

Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW

ISIBEL

**Nachweis und Bewertung des Isolationszustandes
"Sicherer Einschluss"**

**Überprüfung und Bewertung
des Instrumentariums für eine
sicherheitliche Bewertung
von Endlagern für HAW**

ISIBEL

**Nachweis und Bewertung des Isolationszustandes
"Sicherer Einschluss"**

Dokumentkennzeichen XXX-XXX

Rev.	Datum	eigene Nr.	Grund / Beschreibung

			geprüft:/...../..... Dr. Krone Dr. Weber Dr. Mönig
--	--	--	---

78 Seiten

Stand April 2010

**D. Buhmann
J. Mönig
J. Wolf**

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

**S. Keller
S. Mrugalla
J. R. Weber**

**Bundesanstalt für Geowis-
senschaften und Rohstoffe
(BGR)**

**J. Krone
A. Lommerzheim**

**DBE TECHNOLOGY
GmbH**

Vorwort

Im Rahmen des Projektes ISIBEL wurde ein Sicherheits- und Nachweiskonzept für die sicherheitliche Bewertung von Endlagern für hochradioaktive Abfälle in der Wirtsfornation Salzgestein entwickelt. Dabei wurde untersucht, inwieweit das Instrumentarium für die Bewertung der Betriebs- und Nachbetriebsphase eines solchen Endlagers vorhanden, bzw. ausreichend ist. Das Vorhaben wurde in zwei Projektphasen abgewickelt: Phase I im Zeitraum 01.10.2005 bis 31.12.2007 und Phase II im Zeitraum 01.01.2008 bis 31.03.2010. Die Ergebnisse beider Phasen wurden jeweils zu deren Abschluss in einer Reihe von Berichten veröffentlicht, die nachfolgend aufgeführt sind.

Berichte der Phase I

Zusammenfassender Bericht Phase I

Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW – ISIBEL. Gemeinsamer Bericht von DBE TECHNOLOGY GmbH, BGR und GRS. DBE TECHNOLOGY GmbH Peine, April 2008.

Einzelberichte zu den verschiedenen Arbeitspaketen

1. Langzeitsicherheitsanalyse für ein HAW-Endlager im Salz – Geologisches Referenzmodell für einen HAW-Endlagerstandort im Salz – Technischer Bericht. Beitrag für das Projekt ISIBEL. BGR, Hannover, Tagebuchnummer 11614/05, Juli 2007.
2. Konzeptionelle Endlagerplanung und Zusammenstellung des endzulagernden Inventars. DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine, April 2008.
3. Bewertung der Betriebssicherheit. DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine, April 2008.
4. FEP-Generierung und Szenarienentwicklung – Stand November 2006. BGR, Hannover, Tagebuchnummer 10402/08, Februar 2008.
5. Nachweis der Integrität der geologischen Barriere. BGR, Hannover, Tagebuchnummer 10403/08, September 2007.
6. Nachweiskonzept zur Integrität der einschlusswirksamen technischen Barrieren. DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine, April 2008.
7. Untersuchungen zur Ermittlung und Bewertung von Freisetzungsszenarien. GRS Braunschweig, Bericht GRS-233, April 2008.
8. Nachweiskonzepte für die Einhaltung der nicht radiologischen Schutzziele in der Nachbetriebsphase. DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine, April 2008.
9. FEP-Katalog für einen HAW-Standort im Wirtsgestein Salz. Gemeinsamer Bericht von DBE TECHNOLOGY GmbH, BGR und GRS. Peine, Hannover, Braunschweig, April 2008.

Berichte der Phase II

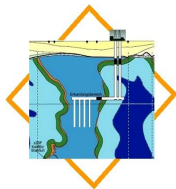
Zusammenfassender Abschlussbericht für die Phasen I und II

Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW – ISIBEL. Gemeinsamer Abschlussbericht von BGR, DBE TECHNOLOGY GmbH und GRS. Hannover, Peine, Braunschweig, April 2010.

Einzelberichte zu den verschiedenen Arbeitspaketen der Phase II

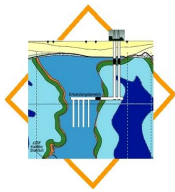
10. FEP-Katalog für einen HAW-Standort im Wirtsgestein Salz. Revision 01. Gemeinsamer Bericht von BGR, DBE TECHNOLOGY GmbH und GRS. Hannover, Peine, Braunschweig,, April 2010,
11. Erläuterungen zur Revision des FEP-Kataloges. Gemeinsamer Bericht von BGR, DBE TECHNOLOGY GmbH und GRS. Hannover, Peine, Braunschweig,, April 2010.
12. Entwicklung und Test einer Methodik zur Ableitung eines Referenzszenarios. Gemeinsamer Bericht von BGR, DBE TECHNOLOGY GmbH und GRS. Hannover, Peine, Braunschweig, April 2010.
13. Nachweis und Bewertung des Isolationszustandes „Sicherer Einschluss“. Gemeinsamer Bericht von BGR, DBE TECHNOLOGY GmbH und GRS. Hannover, Peine, Braunschweig, April 2010.
14. Behandlung von Ungewissheiten im Langzeitsicherheitsnachweis für ein HAW-Endlager in Salzgesteinen. Gemeinsamer Bericht von BGR, DBE TECHNOLOGY GmbH und GRS. Hannover, Peine, Braunschweig, April 2010.
15. Vorgehensweise bei einem Safety-Case-Konzept für ein HAW-Endlager im Salinar. Gemeinsamer Bericht von BGR, DBE TECHNOLOGY GmbH und GRS. Hannover, Peine, Braunschweig, April 2010

Die dieser Studie zugrunde liegenden Arbeiten wurden im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages von der BGR sowie, vertreten durch das Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Projektträger Karlsruhe, Bereich Wassertechnologie und Entsorgung (PTKA-WTE), unter den Förderkennzeichen 02E10055 und 02E10065 von der GRS mbH bzw. DBE TECHNOLOGY GmbH durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt liegt jedoch allein bei den Autoren.



Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	13
2	Das Sicherheits- und Nachweiskonzept.....	15
2.1	Langzeitaussage zur Integrität des ewG	17
2.2	Nachweis der Integrität der geotechnischen Barrieren des Endlagersystems	18
2.3	Bewertung der Freisetzung von Radionukliden aus dem ewG	19
3	Konzept für den Nachweis des sicheren Einschlusses	21
3.1	Räumliche und zeitliche Ausweisung des ewG	21
3.2	Indikatoren zum Nachweis des sicheren Einschlusses	23
3.2.1	Bewertung der Transportprozesse	24
3.2.2	Radiologischer Geringfügigkeitsindex (RGI)	25
3.2.3	Anteil der über den Nachweiszeitraum kumulierten freigesetzten Stoffmenge (KFS)	29
4	Bewertung des sicheren Einschlusses	33
4.1	Das hydraulische Endlagermodell.....	33
4.2	Deterministische Rechnungen	39
4.2.1	Der Bezugsfall	39
4.2.2	Weitere Rechenfälle	42
4.3	Ergebnisse der deterministischen Rechnungen	44
4.3.1	Ergebnisse des Bezugsfalls	45
4.3.2	Ergebnisse der weiteren Rechenfälle.....	45
4.4	Probabilistische Rechnungen.....	59
5	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	66
6	Glossar	74
7	Literatur	76



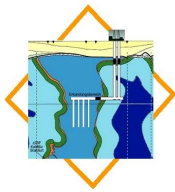
1 Einführung

Primäres Ziel der Endlagerung radioaktiver, insbesondere hochradioaktiver und langlebiger, Abfälle ist der langfristige Einschluss der Radionuklide in tiefen geologischen Formationen und damit die Isolation der Abfälle von der Biosphäre, um auf diese Weise den Schutz von Mensch und Umwelt vor diesen Abfällen zu gewährleisten. Auf dieser Zielsetzung beruhen die in den letzten Jahren weiterentwickelten internationalen Regelwerke und Empfehlungen, siehe z.B. (IAEA 2006). In manchen Aspekten wurden die im Jahr 1983 veröffentlichten nationalen Sicherheitskriterien (BMI 1983) diesen Regelwerken und Empfehlungen nicht mehr gerecht, woraus sich ein Bedarf an einer Überarbeitung der nationalen Sicherheitsanforderungen ableitete. Bei der Neufassung der Sicherheitsanforderungen für ein HAW-Endlager in Deutschland erfolgte gemäß der internationalen Entwicklung ein Umdenken in Richtung Nachweis des sicheren Einschlusses statt ausschließlicher Bewertung der radiologischen Konsequenzen in der Biosphäre (BALTES 2008, BMU 2009).

Im Sicherheitskonzept für ein Endlager werden die allgemein formulierten sicherheitlichen Zielsetzungen konkretisiert. Es muss unter Beachtung der standortspezifischen Gegebenheiten und der jeweils geltenden nationalen Regelungen definiert werden und bildet die Basis für den Langzeitsicherheitsnachweis. Nach den Sicherheitsanforderungen (BMU 2009) soll der sichere Einschluss in Verbindung mit den geotechnischen Barrieren vor allem durch den Gebirgsbereich gewährleistet werden, der während des Betrachtungszeitraumes seine Integrität behält (einschlusswirksamer Gebirgsbereich).

Aufgrund der technisch realisierbaren begrenzten Dichtheit und der im Vergleich zum Nachweiszeitraum begrenzten Lebensdauer geotechnischer Barrieren sowie der relativ langsamen und derzeit nicht ausreichend genau prognostizierbaren Kompaktion des Salzgrusversatzes in Strecken und Schächten bis zur Erreichung einer dem gewachsenen Steinsalz vergleichbaren Dichtwirkung, ist es nicht zielführend, die Isolation der Radionuklide nur bei deren langfristigem vollständigem Einschluss (Nullemission) im einschlusswirksamen Gebirgsbereich als gegeben anzusehen. Die Bewertung des Konzeptes des Isolationszustandes „Sicherer Einschluss“ lässt deshalb eine geringe sicherheitlich nichtrelevante Emission von Radionukliden zu.

Im Rahmen des FuE-Vorhabens ISIBEL wurde erstmals für ein HAW-Endlager ein Nachweiskonzept entwickelt, das stringent dem methodischen Ansatz des sicheren Einschlusses in Salzformationen folgt (BUHMANN ET AL. 2008A). Eine eindeutige und gleichzeitig realistische Definition des Isolationszustandes "Sicherer Einschluss" wurde bisher allerdings nicht vorgenommen.



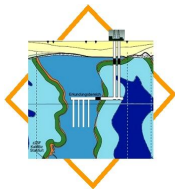
Ziel dieses Berichtes ist es daher, unter Berücksichtigung der Gegebenheiten an einem Salzstock in der norddeutschen Tiefebene ein zweckmäßiges Konzept für den Nachweis des sicheren Einschlusses zu erarbeiten und dafür geeignete Indikatoren abzuleiten, mit denen der sichere Einschluss bewertet werden kann. Die prinzipielle Anwendbarkeit dieses Konzeptes im Rahmen eines Langzeitsicherheitsnachweises wird anhand von Beispielrechnungen getestet. Dabei werden die allgemeinen Anforderungen an das Nachweiskonzept gemäß den Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle vom Juli 2009 (BMU 2009) berücksichtigt (Kapitel 2). Die Sicherheitsanforderungen vom BMU werden im weiteren Bericht als „die Sicherheitsanforderungen“ bezeichnet.

Basierend auf dem im Projekt ISIBEL entwickelten Sicherheits- und Nachweiskonzept für ein HAW-Endlager in Salzgestein werden in Kapitel 3 die Vor- und Nachteile verschiedener Abmessungen für den Gebirgsbereich getestet, auf die das Konzept für den Nachweis des Isolationszustandes „Sicherer Einschluss“ angewandt werden kann. Dieser Gebirgsbereich wird als einschlusswirksamer Gebirgsbereich (ewG) bezeichnet.

Zur Bewertung der Zweckmäßigkeit des Konzeptes für den Nachweis des Isolationszustandes „Sicherer Einschluss“ für ein HAW-Endlager in Salzgestein wird in Kapitel 4 ein schematisiertes hydraulisches Endlagermodell beschrieben, das die zu erwartenden hydraulischen Widerstände der Verschlussbauwerke und die zeitliche Entwicklung der Porosität und Permeabilität des Versatzes auf der Basis der heutigen Modellvorstellungen abbildet. Die Konsistenz und Handhabbarkeit des vorgestellten Nachweiskonzeptes für den sicheren Einschluss, insbesondere der für die Nachweisführung identifizierten Indikatoren, werden anhand von Beispielrechnungen für das schematisierte hydraulische Endlagermodell überprüft. Dabei werden verschiedene Entwicklungen des Endlagersystems betrachtet. Diese Entwicklungen sind nicht Ergebnis einer abgeschlossenen Szenarienanalyse, beziehen sich aber auf Erkenntnisse aus dem Projekt ISIBEL (BUHMANN ET AL. 2008A).

Anhand unterschiedlicher Parameterkonstellationen zur Versatzkompaktion sowie zum hydraulischen Widerstand und zur Lebensdauer von einschlusswirksamen Barrieren werden die Bedingungen für einen Lösungszutritt bis hin zu den Abfällen, der Lösungsprozess und die Mobilisierung von Radionukliden sowie der anschließende Ausstrom von Radionukliden aus dem ewG mittels deterministischer und probabilistischer Rechenläufe untersucht.

In Kapitel 5 werden auf Grundlage der Ergebnisse der vorangegangenen Kapitel ein geeignetes Nachweiskonzept für den sicheren Einschluss inklusive der Ausweisung einer zeitlichen und räumlichen Abgrenzung des ewG aufgestellt. Dieses Konzept wird auf die Gegebenheiten am Referenzstandort angewandt und der Isolationszustand „sicherer Einschluss“ für die untersuchten Entwicklungen des Endlagersystems mit den gegebenen Indikatoren bewertet.



