Hammer, J., Pusch, M.: Verbreitung, Zusammensetzung und geologische Lagerungsverhältnisse flach lagernder Steinsalzfolgen in Deutschland – Zwischenbericht. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Berlin / Hannover, 2014.
- /REI 16/ Reiche, T.: RepoTREND – Das Programmpaket zur integrierten Langzeitsicherheitsanalyse von Endlagersystemen. GRS-413, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH. BMWi-FKZ 02E10367. ISBN 978-3-944161-95-2. Braunschweig, 2016.
- /RÜB 14/ Rübél, A., Meleshyn, A.: Methodik und Anwendungsbezug eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes für ein HAW-Endlager im Tonstein (An-SichT). Sicherheitskonzept und Nachweisstrategie. GRS-338, Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, BMWi-FKZ 02E11061A, ISBN 978-3-944161-18-1, Braunschweig, 2014.

- /SAM 89/ Systemanalyse Mischkonzept (SAM), Anhang 10: Datensammlung. Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, KWA-Nr. 2190 A1, Karlsruhe, 1989.
- /STA 13/ Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz - StandAG). – Bundesgesetzblatt , Teil I, Nr. 41 vom 23. Juli 2013: 2553-2564.
- /STA 17/ Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz - StandAG). – Bundesgesetzblatt , Teil I, Standortauswahlgesetz vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), zuletzt geändert durch Artikel 2 Absatz 16 des Gesetzes vom 20. Juli 2017 (BGBl. I S. 2808).
- /STV 17/ Strahlenschutzverordnung vom 20. Juli 2001 (BGBl. I S. 1714; 2002 I S. 1459), zuletzt geändert nach Maßgabe des Artikel 10 durch Artikel 6 des Gesetzes vom 27. Januar 2017 (BGBl. I S. 114, 1222).
- /VIG 07/ Vigfusson, J., Madoux, J., Raimbault, Ph., Röhlig, K.-J. & Smith, R.: European Study on the regulatory review of the safety case for geological disposal of radioactive waste. Case study: Uncertainties and their management, 2007.
- /VÖL 17/ Völkner, E., Kühnlenz, T., Hammer, J., Gast, S.: Entwicklung generischer geologischer Modelle für flach lagernde Salzformationen – Ergebnisse aus dem Vorhaben KOSINA. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), BMWi-FKZ 02E11395, Hannover, 2017.
- /WIE 04/ Wieczorek, K.; Schwarzianeck, P.: Untersuchungen zur hydraulisch wirksamen Auflockerungszone um Endlagerbereiche im Salinar in Abhängigkeit vom Hohlraumabstand und Spannungszustand. Abschlussbericht, GRS-198, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, ISBN 3-931995-65-8, Braunschweig, 2004.

- /WOL 12a/ Wolf, J.W., Altmaier, M., Behlau, J., Beuth, T., Bracke, G., Bube, C., Buhmann, D., Dresbach, C., Hammer, J., Keller, S., Kienzler, B., Klinge, H., Krone, J., Lommerzheim, A., Metz, V., Mönig, J., Mrugalla, S., Popp, T., Rübel, A., Weber, J.R.: Konzept und Aufbau des FEP-Kataloges. Bericht zum Arbeitspaket 7, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-282, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, ISBN 978-3-939355-58-8, Köln, 2012.
- /WOL 12b/ Wolf, J.W., Altmaier, M., Behlau, J., Beuth, T., Bracke, G., Bube, C., Buhmann, D., Dresbach, C., Hammer, J., Keller, S., Kienzler, B., Klinge, H., Krone, J., Lommerzheim, A., Metz, V., Mönig, J., Mrugalla, S., Popp, T., Rübel, A., Weber, J.R.: FEP-Katalog. Bericht zum Arbeitspaket 7, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-283, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln, 2012.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 3.1	Zeitliche Wirkung der verschiedenen Barrieren im Endlagersystem in der Nachverschlussphase /MÖN 12/.....	17
Abb. 4.1	Elemente des Nachweiskonzeptes für eine Salzformation in steiler Lagerung nach /BOL 13/.....	36
Abb. 4.2	Schema des gestuften Bewertungsverfahrens für die radiologische Langzeitaussage nach /MÖN 12/.....	49

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

Schwertnergasse 1
50667 Köln

Telefon +49 221 2068-0

Telefax +49 221 2068-888

Boltzmannstraße 14

85748 Garching b. München

Telefon +49 89 32004-0

Telefax +49 89 32004-300

Kurfürstendamm 200

10719 Berlin

Telefon +49 30 88589-0

Telefax +49 30 88589-111

Theodor-Heuss-Straße 4

38122 Braunschweig

Telefon +49 531 8012-0

Telefax +49 531 8012-200

www.grs.de