2 Das Sicherheits- und Nachweiskonzept

Das Sicherheits- und Nachweiskonzept für einen Standort in Salzgestein, das im Projekt ISIBEL erarbeitet wurde, bildet die Grundlage für die weiterführenden Arbeiten in diesem Bericht. Wichtige Gesichtspunkte werden in diesem Kapitel kurz wiederholt. Eine detaillierte Beschreibung des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes ist in BUHMANN ET AL. 2008A zu finden.

Darüber hinaus wird auch auf die Aspekte der im Juli 2009 vom BMU veröffentlichten Sicherheitsanforderungen (BMU 2009) eingegangen, die bei der Erstellung des Nachweiskonzeptes für den sicheren Einschluss berücksichtigt werden sollen. Passagen, die aus den Sicherheitsanforderungen übernommen wurden, sind nachfolgend kursiv wiedergegeben. Die Sicherheitsanforderungen und das im Projekt ISIBEL entwickelte Konzept basieren auf denselben grundsätzlichen Überlegungen in Bezug auf die Führung eines Sicherheitsnachweises.

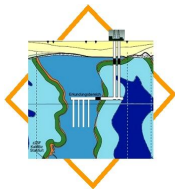
Ein wesentlicher Baustein bei der Entwicklung von Sicherheitskonzepten für Endlagersysteme ist die Definition von Sicherheitsfunktionen (IAEA 2006). Sie beschreiben die ablaufenden sicherheitsrelevanten Prozesse und dienen der Strukturierung des Nachweiskonzeptes.

Eine Sicherheitsfunktion ist eine Eigenschaft oder ein im Endlagersystem ablaufender Prozess, die bzw. der in einem sicherheitsbezogenen System oder Teilsystem oder bei einer Einzelkomponente die Erfüllung der sicherheitsrelevanten Anforderungen gewährleistet.

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

Diese Definition geht nicht von einem vollständigen Einschluss aus, sondern trägt der Tatsache Rechnung, dass über geologische Zeiträume auch in sehr dichten Medien Transportprozesse stattfinden können. Es ist für den Nachweis des Einschlusses daher zu zeigen, dass für die erwartete Entwicklung eines Endlagersystems keine Emissionen auftreten, die die Einhaltung der allgemeinen Schutzziele gefährden, d.h. der Einschluss als sicher bezeichnet werden kann (sicherer Einschluss).

Als allgemeine Schutzziele werden in den Sicherheitsanforderungen definiert:



Das Sicherheits- und Nachweiskonzept

1. dauerhafter Schutz von Mensch und Umwelt vor der ionisierenden Strahlung und sonstigen schädlichen Wirkungen dieser Abfälle.
2. Vermeidung unzumutbarer Lasten und Verpflichtungen für zukünftige Generationen

Für den Nachweis des sicheren Einschlusses ist der ewG zu bestimmen, *der im Zusammenwirken mit den technischen Verschlüssen (Schachtverschlüsse, Kammerabschlussbauwerke, Dammbauwerke, Versatz, ...) den Einschluss der Abfälle sicherstellt.* Des Weiteren muss dargelegt werden, wie nachgewiesen wird, dass von eventuell auftretenden Emissionen aus dem ewG keine unzulässigen Risiken ausgehen, d.h. dass das untersuchte Endlagersystem als sicher einzustufen ist.

Der Nachweis des sicheren Einschlusses bei wahrscheinlichen Entwicklungen des Endlagersystems basiert nach dem im Projekt ISIBEL erstellten Sicherheits- und Nachweiskonzept im wesentlichen auf der Langzeitaussage zur Integrität der geologischen Barriere und dem Nachweis der Integrität der geotechnischen Barrieren des Endlagersystems (Abb. 2.1).

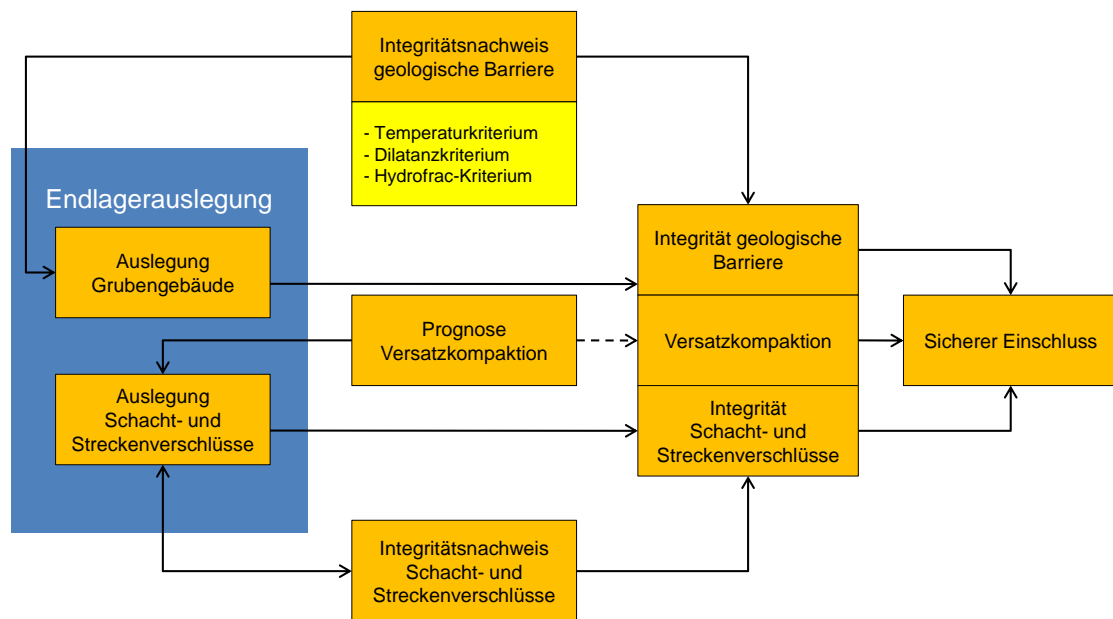
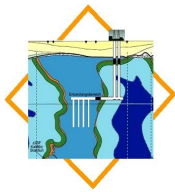


Abb. 2.1: Sicherheits- und Nachweiskonzept „Sicherer Einschluss“ für einen Endlagerstandort im Salzgestein nach BUHMANN ET AL. 2008A

Ergänzt werden diese Integritätsnachweise durch Bewertungen der Freisetzungen von Radionukliden aus dem ewG, die unter bestimmten Randbedingungen gegebenenfalls auch bei den wahrscheinlichen Entwicklungen des Endlagersystems auftreten. Dabei ist durch Vergleich mit geeigneten Prüfwerten zu belegen, dass diese Freisetzungen geringfügig sind.



Eine wichtige Rolle bei den Betrachtungen spielt die Prognose des zeitlichen Ablaufs und des Endzustandes bei der Kompaktion des in die Strecken als Versatz eingebrachten Salzgruses.

Die für das Gesamtkonzept des Nachweises des sicheren Einschlusses wesentlichen Aspekte der Vorgehensweisen für die Integritätsnachweise und die Bewertung von Freisetzungsszenarien sind im Folgenden beschrieben. Dabei werden die allgemein gehaltenen Vorgaben aus den Sicherheitsanforderungen in Beziehung zu den entsprechenden Komponenten aus dem Sicherheitskonzept gesetzt und dadurch konkretisiert.

Ungewissheiten über mögliche Entwicklungen des Endlagersystems, die Einfluss auf die Integrität des ewG oder die Integrität der geotechnischen Komponenten haben, werden in der Regel über Alternativszenarien berücksichtigt. Die radiologischen Auswirkungen dieser Alternativszenarien in der Biosphäre werden mit Hilfe von Modellrechnungen analysiert und durch Vergleich mit regulatorisch vorgegebenen radiologischen Schutzziele bewertet.

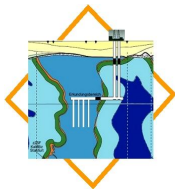
2.1 Langzeitaussage zur Integrität des ewG

Zur geologischen Bewertung des Einschlussvermögens des ewG eines Endlagers wird der Begriff Integrität verwendet. *Darunter wird die Fähigkeit und Wirksamkeit des ewG verstanden, das Eindringen von Fluiden aus dem Deck- und Nebengebirge in das Endlagerbergwerk sowie gegebenenfalls das Austreten von Fluiden aus dem Endlagerbergwerk dauerhaft zu verhindern oder zumindest stark zu behindern.*

(...)

Für die wahrscheinlichen Entwicklungen ist für den ewG auf der Grundlage einer geowissenschaftlichen Langzeitprognose nachzuweisen, dass die Integrität dieses Gebirgsbereichs über einen Zeitraum von einer Million Jahre sichergestellt ist. Hierfür ist vom Antragsteller der ewG räumlich und zeitlich eindeutig zu definieren und unter Berücksichtigung der eingelagerten Abfälle und der technischen bzw. geotechnischen Barrieren zu zeigen, dass

- *die Ausbildung von sekundären Wegsamkeiten innerhalb des ewG ausgeschlossen werden kann, die zum Eindringen unbelasteter oder zum Austreten schadstoffbelasteter wässriger Lösungen führen können und dass*
- *gegebenenfalls im einschlusswirksamen Gebirgsbereich vorhandenes Porenwasser nicht am hydrologischen Kreislauf im Sinne des Wasserrechts außerhalb des ewG teilnimmt. Dies gilt als erfüllt, wenn die Ausbreitung von Schadstoffen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich durch advective Transportprozesse allenfalls vergleichbar zur Ausbreitung durch diffusive Transportprozesse erfolgt.*



Nach dem im Projekt ISIBEL erarbeiteten Sicherheits- und Nachweiskonzept erfolgt der Nachweis der Integrität der geologischen Barriere durch drei quantitative Kriterien (Abb. 2.1):

- Temperaturkriterium,
- Dilatanzkriterium,
- Hydrofrac-Kriterium.

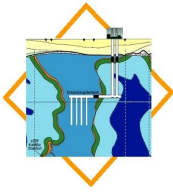
Eine Ausweisung der räumlichen Dimension der geologischen Barriere erfolgte in diesem Konzept bisher nicht. Bei entsprechender Definition der Ausdehnung des ewG kann anhand dieser drei Kriterien die Integrität des ewG über den Nachweiszeitraum nachgewiesen werden.

2.2 Nachweis der Integrität der geotechnischen Barrieren des Endlager-systems

Gemäß dem Im Projekt ISIBEL erarbeiteten Sicherheitskonzept werden die Schächte und die Zugänge zu den Einlagerungsbereichen mit Schacht- bzw. Streckenverschlüssen verschlossen. Die Schacht- bzw. Streckenverschlüsse sind die einschlusswirksamen Barrieren, deren Integrität nachgewiesen werden muss bis durch das Kriechen des Salzgesteins und den sich dadurch kompaktierenden Versatz die Abfälle sicher eingeschlossen sind.

Des Weiteren wird im Sicherheitskonzept von einer Verfüllung des gesamten Hohlraumvolumens sämtlicher Grubenbaue des Endlagerbergwerkes mit Salzgrus ausgegangen, der durch die Konvergenz mit der Zeit kompaktiert wird. Dabei nehmen seine Porosität und Permeabilität ab, bis er langfristig ähnliche Barriereneigenschaften wie unverritztes Steinsalz aufweist. Dadurch wird die bei der Errichtung des Endlagers unvermeidbare Perforation der geologischen Barriere geheilt. Bis dieser Zustand erreicht wird, müssen die geotechnischen Verschlussbauwerke den Zutritt von nennenswerten Mengen von Lösungen zu den Abfällen bzw. ein Austreten von schadstoffbelasteten Lösungen verhindern oder zumindest stark behindern.

Nach den Sicherheitsanforderungen 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 Zeit-



raum übernehmen, in dem die volle Wirksamkeit der langfristig wirksamen Barrieren noch nicht gegeben ist.

Die geotechnischen Barrieren werden so angeordnet und hinsichtlich ihres hydraulischen Widerstandes und der Langzeitstabilität so ausgelegt, dass der Zutritt von Lösungen über den Schacht und die mit Salzgrus verfüllten Strecken bis zu den endgelagerten Abfällen verhindert werden kann. Die Einhaltung dieser Anforderungen ist wiederum in den ingenieurtechnischen Nachweisen zur Barrierenintegrität zu belegen.

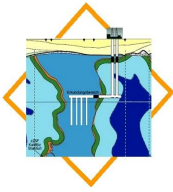
Eine weitere Komponente des Sicherheitskonzeptes ist, dass der Verschluss der Einlagerungsbohrlöcher mit einer vorkompaktierten Salzgrusschüttung erfolgt. Sofern für den Nachweis des sicheren Einschlusses erforderlich, kann hierfür auch eine aufwendige Konstruktion mit höheren Anforderungen vorgesehen werden. Bezüglich der Integrität der Behälter hingegen werden für die Nachbetriebsphase keine besonderen Anforderungen gestellt. Weitere Details zu den geotechnischen Barrieren sind in KREIENMEYER ET AL. 2008 dargelegt.

2.3 Bewertung der Freisetzung von Radionukliden aus dem ewG

Neben den Integritätsnachweisen für die geologische Barriere und die geotechnischen Verschlussbauwerke sind die radiologischen Auswirkungen einer eventuellen Radionuklidfreisetzung aus dem ewG zu bewerten. Dazu werden für das Referenzszenario, das eine wahrscheinliche Entwicklung des Endlagersystems repräsentiert und für einige Alternativszenarien Modellrechnungen zu einer eventuellen Radionuklidausbreitung aus dem ewG in das Deckgebirge und die Biosphäre durchgeführt. Zur Einhaltung der allgemeinen Schutzziele und Sicherheitsprinzipien müssen die errechneten Strahlenexpositionen unterhalb des in Deutschland nach § 47 StrSchV vorgegebenen Grenzwertes von 0,3 mSv bleiben. Der Grenzwert aus der StrSchV wird bisher auch für Endlager zu Grunde gelegt (BMI 1983). In den Sicherheitsanforderungen ist ein risikobasiertes Schutzziel definiert, aus dem sich ein deutlich niedrigerer Grenzwert für die zulässige Strahlenexposition ableitet.

Gemäß den Sicherheitsanforderungen kann bei der Betrachtung der radiologischen Auswirkungen einer Radionuklidfreisetzung allerdings für erwartete bzw. für außergewöhnliche Entwicklungen auf Modellrechnungen zur Radionuklidausbreitung im Deckgebirge verzichtet werden, *falls aus den am Rande des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs freigesetzten radioaktiven Stoffmengen für Einzelpersonen der Bevölkerung keine effektive Dosis größer als 0,1 mSv im Kalenderjahr resultieren kann. Diese Dosis ist anhand eines für Betrachtungen zur Langzeitsicherheit anerkannten generischen Expositionsmodells zu ermitteln, für das anzunehmen ist, dass*

- *der betrachtete Mensch seinen gesamten für die Ernährung (Trinken, Tränken, Regen) notwendigen jährlichen Wasserbedarf aus einem Brunnen deckt und*

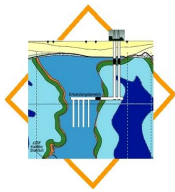


Das Sicherheits- und Nachweiskonzept

- *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.*

Dieser Indikator trägt der gestiegenen Bedeutung der Sicherheitsfunktion „Isolation“ Rechnung und dient als vereinfachter radiologischer Sicherheitsnachweis und kann insoweit als Bindeglied zwischen geologischem und radiologischem Langzeitsicherheitsnachweis verstanden werden, da für diesen Nachweis die primär geologisch begründete Ausweisung der Grenze des ewG auch radiologisch begründeten Anforderungen genügen muss.

Eine genaue Vorschrift zur Berechnung der effektiven Dosis am Rande des ewG liefern die Sicherheitsanforderungen aber nicht. Sowohl der jährliche Wasserbedarf als auch die Berücksichtigung der Verdünnung auf Trinkwasserqualität werden nicht quantifiziert.



3 Konzept für den Nachweis des sicheren Einschlusses

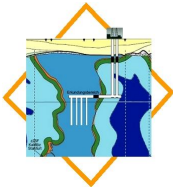
Für den Nachweis des sicheren Einschlusses ist ein Konzept vorzulegen, wie nachgewiesen wird, dass der Einschluss der Abfälle im Endlagersystem derart gelingt, dass die vorgegebenen Schutzziele eingehalten werden. Dieses Konzept muss darlegen, wie das allgemeine Sicherheitskonzept für den konkreten Standort umgesetzt wird. Dieses Nachweiskonzept wurde im Rahmen der ersten Phase von ISIBEL entwickelt (Abb. 2.1). Als Bezugspunkt diente ein Salzstock in der norddeutschen Tiefebene, dessen standortspezifische, geowissenschaftliche Merkmale entsprechend der vorhandenen Daten zum Standort Gorleben festgelegt wurden.

Das hier vorgelegte Nachweiskonzept basiert auf dem im Projekt ISIBEL erstellten Sicherheitskonzept (BUHMANN ET AL. 2008A) und besteht im Wesentlichen aus drei Bausteinen, mit denen eine Bewertung des Isolationszustandes „Sicherer Einschluss“ möglich ist:

- Integritätsnachweise für die geologische Barriere (HEUSERMANN 2007) und die Schacht- und Streckenverschlüsse (KREIENMEYER ET AL. 2008)
- Räumliche und zeitliche Ausweisung des ewG (Kapitel 3.1),
- Bestimmung von Indikatoren, die einen Nachweis erlauben, dass die Radionuklid-freisetzen aus dem ewG als geringfügig einzustufen sind (Kapitel 3.2). Dazu sind geeignete Maßstäbe für die Geringfügigkeit zu wählen.

3.1 Räumliche und zeitliche Ausweisung des ewG

Langgestreckte Salzstöcke vom Typ Gorleben (Abbildung 3.1) lassen sich in der Regel in zwei Bereiche unterteilen, die durch eine unterschiedliche Deformationsgeschichte gekennzeichnet sind. Der eine Bereich besteht im wesentlichen aus den homogenen Haliten der Staßfurt-Folge (z2). Der andere Bereich umfasst die jüngeren Schichten der Leine- und Aller-Folge (z3 und z4), mit diversen Einschaltungen von spröden Gesteinsschichten (z.B. Anhydritbänder), die im Gegensatz zu den anderen Schichten Kluftnetze aufweisen können. Im Salzstock Gorleben sind diese Anhydritbänder durch die weitergehenden Deformationen beim Salzaufstieg in einzelne Schollen zerlegt und durch das umgebende Salzgestein so gegeneinander abgeschirmt worden, dass keine weitreichenden hydraulisch wirksamen Verbindungen der Kluftnetze einzelner Schollen untereinander möglich sind (BORNEMANN ET AL. 2008). Die Mächtigkeiten dieser Anhydritschollen können mehrere Zehner Meter betragen und Lösungseinschlüsse von bis zu 1.000 m³ aufweisen (KELLER 2007).



Konzept für den Nachweis des sicheren Einschlusses

Ein Vorzug von Steinsalz ist die Tatsache, dass bei Abwesenheit von durchgehenden spröden Gesteinsschichten das Ausgangsgestein, das nicht durch Schächte und Strecken perforiert worden ist, über den gesamten Nachweiszeitraum als undurchlässig angesehen werden kann. Bei ausreichendem Sicherheitsabstand zu wasserführenden Schichten ist daher davon auszugehen, dass bei einem eventuellen Wasserzutritt zu den Einlagerungsbereichen und einer möglicherweise daraus folgenden Freisetzung von Radionukliden diese Freisetzung praktisch vollständig über die Zugangsstrecken und Schächte erfolgen wird. Es ist daher sinnvoll, den Bezugspunkt für die Bewertung des ewG entlang dieses Pfades zu setzen.

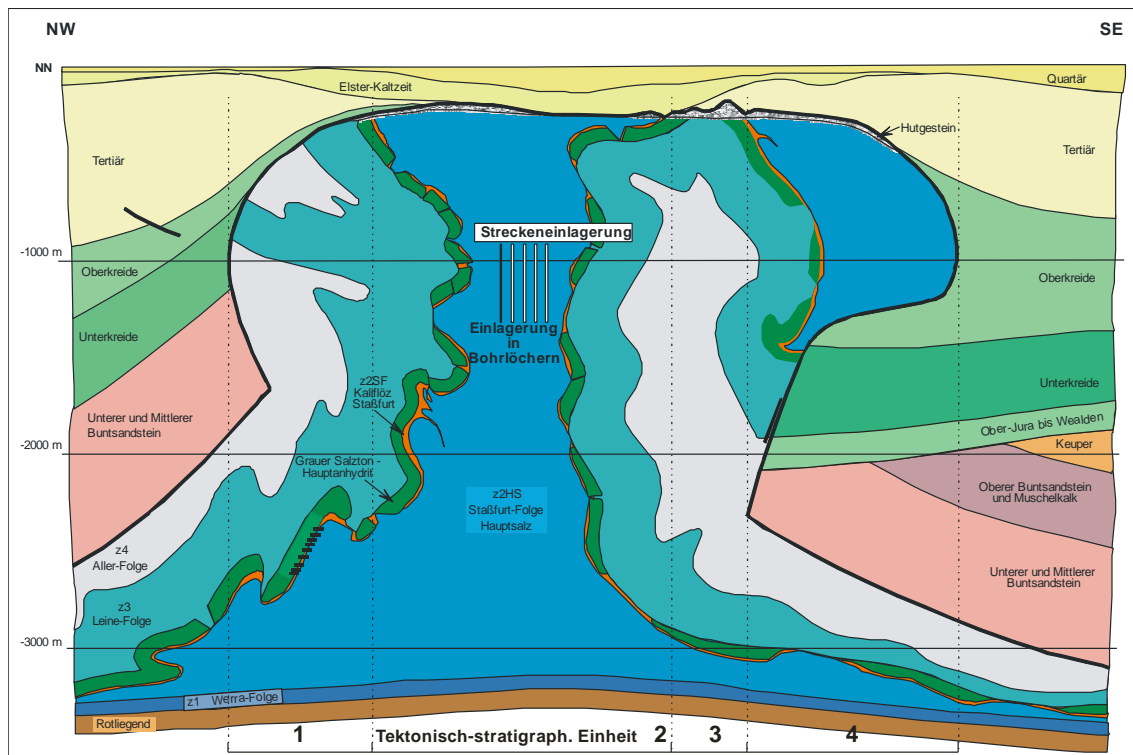
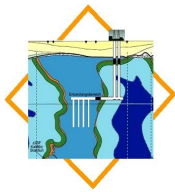


Abb. 3.1: Schematischer Schnitt durch den Salzstock Gorleben

Zur Ausweisung der räumlichen Ausdehnung eines ewG werden in Kapitel 4 zwei Möglichkeiten für seine Abgrenzung untersucht:

1. Der ewG liegt ausschließlich im Hauptsalz der Staßfurt-Folge (z2HS) und umschließt den Bereich des Endlagerbergwerks, in dem die Einlagerungsfelder angeordnet sind, und endet an der Grenze der Halite der Staßfurt-Folge (z2) zu den jüngeren, meist spröderen Salzschieben (z3 und z4). Bezugspunkt für die quantitative Bewertung des sicheren Einschlusses durch Vergleich mit Indikatorwerten ist das Ende der Zugangsstrecke, die an diesem Übergang verläuft. Im Sicherheitskonzept ist an dieser Stelle ein Streckenverschluss vorgesehen. Auf Grund der Endlagertiefe kann die vertikale Ausdehnung des ewG so gewählt werden, dass Subrosionsprozesse nicht betrachtet werden müssen.



2. Der ewG umfasst den Gebirgsbereich des Salzstockes, der durch geologische Prozesse, wie z.B. Subrosion, während des Nachweiszeitraums nicht beeinträchtigt wird. Er umschließt somit alle Teile des Endlagerbergwerks in diesem Bereich.

Der erste ewG (im folgenden auch mit ewG I bezeichnet) hat den Vorteil, nur auf das Hauptsalz der Staßfurt-Folge beschränkt zu sein, so dass dementsprechend die Integritätsnachweise einfacher zu führen sind. Dies gilt vor allem für Salzstöcke vom Typ Gorleben, bei denen diese Schicht aus sehr homogenem und sehr trockenem Salzgestein besteht. Die zweite Abmessung (ewG II) geht dagegen über mehrere stratigraphische Einheiten, der Integritätsnachweis für die geologische Barriere ist daher komplizierter. Zudem sind für diesen ewG die während des Nachweiszeitraumes ablaufenden Subrosions- oder Erosionsprozessen zu berücksichtigen.

3.2 Indikatoren zum Nachweis des sicheren Einschlusses

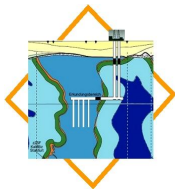
Nach der Ausweisung des ewG müssen geeignete Indikatoren entwickelt werden, mit denen der Nachweis erbracht werden kann, dass ein sicherer Einschluss innerhalb des ausgewiesenen ewG möglich ist. In diesem Bericht werden dazu sowohl qualitative (Kapitel 3.2.1) als auch quantitative Indikatoren (Kapitel 3.2.2 und 3.2.3) eingesetzt.

Qualitative Indikatoren spielen vor allem bei der Bewertung der Transportprozesse eine wichtige Rolle. In den Sicherheitsanforderungen (BMU 2009) wird beispielsweise für die Integrität des ewG gefordert, dass *ggf. im einschlusswirksamen Gebirgsbereich vorhandenes Porenwasser nicht am hydrogeologischen Kreislauf im Sinne des Wasserrechts außerhalb des ewG teilnimmt. Dies gilt als erfüllt, wenn die Ausbreitung von Schadstoffen im einschlusswirksamen Gebirgsbereich durch advective Transportprozesse allenfalls vergleichbar zur Ausbreitung durch diffusive Transportprozesse erfolgt.*

Quellen für möglicherweise geeignete quantitative Indikatoren für unterschiedliche Wirtsgesteinsformationen finden sich z.B. in BALTES ET AL. 2007, BECKER ET AL. 2003 UND WOLF ET AL. 2008. Generell lassen sich quantitative Indikatoren in drei Kategorien einteilen:

1. Indikatoren, deren Referenzwert sich auf ein radiologisch begründetes Schutzziel zurückführen lassen (Typ 1),
2. Indikatoren, die einen Vergleich zu natürlich vorhandenen Elementströmen oder -konzentrationen zulassen (Typ 2),
3. Indikatoren, die sich auf das eingelagerte Inventar beziehen und somit das relative Isolationspotenzial darstellen (Typ 3).

Für den sicheren Einschluss ist diese Auflistung auch als Rangfolge zu betrachten, d.h. ein Indikator vom Typ 1 ist höher zu bewerten als vom Typ 2 usw. Im Folgenden sollen



jeweils ein Indikator vom Typ 1 (Kapitel 3.2.2) und ein Indikator vom Typ 3 (Kapitel 3.2.3) vorgestellt und in den Modellrechnungen verwendet werden. Indikatoren vom Typ 2 werden in diesem Bericht nicht eingesetzt, da bei solchen Indikatoren die Ableitung geeigneter Referenzwerte problematisch ist. In diesem Zusammenhang wären z.B. Festlegungen zu treffen, ob die Referenzwerte lokal, regional oder deutschlandweit zu ermitteln sind, und die Frage zu klären, ob Daten aus Felduntersuchungen überhaupt in ausreichendem Maße zur Verfügung stehen. Die Ableitung solcher Referenzwerte ist im Rahmen dieses Berichtes nicht vorgesehen.

Die eingesetzten Indikatoren berücksichtigen nur den Transport von Radionukliden in Lösungen, da über diesen Pfad potenziell die größte Menge an Radionukliden freigesetzt werden kann. Der Radionuklidtransport auf dem Gaspfad wird bei der Bewertung in diesem Bericht nicht berücksichtigt. Der Test der hier entwickelten Methodik zum Nachweis des sicheren Einschlusses ist davon aber nicht betroffen. Die Ereignisabläufe bei der Gasfreisetzung werden auch deshalb nicht berücksichtigt, da diese zurzeit noch nicht ausreichend untersucht sind. Das Instrumentarium für eine solche Bewertung ist z.T. noch nicht vorhanden bzw. noch nicht ausreichend getestet worden. Entsprechende Untersuchungen bilden einen Schwerpunkt im Nachfolgeprojekt ISIBEL-II.

3.2.1 Bewertung der Transportprozesse

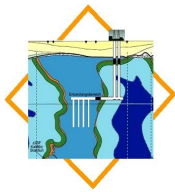
Dieser qualitative Indikator greift einige Aspekte auf, die für die Bewertung des sicheren Einschlusses von zentraler Bedeutung sind: Er soll aufzeigen,

- wie viel Lösung sich im Endlager bewegt,
- ob die eingelagerten Abfälle mit Lösungen in Kontakt kommen,
- ob eine Freisetzung von Radionukliden auf dem Lösungspfad stattfindet und
- welche Transportprozesse dabei eine Rolle spielen.

Kommt es nicht zu einem Kontakt der Abfälle mit Lösungen und einer anschließenden Mobilisierung von Radionukliden aus den Abfällen ist der sichere Einschluss gegeben und eine weitere Bewertung mit Hilfe von quantitativen Indikatoren ist nicht nötig. Daher sollte dieser Indikator immer vorab herangezogen werden.

Zur Bewertung der Transportprozesse auf dem Lösungspfad wird vorgeschlagen, folgende Angaben zusammenzutragen:

1. Am Schacht ausgepresste Lösungsmenge nach 10^6 a (Nachweiszeitraum) [m^3]
2. Beginn der Auspressung [a]
3. Beginn der Radionuklidmobilisierung [a]



4. Beginn der Freisetzung von Radionukliden aus den Einlagerungsbereichen [a]
5. Ende des Konvergenzprozesses [a]
6. Art des dominierenden Transportprozesses (Diffusion / Advektion)

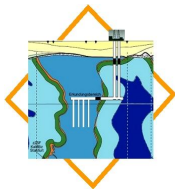
Die ersten beiden Angaben sind als Anhaltspunkte gedacht, in welcher Größenordnung und zu welchem Zeitpunkt sich Lösungen im Endlager bewegen. Der dritte Punkt beschreibt, ob überhaupt Lösung zu den Einlagerungsbereichen vordringt. Werden keine Radionuklide innerhalb des Nachweiszeitraumes mobilisiert, kann auch kein Radionuklidtransport stattfinden. Findet eine Mobilisierung statt, kann es je nach Randbedingung des untersuchten Rechenfalls längere Zeit dauern, bis der Einlagerungsbereich mit Lösung gefüllt ist. Erst dann ist ein Transport von Radionukliden aus dem Einlagerungsbereich in benachbarte Strecken möglich. Dieser Zeitpunkt wird mit Punkt 4 festgehalten.

Ein advektiver Transport findet in einem lösungserfüllten Einlagerungsbereich nur statt, wenn der Konvergenzprozess noch nicht abgeschlossen ist. Ist das Ende des Konvergenzprozesses schon erreicht, können nur noch diffusive Transportprozesse ablaufen. Da der Konvergenzprozess in verschiedenen Bereichen des Grubengebäudes zu unterschiedlichen Zeitpunkten abgeschlossen ist, ist eine rein quantitative Bewertung der Transportprozesse nur mit Hilfe von vielen Angaben zu jedem betrachteten Bereich des Grubengebäudes möglich. Es wird daher vorgeschlagen, die quantitativen Angaben zu den Transportprozessen auf die hier vorgeschlagenen Werte zu begrenzen und eine zusätzliche qualitative Aussage zur Bewertung der Transportprozesse vorzunehmen. Dies geschieht durch Punkt 6, der Angabe der Art des dominierenden Transportprozesses. Damit soll der Transportprozess angegeben werden, der maßgeblich für die Freisetzung von Radionukliden aus dem ewG verantwortlich ist.

3.2.2 Radiologischer Geringfügigkeitsindex (RGI)

Wegen der primären Zielsetzung der Endlagerung, d.h. des sicheren Einschlusses der Radionuklide, erscheint es konsequent, einen quantitativen Indikator zur Bewertung des Einschlussvermögens des ewG zu verwenden, bei dem die unterschiedlichen radiologischen Auswirkungen der verschiedenen Radionuklide berücksichtigt werden. In den Sicherheitsanforderungen wird daher als ein Indikator des Typs 1 die *effektive Dosis am Rand des ewG* benannt. Bei der Verwendung dieses Indikators treten allerdings folgende Schwierigkeiten auf:

1. Die Berechnung dieses Indikators basiert auf einem fiktiven Nutzungsszenario, insofern ist die Bezeichnung des Indikators als effektive Dosis irreführend (RSK 2008). Andere Bezeichnungen, z.B. Radiotoxizität im Grundwasser, können ebenfalls nicht verwendet werden, da die Berechnungsvorschrift des Indikators



(siehe Kapitel 2.3) explizit von den Dosiskonversionsfaktoren ausgeht und nicht von Ingestionsdosiskoeffizienten.

2. Bisher gibt es unterschiedliche Vorschläge zur Berechnung des Indikators. Nach BALTES ET AL. 2007 wird die Freisetzung auf den jährlichen Wasserbedarf für eine kritische Gruppe von 30 Personen (Pro-Kopf-Grundwasserverbrauch von 500 m³/a) bezogen. In den Sicherheitsanforderungen wird dieser Indikator auf eine Person bezogen. Es fehlt hier allerdings eine quantitative Angabe für den anzusetzenden Pro-Kopf-Verbrauch. Stattdessen soll bei der Berechnung die Verdünnung des Brunnenwassers auf Trinkwasserqualität berücksichtigt werden.

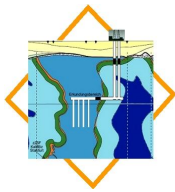
In diesem Bericht sollen die Vorgaben aus den Sicherheitsanforderungen weitgehend berücksichtigt werden. Um Schwierigkeiten mit den Begrifflichkeiten zu vermeiden, wird aber als Indikator des Typs 1 ein abgeleiteter Wert verwendet, der als radiologischer Geringfügigkeitsindex (RGI) bezeichnet wird. Der RGI setzt das Ausmaß der Freisetzung von Radionukliden aus dem ewG in Relation zu einem Maximalwert, der noch als geringfügig betrachtet wird. Der RGI ist somit eine dimensionslose Zahl.

Um die unterschiedlichen radiologischen Wirkungen der Radionuklide zusammenzufassen, erfolgt die Bewertung der Radionuklidfreisetzungen mit Hilfe der Dosiskonversionsfaktoren (DKF), die auf Basis der AVV zu § 47 StrlSchV berechnet werden, und unter Berücksichtigung einer Aufnahme des gesamten jährlichen Radionuklidstroms aus dem ewG in einer Wassermenge von 500 m³ pro Jahr. Als Bemessungsgrenze für die Geringfügigkeit der Radionuklidfreisetzungen aus dem ewG dient ein Wert von 0,1 mSv/a. Dieser Wert wird auch in den Sicherheitsanforderungen zur Beurteilung der „effektiven Dosis“ am Rande des ewG herangezogen. Der Wert entspricht einem Bruchteil der natürlichen Strahlenexposition von etwa 2 bis 3 mSv/a. RGI-Werte unter 1 belegen somit die Geringfügigkeit von Radionuklidfreisetzungen aus dem ewG.

Die Berechnung des Indikators RGI erfolgt aus dem jährlichen Radionuklidstrom S [Bq/a] des Bereiches (Modellsegments) des Endlagers, der den Abschluss des ewG darstellt. Dieser Radionuklidstrom wird auf eine angenommene Wassermenge W [m³/a] verteilt (hier 500 m³/a). Mit Hilfe der in PRÖHL & GERING 2002 zusammengestellten Dosiskonversionsfaktoren (DKF , für eine Altersgruppe > 17 Jahre, vgl. Tabelle 3.1) und dem Kriterium K_{RGI} (hier 0,1 mSv/a) ergibt sich daraus die Berechnungsvorschrift für den Indikator RGI

$$RGI = \frac{\sum_i S_i \cdot DKF_i}{W \cdot K_{RGI}}$$

In Tabelle 3.1 sind die Radionuklide mit ihren Dosiskonversionsfaktoren aus PRÖHL & GERING 2002 aufgelistet, die in den Modellrechnungen in Kapitel 4 berücksichtigt werden. Radionuklide, die nur im Nahfeld berücksichtigt werden, sind mit * gekennzeichnet.



net. Radionuklide, die nur für die Berechnung der Strahlenexposition in der Biosphäre herangezogen werden (siehe Kapitel 4.1), sind mit ** gekennzeichnet.

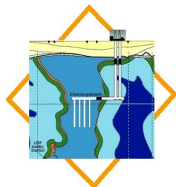
Nach den Sicherheitsanforderungen soll bei der Bewertung der Auswirkungen der Radionuklidfreisetzung berücksichtigt werden, dass die aus dem ewG austretende Lösung hochsalinar und an den Salzen der Salzminerale des Salzgesteins gesättigt ist. Für den Menschen ist diese Lösung daher auf einen Mineralgehalt zu verdünnen, der die Nutzung des Wassers als Trinkwasser zulässt. Geht man davon aus, dass die Lösung aus dem ewG an NaCl gesättigt ist, enthält sie rund 350 g/l NaCl. Da Natrium und Chlor im molaren Verhältnis 1:1 vorliegen, ist die Natriumkonzentration bei Sättigung etwa 140 g/l und die Chloridkonzentration etwa 210 g/l (c_s). Nach der Trinkwasserverordnung (TrinkwV 2001) darf Trinkwasser 250 mg/l Chlorid und 200 mg/l Natrium enthalten (c_{TVO}). Vermischt man die aus dem Grubengebäude austretende Lösung L_1 mit den für den RGI verwendeten jährlichen Wasserbedarf von $L_2 = 500 \text{ m}^3/\text{a}$ (es wird vereinfacht angenommen, dass kein Natrium und Chlorid in dieser Lösung vorhanden ist) so ergibt sich nach

$$c = \frac{c_s \cdot L_1}{L_1 + L_2}$$

eine maximal zulässige jährliche Menge, d.h. $c = c_{TVO}$, an austretender Lösung aus dem ewG von etwa $0,6 \text{ m}^3/\text{a}$, wenn man Natrium als Referenz für die Trinkwasserqualität zu Grunde legt und $0,7 \text{ m}^3/\text{a}$ bei Chlorid. Vereinfacht lässt sich sagen, dass ab Lösungsmengen größer als $1 \text{ m}^3/\text{a}$ aus dem ewG, eine Verdünnung von $500 \text{ m}^3/\text{a}$ nicht mehr ausreichen, um Trinkwasserqualität zu gewährleisten.

Bei diffusiven Freisetzungen sind die Natrium- und Chloridmengen, die den ewG verlassen, abhängig vom Konzentrationsgefälle. Des Weiteren muss für die Berechnung von Konzentrationen der Volumenstrom am Rande des ewG bekannt sein. Nur dann könnte ein Verdünnungsfaktor bestimmt werden. Das setzt jedoch eine detaillierte Kenntnis der Gegebenheiten am Standort voraus. Eine solche Darstellung ist für einen gut untersuchten Standort gegebenenfalls durchführbar, wird aber der Idee, dass es sich bei diesem Indikator um ein einfaches stilisiertes Nutzungsszenario handelt, nicht gerecht. Die Bestimmung eines Volumenstromes am Rande des ewG über den langen Nachweiszeitraum ist zudem äußerst problematisch und konterkariert die grundlegende Idee der Unabhängigkeit dieses Indikators von Gegebenheiten außerhalb des ewG.

Neben der Problematik, wie die in den Sicherheitsanforderungen (BMU 2009) aufgestellte Forderung nach Verdünnung auf Trinkwasserqualität methodisch durchzuführen ist, kommt hinzu, dass im Prinzip sehr vielseitige Forderungen zu erfüllen sind, da die TrinkwV viele gesetzliche Grenzwerte beinhaltet, die berücksichtigt werden müssten (z.B. Sulfatgehalt, elektrische Leitfähigkeit, etc.). Um diese Probleme zu umgehen, wird der Forderung nach Verdünnung auf Trinkwasserqualität bei dem hier vorgestellten In-



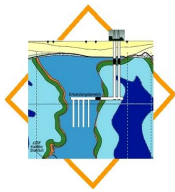
Konzept für den Nachweis des sicheren Einschlusses

dikator RGI nicht gefolgt. Stattdessen wird an dem Wert von $500 \text{ m}^3/\text{a}$ festgehalten, da dadurch

- die Berechnungsvorschrift anschaulich und das stilisierte Szenario für diesen Indikator nachvollziehbar bleibt,
- die Berechnung nicht auf Gegebenheiten außerhalb des ewG angewiesen ist,
- keine Fallunterscheidung zwischen verschiedenen Transportprozessen getroffen werden muss und
- der Indikator auf beliebige Endlagersysteme angewendet werden kann.

Tab. 3.1: Dosiskonversionsfaktoren (DKF) $[(\text{Sv/a})/(\text{Bq/m}^3)]$ aus PRÖHL & GERING 2002 (*nur im Nahfeld berücksichtigt, **nur für die Berechnung der Strahlenexposition in der Biosphäre)

Spalt- und Aktivierungsprodukte		Thorium- und Neptunium-Zerfallsreihe		Uran- und Actinium-Zerfallsreihe	
Nuklid	DKF	Nuklid	DKF	Nuklid	DKF
C-14	$4,6 \cdot 10^{-8}$	Pu-244*	$3,0 \cdot 10^{-6}$	Cm-246*	$8,0 \cdot 10^{-7}$
Cl-36	$3,5 \cdot 10^{-8}$	Cm-244	$3,8 \cdot 10^{-7}$	Pu-242	$9,4 \cdot 10^{-7}$
Co-60*	$3,9 \cdot 10^{-6}$	Pu-240	$9,6 \cdot 10^{-7}$	Am-242m	$7,6 \cdot 10^{-7}$
Ni-59	$4,9 \cdot 10^{-9}$	U-236	$5,6 \cdot 10^{-7}$	U-238	$7,1 \cdot 10^{-7}$
Ni-63	$1,1 \cdot 10^{-9}$	Th-232	$1,1 \cdot 10^{-4}$	Pu-238	$7,5 \cdot 10^{-7}$
Se-79	$3,4 \cdot 10^{-7}$	Ra-228**	$2,4 \cdot 10^{-6}$	Th-234**	$4,8 \cdot 10^{-9}$
Sr-90	$1,8 \cdot 10^{-7}$	U-232	$5,4 \cdot 10^{-6}$	U-234	$1,4 \cdot 10^{-6}$
Zr-93	$3,7 \cdot 10^{-8}$	Th-228**	$1,3 \cdot 10^{-6}$	Th-230	$3,7 \cdot 10^{-5}$
Mo-93	$3,2 \cdot 10^{-7}$	Cm-245	$1,4 \cdot 10^{-6}$	Ra-226	$3,0 \cdot 10^{-5}$
Nb-94	$3,1 \cdot 10^{-6}$	Pu-241	$1,8 \cdot 10^{-8}$	Pb-210**	$2,3 \cdot 10^{-6}$
Tc-99	$8,8 \cdot 10^{-9}$	Am-241	$8,0 \cdot 10^{-7}$	Po-210**	$4,9 \cdot 10^{-6}$
Pd-107*	$1,9 \cdot 10^{-9}$	Np-237	$4,7 \cdot 10^{-6}$	Am-243	$2,0 \cdot 10^{-6}$
Sn-126	$1,6 \cdot 10^{-5}$	U-233	$3,9 \cdot 10^{-6}$	Pu-239	$9,8 \cdot 10^{-7}$
I-129	$5,6 \cdot 10^{-7}$	Pa-233**	$8,8 \cdot 10^{-9}$	U-235	$3,3 \cdot 10^{-6}$
Cs-135	$5,7 \cdot 10^{-8}$	Th-229	$1,7 \cdot 10^{-5}$	Pa-231	$4,0 \cdot 10^{-5}$
Cs-137	$9,5 \cdot 10^{-7}$	Ra-225**	$1,1 \cdot 10^{-7}$	Ac-227**	$1,0 \cdot 10^{-5}$
Sm-151	$3,2 \cdot 10^{-10}$	Ac-225**	$3,7 \cdot 10^{-8}$	Th-227**	$1,9 \cdot 10^{-8}$
				Ra-223**	$1,1 \cdot 10^{-7}$



Man sollte für einen konkreten Standort aber zeigen, dass der Wert $500 \text{ m}^3/\text{a}$ geeignet ist, Trinkwasserqualität zu gewährleisten. Dass ist für advective Freisetzungen einfach, erfordert bei der Bewertung diffusiver Freisetzungen einen größeren Aufwand. Nach einer solchen Plausibilitätsuntersuchung kann der Wert von $500 \text{ m}^3/\text{a}$ gegebenenfalls angepasst werden. Es sollte bei der Berechnung aber immer nur ein konstanter Wert eingesetzt werden.

3.2.3 Anteil der über den Nachweiszeitraum kumulierten freigesetzten Stoffmenge (KFS)

Dieser quantitative Indikator vom Typ 3 gibt Aufschluss über die Isolationswirkung des ewG, indem dargestellt wird, welcher Anteil der eingelagerten Radionuklidmenge den ewG verlässt. Als ein Maß für den sicheren Einschluss des Endlagers wird der im Nachweiszeitraum aus dem ewG freigesetzte Anteil der eingelagerten Radionuklide bezogen auf die gesamte eingelagerte Radionuklidmenge herangezogen. Die im Nachweiszeitraum im ewG zurückgehaltene Schadstoffmenge bezogen auf die eingelagerte anfängliche Schadstoffmenge muss größer als 99,99 mol-% sein oder, anders ausgedrückt, die Freisetzung darf nicht mehr als 0,01 mol-% betragen (BALTES ET AL. 2007).

Der Indikator zeigt anschaulich das Isolationspotential des betrachteten Endlagers. Aus der prozentualen Angabe ergibt sich aber, dass die absolute Größe der Radionuklidfreisetzung aus einem Endlager konzeptspezifisch ist, da sie vom eingelagerten Inventar abhängt. Dieser Indikator besitzt daher keine direkte Sicherheitsaussage und eine plausible Begründung des Bewertungsmaßstabes von 99,99 mol% ist nicht möglich.

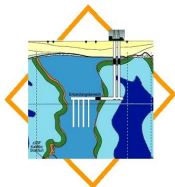
Berechnet wird der Indikator aus dem Radionuklidstrom S [Bq/a], der mit Hilfe von nuklidspezifischen Konversionsfaktoren C_i [mol/Bq] in einen molaren Stoffstrom umgerechnet wird. Der molare Stoffstrom wird über den Nachweiszeitraum T (10^6 a) aufsummiert.

$$KFS = \frac{\int_0^T \sum_i S_i \cdot C_i}{\sum_i A_{i,t=0} \cdot C_i}$$

Die Umrechnung von Bq nach mol erfolgt dabei durch die Konversionsfaktoren C_i

$$C_i = \frac{T_{1/2}}{\ln 2 \cdot N_A}$$

mit der Halbwertszeit $T_{1/2}$ [s] des betrachteten Radionuklids i und der Avogadro-Konstante $N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$.



Konzept für den Nachweis des sicheren Einschlusses

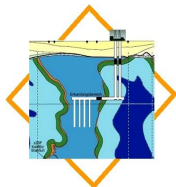
Für die Berechnungen der Indikatoren für ein HAW-Endlager in Salzgestein wurde auf das Inventar aus BUHMANN ET AL. 2008B zurückgegriffen. Berücksichtigt wurden

- 6.960 BSK3
- 3.225 HAW-Kokillen und
- 7.455 CSD-C und CSD-B.

Das entspricht dem gesamten Inventar, das gemäß der Vereinbarung zwischen der Bundesregierung und den EVUs vom Oktober 2000 für ein HAW-Endlager in Deutschland erwartet werden kann (BOLLINGERFEHR ET AL. 2008). Eine Beschreibung des berücksichtigten Einlagerungskonzeptes erfolgt in Kapitel 4.1; die Abmessungen der Abfallgebinde sind in Tabelle 4.2 aufgelistet.

Tab. 3.2: Radionuklidinventare pro Gebinde, Gesamtinventar und Halbwertszeiten (Spalt- und Aktivierungsprodukte)

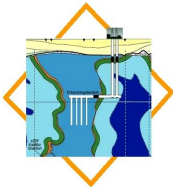
Nuklid	$T_{1/2}$ [a]	BSK [Bq/Geb.]	HAW [Bq/Geb.]	CSD [Bq/Geb.]	Total [Bq]	Total [mol]
C-14	$5,730 \cdot 10^3$	$7,37 \cdot 10^{10}$	-	$1,4 \cdot 10^{10}$	$6,17 \cdot 10^{14}$	$2,67 \cdot 10^2$
Cl-36	$3,000 \cdot 10^5$	$9,77 \cdot 10^8$	-	$8,50 \cdot 10^{11}$	$6,80 \cdot 10^{12}$	$1,54 \cdot 10^2$
Co-60	$5,272 \cdot 10^0$	$1,63 \cdot 10^{15}$	$3,32 \cdot 10^{13}$	$7,71 \cdot 10^{13}$	$1,21 \cdot 10^{19}$	$4,81 \cdot 10^3$
Ni-59	$7,500 \cdot 10^4$	$8,14 \cdot 10^{11}$	$7,00 \cdot 10^7$	-	$5,66 \cdot 10^{15}$	$3,21 \cdot 10^4$
Ni-63	$1,000 \cdot 10^2$	$1,16 \cdot 10^{14}$	$9,50 \cdot 10^9$	$2,71 \cdot 10^{13}$	$1,01 \cdot 10^{18}$	$7,61 \cdot 10^3$
Se-79	$1,100 \cdot 10^6$	$2,98 \cdot 10^{10}$	$1,72 \cdot 10^{10}$	$5,51 \cdot 10^7$	$2,63 \cdot 10^{14}$	$2,19 \cdot 10^4$
Sr-90	$2,864 \cdot 10^1$	$5,99 \cdot 10^{15}$	$3,23 \cdot 10^{15}$	$1,40 \cdot 10^{13}$	$5,22 \cdot 10^{19}$	$1,13 \cdot 10^5$
Zr-93	$1,500 \cdot 10^6$	$1,58 \cdot 10^{11}$	$8,92 \cdot 10^{10}$	$8,60 \cdot 10^9$	$1,45 \cdot 10^{15}$	$1,65 \cdot 10^5$
Nb-94	$2,000 \cdot 10^4$	$1,36 \cdot 10^{11}$	$8,18 \cdot 10^6$	-	$9,47 \cdot 10^{14}$	$1,43 \cdot 10^3$
Mo-93	$3,500 \cdot 10^3$	$6,95 \cdot 10^9$	$6,47 \cdot 10^6$	-	$4,84 \cdot 10^{13}$	$1,28 \cdot 10^1$
Tc-99	$2,100 \cdot 10^5$	$1,04 \cdot 10^{12}$	$6,19 \cdot 10^{11}$	$2,31 \cdot 10^9$	$9,22 \cdot 10^{15}$	$1,46 \cdot 10^5$
Pd-107	$6,500 \cdot 10^6$	$8,33 \cdot 10^9$	$4,65 \cdot 10^9$	-	$7,30 \cdot 10^{13}$	$3,59 \cdot 10^4$
Sn-126	$2,345 \cdot 10^5$	$4,47 \cdot 10^{10}$	$2,43 \cdot 10^{10}$	$1,51 \cdot 10^6$	$3,89 \cdot 10^{14}$	$6,90 \cdot 10^3$
I-129	$1,570 \cdot 10^7$	$2,44 \cdot 10^9$	$1,65 \cdot 10^4$	$5,31 \cdot 10^6$	$1,70 \cdot 10^{13}$	$2,02 \cdot 10^4$
Cs-135	$2,000 \cdot 10^6$	$2,45 \cdot 10^{10}$	$1,62 \cdot 10^{10}$	$7,11 \cdot 10^7$	$2,23 \cdot 10^{14}$	$3,37 \cdot 10^4$
Cs-137	$3,017 \cdot 10^1$	$8,60 \cdot 10^{15}$	$4,67 \cdot 10^{15}$	$1,51 \cdot 10^{13}$	$7,50 \cdot 10^{19}$	$1,71 \cdot 10^5$
Sm-151	$9,300 \cdot 10^1$	$2,00 \cdot 10^{13}$	$1,53 \cdot 10^{13}$	$6,00 \cdot 10^{10}$	$1,89 \cdot 10^{17}$	$1,33 \cdot 10^3$



Tab. 3.3: Radionuklidinventare pro Gebäude, Gesamtinventar und Halbwertszeiten (Zerfallsreihen)

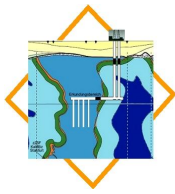
Nuklid	$T_{1/2}$ [a]	BSK [Bq/Geb.]	HAW [Bq/Geb.]	CSD [Bq/Geb.]	Gesamt [Bq]	Gesamt [mol]
Thorium-Zerfallsreihe						
Pu-244	$8,000 \cdot 10^7$	$6,95 \cdot 10^4$	$1,12 \cdot 10^2$	-	$4,84 \cdot 10^8$	$2,93 \cdot 10^0$
Cm-244	$1,810 \cdot 10^1$	$3,46 \cdot 10^{14}$	$1,13 \cdot 10^{14}$	$9,51 \cdot 10^{10}$	$2,77 \cdot 10^{18}$	$3,79 \cdot 10^3$
Pu-240	$6,563 \cdot 10^3$	$3,83 \cdot 10^{13}$	$7,61 \cdot 10^{10}$	$5,20 \cdot 10^{10}$	$2,67 \cdot 10^{17}$	$1,33 \cdot 10^5$
U-236	$2,342 \cdot 10^7$	$1,91 \cdot 10^{10}$	$6,63 \cdot 10^7$	-	$1,33 \cdot 10^{14}$	$2,35 \cdot 10^5$
Th-232	$1,405 \cdot 10^{10}$	$2,10 \cdot 10^0$	$5,65 \cdot 10^0$	-	$3,28 \cdot 10^4$	$3,49 \cdot 10^{-2}$
U-232	$6,890 \cdot 10^1$	$1,24 \cdot 10^9$	$1,11 \cdot 10^7$	-	$8,65 \cdot 10^{12}$	$3,76 \cdot 10^{-3}$
Neptunium-Zerfallsreihe						
Cm-245	$8,500 \cdot 10^3$	$2,72 \cdot 10^{10}$	$1,11 \cdot 10^{10}$	-	$2,25 \cdot 10^{14}$	$1,45 \cdot 10^2$
Pu-241	$1,435 \cdot 10^1$	$9,27 \cdot 10^{15}$	$1,27 \cdot 10^{13}$	$1,00 \cdot 10^{13}$	$6,47 \cdot 10^{19}$	$7,01 \cdot 10^4$
Am-241	$4,322 \cdot 10^2$	$1,03 \cdot 10^{13}$	$6,20 \cdot 10^{13}$	$3,51 \cdot 10^{10}$	$2,72 \cdot 10^{17}$	$8,89 \cdot 10^3$
Np-237	$2,144 \cdot 10^6$	$2,63 \cdot 10^{10}$	$1,66 \cdot 10^{10}$	$7,20 \cdot 10^6$	$2,37 \cdot 10^{14}$	$3,83 \cdot 10^4$
U-233	$1,592 \cdot 10^5$	$4,12 \cdot 10^6$	$1,83 \cdot 10^4$	-	$2,87 \cdot 10^{10}$	$3,46 \cdot 10^{-1}$
Th-229	$7,880 \cdot 10^3$	$1,27 \cdot 10^4$	$6,63 \cdot 10^3$	-	$9,08 \cdot 10^8$	$5,41 \cdot 10^{-4}$
Uran-Zerfallsreihe						
Cm-246	$4,730 \cdot 10^3$	$6,81 \cdot 10^{10}$	$2,27 \cdot 10^{10}$	-	$5,47 \cdot 10^{14}$	$1,96 \cdot 10^2$
Pu-242	$3,750 \cdot 10^5$	$1,84 \cdot 10^{11}$	$3,08 \cdot 10^8$	$2,80 \cdot 10^8$	$1,29 \cdot 10^{15}$	$3,64 \cdot 10^4$
Am-242	$1,410 \cdot 10^2$	$3,06 \cdot 10^{11}$	$1,55 \cdot 10^{11}$	-	$2,63 \cdot 10^{15}$	$2,80 \cdot 10^1$
U-238	$4,468 \cdot 10^9$	$1,86 \cdot 10^{10}$	$6,67 \cdot 10^7$	-	$1,30 \cdot 10^{14}$	$4,37 \cdot 10^7$
Pu-238	$8,774 \cdot 10^1$	$2,61 \cdot 10^{14}$	$4,28 \cdot 10^{11}$	$4,71 \cdot 10^{11}$	$1,82 \cdot 10^{18}$	$1,21 \cdot 10^4$
U-234	$2,455 \cdot 10^5$	$4,97 \cdot 10^{10}$	$2,10 \cdot 10^8$	-	$3,46 \cdot 10^{14}$	$6,43 \cdot 10^3$
Th-230	$7,540 \cdot 10^4$	$9,61 \cdot 10^5$	$3,17 \cdot 10^6$	-	$1,69 \cdot 10^{10}$	$9,63 \cdot 10^{-2}$
Ra-226	$1,600 \cdot 10^3$	$1,27 \cdot 10^3$	$6,25 \cdot 10^3$	-	$2,90 \cdot 10^7$	$3,50 \cdot 10^{-6}$
Actinium-Zerfallsreihe						
Am-243	$7,370 \cdot 10^3$	$2,13 \cdot 10^{12}$	$1,05 \cdot 10^{12}$	$3,51 \cdot 10^8$	$1,82 \cdot 10^{16}$	$1,02 \cdot 10^4$
Pu-239	$2,411 \cdot 10^4$	$2,10 \cdot 10^{13}$	$4,54 \cdot 10^{10}$	$3,00 \cdot 10^{10}$	$1,47 \cdot 10^{17}$	$2,67 \cdot 10^5$
U-235	$7,038 \cdot 10^8$	$7,77 \cdot 10^8$	$3,51 \cdot 10^6$	-	$5,42 \cdot 10^{12}$	$2,88 \cdot 10^5$
Pa-231	$3,276 \cdot 10^4$	$1,98 \cdot 10^6$	$1,22 \cdot 10^6$	-	$1,78 \cdot 10^{10}$	$4,40 \cdot 10^{-2}$

Das Gesamtinventar beträgt $2,12 \cdot 10^{20}$ Bq bzw. $4,56 \cdot 10^7$ mol. Aus den Anforderungen in BALTES ET AL. 2007 ergäbe sich damit eine maximal zulässige Freisetzung von ca. 4.500 mol über den Nachweiszeitraum. Da die Ableitung eines Bewertungsmaßstabes aber nicht plausibel belegt werden kann, wird hier auf einen Vergleich mit einem solchen Maßstab verzichtet.



Konzept für den Nachweis des sicheren Einschlusses

Sehr anschaulich ist die Darstellung des zeitlichen Verlaufs der kumulierten freigesetzten Menge. Diese Art der Darstellung wird deshalb in diesem Bericht eingesetzt. Des Weiteren wird auch die kumulierte freigesetzte Radionuklidmenge, die die Geosphäre (d.h. den Aquifer) verlässt, dargestellt. Der Indikator kann auf diese Weise die Funktionsweise einzelner Kompartimente des Endlagersystems darstellen.



4 Bewertung des sicheren Einschlusses

Mit den drei vorgestellten Indikatoren soll in diesem Kapitel beispielhaft eine Bewertung des sicheren Einschlusses für ein Endlagersystem in Salzgestein durchgeführt werden. Zunächst wird das Endlagermodell vorgestellt, das das im Projekt ISIBEL erarbeitete Endlager- und Sicherheitskonzept vereinfacht repräsentiert. Das Endlagermodell dient dazu, eventuelle Freisetzungen über den Lösungspfad für die beiden definierten Abgrenzungen des ewG aus Kapitel 3.1 zu berechnen. Für die Modellberechnungen wurde wie in der ersten Phase von ISIBEL das Programmpaket EMOS (BUHMANN 1999) eingesetzt. Dieses Programm wurde in der ersten Phase des Projektes ISIBEL ausführlich getestet und analysiert (BUHMANN ET AL. 2008B).

4.1 Das hydraulische Endlagermodell

Das hydraulische Endlagermodell basiert auf dem Modell und den zugrundeliegenden Überlegungen aus BUHMANN ET AL. 2008B. Im Unterschied zu diesem Modell wurde hier auf eine vernetzte Grubengebäudestruktur verzichtet, um an einem einzigen Streckenverschluss die (Radionuklid-) Ströme ermitteln zu können.

Des Weiteren wurden folgende hydraulische Vereinfachungen bei der Erstellung des Modells gemacht:

- Es wird kein Zweiphasenfluss im Endlagersystem berücksichtigt. Ein Zweiphasenfluss spielt sowohl beim Zulauf von Lösung in das Grubengebäude als auch bei der Berechnung des Transports von gegebenenfalls freigesetzten Radionukliden eine Rolle.
- Gasbildende Prozesse werden im Modell nicht berücksichtigt.
- Es wird bei der Modellierung der Konvergenz bzw. der Versatzkompaktion nicht unterschieden, ob der entsprechende Porenraum gesättigt ist oder nicht.

Es ist noch zu prüfen, inwieweit die Annahme hinsichtlich der Gase im Endlagersystem Einfluss auf die Ergebnisse nehmen (BUHMANN ET AL. 2008B). Die Untersuchung des Einflusses der Gase und der Gasbildung auf die hydraulischen Prozesse im Endlager bildet einen Arbeitsschwerpunkt im FuE-Vorhaben ISIBEL-II (FKZ 02E10719). Frühere Untersuchungen, z.B. NOSECK ET AL. 2005, zeigen, dass die hier getroffenen hydraulischen Vereinfachungen Einfluss auf die berechneten Ergebnisse haben. Zum Testen einer Methodik zum Nachweis des sicheren Einschlusses ist das hier verwendete hydraulische Modell aber ausreichend.

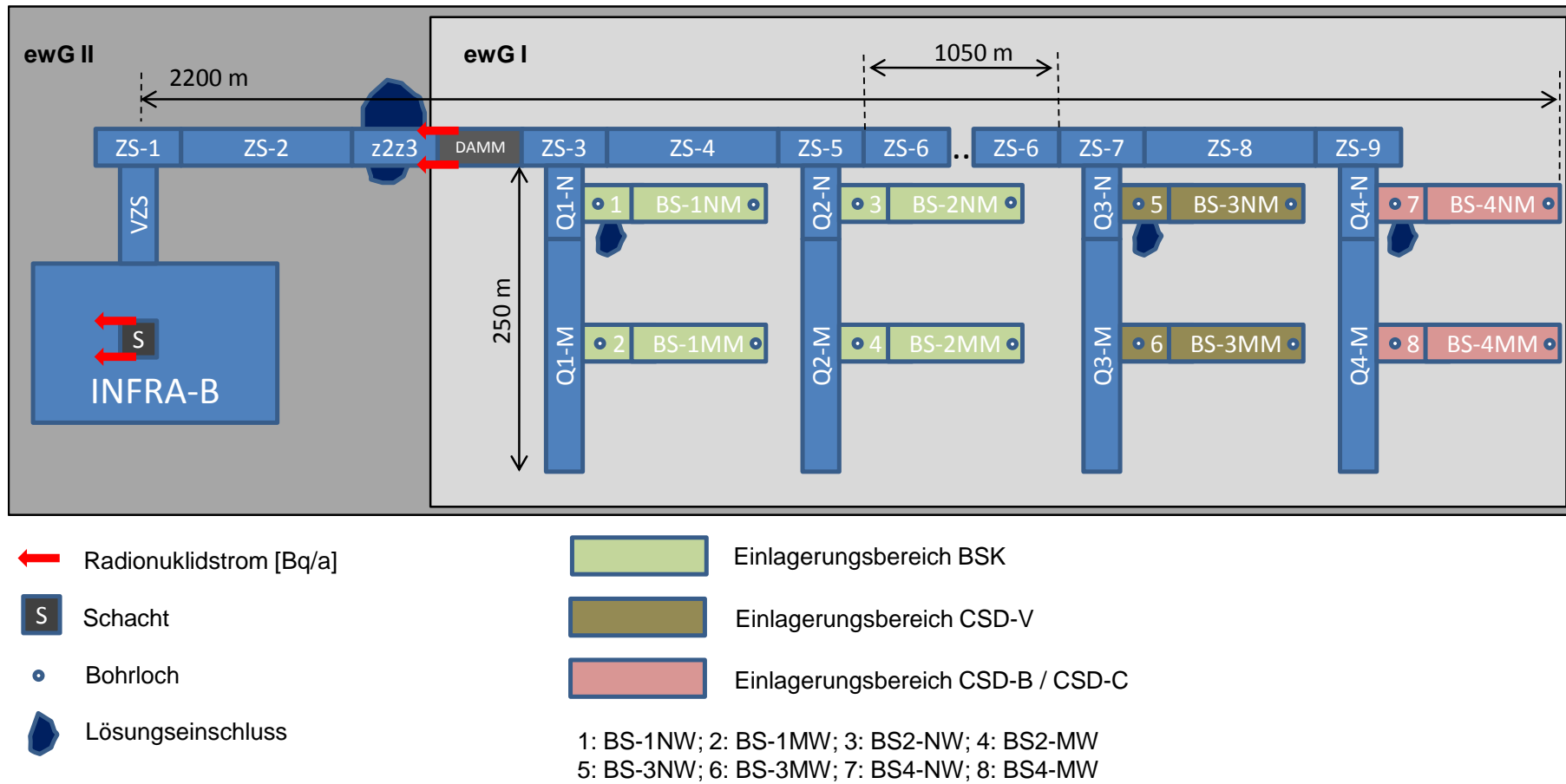
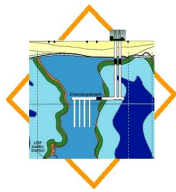


Abb. 4.1: Schematische Struktur des Grubengebäudes: BS: Beschickungsstrecke, Q: Querschlag, ZS: Zugangsstrecke. Die Benennung der Bohrlöcher ist im Text erklärt, die grauen Bereiche stellen zweidimensionale Schnitte durch den ewG dar.



Eine weitere Änderung gegenüber dem Modell aus BUHMANN ET AL. 2008B in diesen Untersuchungen ist die Erweiterung des Grubengebäudes dahingehend, dass das gesamte erwartete Inventar für ein HAW-Endlager in Deutschland untergebracht werden kann (Kapitel 3.2.2).

Abbildung 4.1 zeigt die verwendete Struktur des Grubengebäudes. Dargestellt sind die im Modell verwendeten Segmente. Aus Gründen der Übersichtlichkeit ist diese Darstellung nicht maßstabsgetreu.

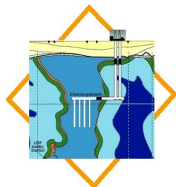
Für die Berechnung der Indikatoren an den beiden unterschiedlichen Abgrenzungen des ewG werden die Radionuklid- und Flüssigkeitsströme aus dem Schacht (Segment S) bzw. aus dem Streckenverschluss (Segment DAMM) betrachtet. Bezugspunkt für den ewG I ist der im Sicherheitskonzept an diesem Übergang vorhandene Streckenverschluss. Beim ewG II ist der Bezugspunkt der Übergang vom Infrastrukturbereich zum Schacht. Bei der Berechnung von Freisetzungen wurde dabei eine 300 m lange Strecke über den Schacht berücksichtigt. Die 300 m sind konservativ für den Bereich gewählt, für den davon auszugehen ist, dass er im Nachweiszeitraum nicht von Subrosion betroffen sein wird.

Für die Betrachtung alternativer Entwicklungen werden an einigen Stellen des Grubengebäudes (am Segment z2z3 und den Bohrlöchern unter BS-1NW, BS-3NW und BS4-NW) Lösungseinschlüsse angenommen. Die Bohrlochsegmente sind durch einen Kreis dargestellt.

Die Bezeichnungen der Bohrlochsegmente im weiteren Text ergeben sich aus dem Abfalltyp (BSK, HAW, MAW) und dem Namen der darüber liegenden Strecke, z.B. BBSK-1NW für das Bohrloch unter BS-1NW, BHAW-3NW unter BS-3NW usw.

Tab. 4.1: Globale Daten für das hydraulische Endlagermodell

Parameter	Dimension	Wert
Mittlere Dichte des Gesteins	kg/m ³	2 300
Mittlere Dichte des Grundwassers	kg/m ³	1 200
Referenztiefe des Endlagers	m. u. GOK	870
Gesteinstemperatur (Referenztiefe)	K	310
Geothermischer Gradient	K/m	0,03
Gebirgsdruck (Referenztiefe)	MPa	18
Hydrostatischer Druck (Referenztiefe)	MPa	10
Referenzkonvergenzrate	1/a	0,01
Diffusionskoeffizient	m ² /s	1,5·10 ⁻⁹
Effektive Null für Berechnung von Lösungsströmen	m ³ /a	< 10 ⁻¹²



Bewertung des sicheren Einschlusses

Detaillierte Beschreibungen der eingesetzten Segmentmodelle, der geometrischen Abmessungen der Strecken sowie die angenommenen Temperaturverläufe sind in BUHMANN ET AL. 2008B gegeben. Tabelle 4.1 stellt die wichtigsten globalen Daten für das Endlagermodell zusammen.

Das betrachtete Inventar ist bereits in den Tabellen 3.3 und 3.4 aufgelistet. Tabelle 4.2 gibt die verwendeten Abmessungen und das Gewicht der drei verwendeten Abfalltypen wieder.

Tab. 4.2: Geometrische Abmessungen der Abfallgebindetypen

Bezeichnung	Behältertyp	Länge [m]	Radius [m]	Masse [kg]
BSK	BSK-3	4,98	0,22	5 300
HAW	CSD-V	1,34	0,22	700
MAW	CSD-C	1,34	0,22	490

Die Modellparameter für die Beschreibung der Abfallmobilisierung und des Radionuklidquellterms sind in den Tabellen 4.3 bis 4.6 angegeben. Diese Parameter sind aus den Modellrechnungen aus BUHMANN ET AL. 2008B übernommen und werden in den Variationsrechnungen (Kapitel 4.4) nicht verändert.

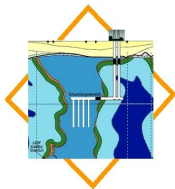
Bei der Mobilisierung der Radionuklide aus den Abfällen werden der radioaktive Zerfall des Inventars und die Zersetzung der Abfallmatrix berücksichtigt. Es wird für alle Gebinde eine gleich verteilte Lebensdauer mit einer mittleren Standzeit von fünf Jahren angenommen, d.h. nach einem Kontakt der Abfallgebinde mit Lösungen kommt es zu einem nahezu instantanen Ausfall der Behälter.

Tab. 4.3: Modellparameter für den Radionuklid-Quellterm

Parameter	Dimension	BSK	HAW	CSD
Zwischenlagerzeit	a	30	30	30
mittlere Standzeit der Behälter	a	5	5	5
Mobilisierungsrate(n)	1/a	Tab. 4.4	f(T)	konstant
Gasbildung		nein	nein	nein

Tab. 4.4: Relative Freisetzungsraten in den Abfallbereichen (BSK, HAW, MAW)

	Matrix	Metallteile	IRF
Mobilisierungsrate [a^{-1}]	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$3,6 \cdot 10^{-3}$	instantan



Bewertung des sicheren Einschlusses

Die Mobilisierung der Radionuklide aus den abgebrannten Brennelementen erfolgt aus den folgenden Bereichen (Tabelle 4.4):

- der Brennstoffmatrix, aus der die Radionuklide über einen sehr langen Zeitraum freigesetzt werden,
- den Metallteilen des Brennelementes einschließlich der Hüllrohre der Brennstäbe, aus denen der wesentliche Anteil der Aktivierungsprodukte während einiger hundert Jahre nach dem Ausfall des Behälters freigesetzt wird und
- dem Inventar, das annähernd instantan nach dem ersten Kontakt mit Wasser freigesetzt wird (instant release fraction, IRF); dies umfasst vor allem den Gasraum und die Kornoberfläche der Brennstoffmatrix.

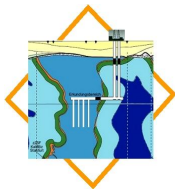
Die Verteilung des Radionuklidinventars auf die drei genannten Bereiche des Brennelementes ist in Tabelle 4.5 wiedergegeben.

Tab. 4.5: Elementspezifische Inventaranteile [%] in den einzelnen Bereichen eines LWR-Brennelementes

Element	Metallteile	Brennstoffmatrix	IRF
C	72,20	26,41	1,39
Cl	0,00	94,00	6,00
Ni, Mo, Nb, Co	99,50	0,47	0,03
Sn	0,00	98,00	2,00
I, Se	0,00	97,00	3,00
Cs	0,00	96,00	4,00
Rb	0,00	95,00	5,00
Sr, Sm, Pd	0,00	99,90	0,10
Zr	9,40	86,07	4,53
Tc	0,10	99,89	0,01
Pb, Cm, Am, Pu, Pa, U, Th, Ac, Np, Ra	0,00	99,99	0,01

Der Anteil der in Lösung gehenden mobilisierten Radionuklide hängt von der Löslichkeit der Radionuklide in dieser Lösung ab. Die berücksichtigten Löslichkeiten sind in Tabelle 4.6 dargestellt. Diese Löslichkeiten werden nur in den Einlagerungssegmenten berücksichtigt. In den übrigen Strecken des Grubengebäudes ist die Löslichkeit unbegrenzt.

Zusätzlich zur Berechnung des RGI am Rand des ewG wird mit den gleichen Dosis-konversionsfaktoren (Tabelle 3.1) auch die Strahlenexposition in der Biosphäre berechnet. Die Berechnung der Strahlenexposition in der Biosphäre wird analog zu den vorherigen Berechnungen ebenfalls für 10^6 Jahre durchgeführt, auch wenn nicht davon



Bewertung des sicheren Einschlusses

auszugehen ist, dass die Annahmen zu den Radionuklidtransportprozessen im Deckgebirge und zur Biosphärenmodellierung über eine Million Jahre Gültigkeit besitzen (NEA 2004). Für Zeiträume, die über einige zehntausend Jahre hinausgehen, sind solche Berechnungen nur als Abschätzungen der radiologischen Auswirkungen in der Biosphäre zu betrachten.

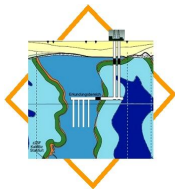
Tab. 4.6: Löslichkeiten der Radionuklide in den Einlagerungsbereichen

Element	Löslichkeitsgrenze [mol·l ⁻¹]	Element	Löslichkeitsgrenze [mol·l ⁻¹]
C	$1,0 \cdot 10^{-2}$	I	$1,0 \cdot 10^0$
Cl	$1,0 \cdot 10^0$	Cs	$1,0 \cdot 10^0$
Co	$1,0 \cdot 10^0$	Sm	$1,0 \cdot 10^{-4}$
Ni	$1,0 \cdot 10^{-4}$	Pb	$1,0 \cdot 10^0$
Se	$1,0 \cdot 10^{-4}$	Ra	$1,0 \cdot 10^{-6}$
Sr	$1,0 \cdot 10^{-3}$	Th	$1,0 \cdot 10^{-6}$
Zr	$1,0 \cdot 10^{-6}$	Pa	$1,0 \cdot 10^{-6}$
Nb	$1,0 \cdot 10^{-4}$	U	$1,0 \cdot 10^{-4}$
Mo	$1,0 \cdot 10^{-4}$	Np	$1,0 \cdot 10^{-5}$
Tc	$1,0 \cdot 10^{-4}$	Pu	$1,0 \cdot 10^{-6}$
Pd	$1,0 \cdot 10^{-4}$	Am	$1,0 \cdot 10^{-5}$
Sn	$1,0 \cdot 10^{-4}$	Cm	$1,0 \cdot 10^{-5}$

Im Gegensatz zum RGI-Wert berechnet sich die Strahlenexposition in der Biosphäre aus dem Volumenstrom in der Geosphäre. Dieser wurde für das Deckgebirge im Salzstock Gorleben mit $48.000 \text{ m}^3/\text{a}$ ermittelt (CADELLI ET AL. 1988). Die Daten für die Modellierung des Deckgebirges fasst Tabelle 4.7 zusammen.

Tab. 4.7: Daten für die Transportmodellierung im Deckgebirge

Parameter	Dimension	Wert
Länge des Modellgebietes	m	9 394
Querschnittsfläche des Gebietes	m ²	36 900
natürlicher Grundwasserstrom	m ³ /a	48 000
Dispersionslänge	m	65
molekularer Diffusionskoeffizient	m ² /a	$3 \cdot 10^{-2}$
Porosität	-	0,2
Gesteinsdichte	kg/m ³	2 500



4.2 Deterministische Rechnungen

Der Test des Konzeptes für den Nachweis des sicheren Einschlusses sollte mit einem Satz von realistischen Entwicklungen des Endlagersystems erfolgen. Die Verwendung sehr unrealistischer Ereignisabläufe ist dagegen nicht zielführend. Eine abgeschlossene Szenarienanalyse lag zum Zeitpunkt der Modellrechnungen allerdings noch nicht vor, so dass die betrachteten Entwicklungen im Wesentlichen auf den Ergebnissen aus BUHMANN ET AL. 2008B beruhen. Des Weiteren wird in diesem Bericht nicht von Szenarien sondern von Rechenfällen gesprochen.

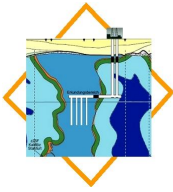
Für die Rechnungen wird zunächst ein Bezugsfall definiert, der eine mögliche Entwicklung des Endlagersystems darstellen soll. Dieser Bezugsfall wird mit dem letztlich in ISIBEL definierten Referenzszenario viele Übereinstimmungen aufweisen. Da die Definition des Referenzszenarios aber noch nicht abgeschlossen ist, wird es Unterschiede geben.

Um Ungewissheiten hinsichtlich der als Bezugsfall definierten Entwicklung behandeln zu können, werden weitere mögliche Entwicklungen mit zusätzlichen Rechenfällen betrachtet. Eine Bewertung der Eintrittswahrscheinlichkeiten wird nicht vorgenommen. Die weiteren Rechenfälle greifen einzelne Annahmen für den Bezugsfall auf und untersuchen die Konsequenzen, falls diese Annahme nicht erfüllt ist. Gegenüber den untersuchten Entwicklungen in BUHMANN ET AL. 2008B wurden auf Grund der fortgeschrittenen Diskussionen im ISIBEL-Projekt zwei Aspekte hinzugenommen: (1) ein Lösungseinschluss am Übergang z2/z3 und (2) die Annahme einer durchgehenden effektiven Restporosität im gesamten Grubengebäude inklusive der Einlagerungsbereiche und des Bohrlochverschlusses.

Die Untersuchung einer durchgehenden effektiven Porosität im gesamten Grubengebäude unterscheidet sich gegenüber den Annahmen im Bezugsfall (Kapitel 4.2.1) dadurch, dass - analog zu den Strecken - auch im Bohrlochverschluss eine Porosität übrigbleibt, die einen Lösungszutritt ermöglicht. Es kann daher nicht zu einem Verschluss der Einlagerungsbereiche kommen (Kapitel 4.2.2.1). Diese Entwicklung wurde aufgenommen, da das Verhalten der Versatzkompaktion über lange Zeiträume sehr schwer zu prognostizieren ist. Daraus resultieren Ungewissheiten, die mit diesem Rechenfall analysiert werden sollen.

4.2.1 Der Bezugsfall

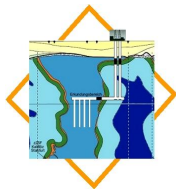
Die für das hydraulische Modell aus Kapitel 4.1 angesetzten Anfangs- und Randbedingungen sowie die eingesetzten Werte für die Parameter spiegeln die Annahmen, die für den Bezugsfall gemacht wurden, wider:



Bewertung des sicheren Einschlusses

1. Im unverritzten Steinsalz treten keine Wegsamkeiten auf, so dass ein Lösungszutritt nur über die Strecken und Schächte erfolgen kann.
2. Durch eine entsprechende Erkundung wird sichergestellt, dass sich keine Lösungsseinschlüsse im Wirtsgestein in unmittelbarer Umgebung der Einlagerungsbereiche befinden.
3. Alle Verschlussbauwerke verhalten sich anfänglich entsprechend ihrer geplanten Auslegung. Es kann aber nicht ausgeschlossen werden, dass die Verschlussbauwerke nach einer gewissen Zeit ausfallen. Für die vorliegenden Rechnungen wurde unterstellt, dass es nach 1.000 Jahren zum Ausfall der Verschlussbauwerke kommt. Im Modell wird das durch eine Erhöhung der Permeabilität von 10^{-18} m^2 auf 10^{-14} m^2 nach 1.000 Jahren umgesetzt. Diese Annahmen dienen zum Test des Konzeptes für den Nachweis des sicheren Einschlusses. Es ist davon auszugehen, dass die tatsächliche Funktionsdauern der geotechnischen Barrieren deutlich länger ist, auch die abrupte Erhöhung der Permeabilität wird in dieser Form nicht stattfinden.
4. Der Versatz aus Salzgrus im Endlagerbergwerk wird mit der Zeit kompaktiert, die Porosität/Permeabilität erreicht jedoch nicht die Eigenschaften des unverritzten Steinsalzes. Angenommen wird eine Grenzporosität von 1%, d.h. nach Erreichen dieser Porosität findet keine weitere Kompaktion statt. Die 1% entsprechen in etwa der unteren Grenze der experimentell abgesicherten Daten (MÜLLER-LYDA ET AL. 1999). Es wird angenommen, dass die verbleibende Porosität Transportprozesse ermöglicht (effektive Porosität).
5. Der durch die thermische Expansion ausgelöste Druckaufbau im Bereich der Einlagerungsorte sorgt dafür, dass der in den oberen 10 m der Bohrlöcher vorgesehene Verschluss (aus Salzgrus oder als monolithischer Salzblock) nach einer gewissen Zeit keine effektive Porosität mehr aufweist, in der zusammenhängenden Porenräume auftreten. Im Modell wird dieser Zustand erreicht, wenn eine bestimmte Porosität (Endporosität) unterschritten wird.
6. Die Subrosion der Salzformation an der Salzstockoberkante erfolgt mit einer so geringen Rate, dass der Abtrag des Salzstockes vernachlässigt werden kann.
7. Im Endlager gebildete Gase sind zu vernachlässigen. Freisetzungen über den Gaspfad sind daher nicht zu betrachten.

Ein Großteil der Parameter des Modells für die Berechnungen ist in den Tab. 4.1 bis Tab. 4.6 zusammengefasst. Die für die Berechnung entscheidende Änderung zu den Rechnungen in BUHMANN ET AL. 2008B in den Parametern besteht in der Erhöhung der Grenzporosität in allen Segmenten von 0,1 auf 1% (Annahme 4). Grund für die Erhöhung sind die bestehenden Ungewissheiten hinsichtlich des Kompaktionsverhaltens von Steinsalz bei sehr kleinen Porositäten, das weder experimentell noch theoretisch gut abgesichert ist (diese Ungewissheiten sind mit dem gestrichelten Pfeil in Abb. 2.1 angedeutet).



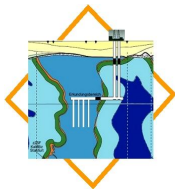
Tab. 4.8: Parameter für den Bezugsfall (Bohrlochlagerung mit Verschluss)

Parameter	Dimension	Wert	Bemerkung
Bohrlochlänge	m	300	inklusive Verschlusslänge
Durchmesser	m	0,48	für Bohrloch und Bohrlochverschluss
Verschlusslänge	m	10	-
Endporosität (Bohrlochverschluss)	-	$1,0 \cdot 10^{-6}$	-
Anfangsporosität (Bohrlochverschluss, Versatz)	-	0,3	= Referenzporosität, d.h. Stützwirkung setzt sofort ein
Grenzporosität (Versatz)	-	$1,0 \cdot 10^{-2}$	-
Effektive Länge	m	20	zweimal Verschlusslänge
Effektiver Querschnitt	m ²	$f(Q_s)$	Q_s = Querschnitt des Verschlusses

Um diese Ungewissheiten berücksichtigen zu können, wird in den Modellrechnungen davon ausgegangen, dass der Versatz nicht die Porosität von Steinsalz erreicht. Dennoch ist dies eine sehr pessimistische Auslegung der Ungewissheit bezüglich des Kompaktionsverhalten des Versatzes, da hier von einer durchgehend effektiven Porosität in allen Strecken über den gesamten Nachweiszeitraum ausgegangen wird. Von solch einer dauerhaft wirksamen Verbindung ist in einer versetzten Strecke in der Natur nicht auszugehen.

Die weiteren Bedingungen des Bezugsfalls entsprechen den Modellvorstellungen der Einlagerungsbereiche in den Berechnungen zu BUHMANN ET AL. 2008B. Die Einlagerung des radioaktiven Abfalls erfolgt in vertikalen Bohrlöchern mit einer Tiefe von 300 m, wobei die obersten 10 m mit einem Verschluss aus Salzgrus versehen sind (Annahme 5). Der Salzgrus des Bohrlochverschlusses ist im Modell nicht vorkompaktiert (Porosität = 0,3), allerdings wird angenommen, dass nach Erreichen einer bestimmten Porosität (Endporosität) keine verbundenen Hohlräume mehr existieren und kein Transport von Radionukliden mehr aus den Bohrlöchern in die darüber liegenden Strecken möglich ist, selbst wenn durch einen vorherigen Lösungszutritt Radionuklide freigesetzt wurden.

Die Berechnung der Diffusion und des Strömungswiderstandes des gesamten Bohrloches erfolgt mit der definierten effektiven Länge und dem effektiven Querschnitt. Die effektive Länge ist konstant, der effektive Querschnitt wird dagegen durch die Konvergenz des Salzes kontinuierlich kleiner.



4.2.2 Weitere Rechenfälle

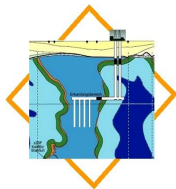
Basierend auf den bisher im Projekt ISIBEL geleisteten Arbeiten (BUHMANN ET AL. 2008B, WEBER & KELLER 2008) wurden folgende weitere Rechenfälle ausgewählt, die als mögliche wahrscheinlich oder weniger wahrscheinliche Entwicklungen in Frage kommen könnten:

1. Effektive Restporosität (1%) im Bohrlochverschluss
2. Frühzeitiges Versagen des Schachtverschlusses nach 50 Jahren
3. Frühzeitiges Versagen des Streckenverschlusses nach 50 Jahren
4. Lösungszutritt am Übergang z2/z3 (10.000 m³)
5. Lösungszutritt zu einem Bohrloch mit BSK3 (100 m³)
6. Lösungszutritt zu einem Bohrloch mit HAW-Kokillen (100 m³)
7. Lösungszutritt zu einem Bohrloch mit CSD-C/CSD-B (100 m³)

Auf Grund der Bedeutung der Versatzkompaktion für das Sicherheitskonzept liegt der Schwerpunkt der weiteren Rechenfälle auf dem Rechenfall „Effektive Restporosität im Bohrlochverschluss“ (Kapitel 4.2.2.1). Die anderen Rechenfälle wurden in ähnlicher Form bereits in BUHMANN ET AL. 2008B untersucht. Ob die Rechenfälle 5 bis 7 als weniger wahrscheinlich einzustufen oder wegen ihrer sehr geringen Eintrittswahrscheinlichkeit bei der Bewertung des sicheren Einschlusses nicht zu betrachten sind, kann zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht bewertet werden.

4.2.2.1 Effektive Restporosität im Bohrlochverschluss

Hintergrund des ersten Rechenfalls (Rechenfall 1) sind die bereits erwähnten Ungewissheiten bezüglich des Kompaktionsverhaltens von Salzgrus. Ziel dieser Betrachtung ist es, durch den Einsatz unterschiedlicher Modellansätze und der Variation von Parametern die Bedeutung dieser Ungewissheiten besser einschätzen zu können. In dieser Variante wird das gleiche Bohrlochmodell mit denselben geometrischen Daten eingesetzt wie im Bezugsfall (Tab. 4.7) mit dem Unterschied, dass kein Bohrlochverschluss berücksichtigt wird. Das Volumen des Verschlusses wird dem Bohrlochversatz zugeschlagen. Daher gibt es auch keine Endporosität, die bei entsprechender Abnahme der Porosität zu einem Abschalten des Segmentes führen kann. Die zugrunde liegende physikalische Annahme besteht darin, dass dem Kriechen des Salzgesteins bei Erreichen einer bestimmten Porosität im Salzgrusversatz (Grenzporosität) ein solcher Widerstand entgegengesetzt wird, dass die Konvergenz zum Erliegen kommt und es nicht mehr zu einer weiteren Abnahme der Porosität kommt. Der verbleibende Porenraum ist verbunden (effektive Porosität) und erlaubt gegebenenfalls den Transport von Flüssig-



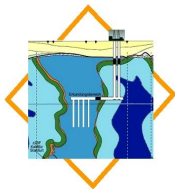
keiten und Radionukliden. Wenn die Konvergenz als Antriebsmechanismus für advektive Transportprozesse nicht mehr stattfindet, gelangen Radionuklide allenfalls über diffusive Transportprozesse aus den lösungserfüllten Einlagerungsbereichen in die darüber liegenden Strecken und Schächte.

Tab. 4.9: Parameter für die Bohrlagerung ohne Verschluss

Parameter	Dimension	Wert	Bemerkung
Bohrlochlänge	m	300	-
Durchmesser	m	0,48	nur für Bohrloch
Verschlusslänge	m	0	-
Endporosität (Bohrlochverschluss)	-	-	wird nicht verwendet
Anfangsporosität (Versatz)	-	0,3	= Referenzporosität, d.h. Stützwirkung setzt sofort ein
Grenzporosität (Versatz)	-	$1,0 \cdot 10^{-2}$	-
Effektive Länge	m	20	analog Variante 1
Effektiver Querschnitt	m ²	$f(Q_B)$	Q_B = Querschnitt des Bohrlochs

Durch die in dem Modell gegebenen Randbedingungen, insbesondere die durchgehend vorhandene effektive Porosität bis zu den Einlagerungsbereichen, ist in diesem Rechenfall eine Freisetzung unvermeidbar, da irgendwann die über den Schacht in das Endlagerbergwerk zutretende Lösung die Abfälle erreicht. Auch wenn diese Lösungsmengen sehr gering sind, führen sie zu einer Mobilisierung von Radionukliden. Zu zeigen ist, wann die Mobilisierung von Radionukliden erfolgt und wie groß die anschließende Freisetzung von Radionukliden ist.

Wird eine Freisetzung sehr spät errechnet, ist der Konvergenzprozess abgeklungen und als Transportprozess kommt nur noch Diffusion in Frage. Die Berechnung der Diffusion und des Strömungswiderstandes erfolgt wie im Bezugsfall mit der definierten effektiven Länge und dem effektiven Querschnitt. Für die effektive Länge wurde analog zum Bezugsfall eine Länge von 20 m gewählt. Der effektive Querschnitt ist in dieser Variante dagegen eine Funktion des Querschnitts des Bohrlochs. Neben den in Tab. 4.7 und 4.8 dargelegten Unterschieden ist der für die Konvergenz berücksichtigte Temperaturverlauf wichtig. Für den Bezugsfall wird ein Temperaturverlauf für den oberen Bereich eines Bohrlochs mit hochradioaktivem Abfall gewählt. Beim Rechenfall 1 bezieht sich der Temperaturverlauf auf die Mitte des Bohrlochs. Beide Temperaturverläufe sind BUHMANN ET AL. 1991 entnommen, das ein anderes Grubengebäude berücksichtigt hat. Insofern sind die Temperaturverläufe nicht auf das hydraulische Endlagermodell und die Bedingungen im Bezugsfall und im Rechenfall 1 abgestimmt. Die



Abweichung der Temperaturverläufe sind für den Test der Methodik aber nicht relevant.

4.2.2.2 Frühzeitiges Versagen des Schacht- oder Streckenverschlusses

Bei den nächsten beiden Rechenfällen (Rechenfälle 2 und 3) bedeutet „Frühzeitiges Versagen“ wie beim Bezugsfall eine Erhöhung der Permeabilität von 10^{-18} m^2 auf 10^{-14} m^2 . Im Unterschied zum Bezugsfall findet diese Änderung der Permeabilität aber bereits nach 50 Jahren statt. Ein gleichzeitiges Versagen von Schacht- und Streckenverschluss ist auf Grund der diversitär ausgelegten Bauwerke so gering wahrscheinlich, dass es als zu betrachtende Entwicklung nicht in Frage kommt. Daher wurde diese Entwicklung im Gegensatz zu BUHMANN ET AL. 2008B in den deterministischen Untersuchungen nicht betrachtet.

4.2.2.3 Lösungseinschlüsse an verschiedenen Stellen des Endlagermodells

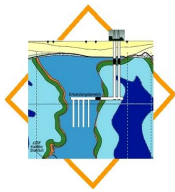
Die Lösungseinschlüsse der Rechenfälle 4 bis 7 beinhalten einen größeren Lösungseinschluss in einer Anhydritscholle (z3) sowie drei weitere bei der Erkundung nicht detektierte kleinere Lösungseinschlüsse im Hauptsalz. Die angegebenen Volumina für die Lösungseinschlüsse stellen konservative Einschätzungen dar. Des Weiteren wird angenommen, dass die Lösungsvolumina in den Lösungseinschlüssen sofort nach Verschluss des Endlagers freigesetzt werden. Die drei untersuchten Rechenfälle mit Lösungseinschlüssen im Hauptsalz berücksichtigen dabei die drei unterschiedlichen Abfallarten im Endlager. Wichtig für die Ergebnisse der Rechenfälle ist neben der Zusammensetzung der Abfälle (Tab 3.3 und 3.4) vor allem ihre Lage zum Rand des ewG (siehe Abb. 4.1).

4.3 Ergebnisse der deterministischen Rechnungen

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse aus den Rechenläufen des hydraulischen Endlagermodells mit den jeweils unterstellten Randbedingungen der beschriebenen Entwicklungen vorgestellt. An Hand der Ergebnisse soll geprüft werden,

- ob die drei vorgeschlagenen Indikatoren geeignet sind, den Nachweis des sicheren Einschlusses plausibel führen zu können und
- ob die Prüfwerte der Indikatoren für die beiden definierten Abgrenzungen des ewG (am Streckenverschluss und am Infrastrukturbereich) eingehalten werden können.

Zunächst erfolgt eine Bewertung der Transportprozesse im Grubengebäude auf Basis des Ansatzes in Kapitel 3.2.1. Sollte sich dabei herausstellen, dass es zu einer Freisetzung von Radionukliden aus den Einlagerungsbereichen kommt, wird der sichere Ein-



schluss an Hand der anderen beiden Indikatoren geprüft (Kapitel 3.2.2 und 3.2.3). Auch das Ende des Konvergenzprozess wird nur angegeben, wenn es zu einer Freisetzung aus den Einlagerungsbereichen kommt.

4.3.1 Ergebnisse des Bezugsfalls

Im Bezugsfall gelangt keine Lösung in die Einlagerungsbereiche. Nach wenigen Jahrhunderten ist die Konvergenz dort soweit fortgeschritten, dass im Bohrlochverschluss kein zusammenhängender Porenraum mehr vorhanden ist und es dementsprechend nicht zu einem Wasserzutritt zu den Abfällen in den Bohrlöchern kommt. Für den Bezugsfall bedeutet das für den Lösungspfad eine Nullemission von Radionukliden, d.h. die beiden quantitativen Indikatoren RGI und KFS sind gleich Null. Eine Bewertung der Transportprozesse gemäß Kapitel 3.2.1 liefert folgende Ergebnisse:

- Am Schacht ausgepresste Lösungsmenge nach 10^6 a: **40 m³**
- Beginn der Auspressung: **1.077 a**
- Beginn der Radionuklidmobilisierung: -
- Beginn der Freisetzung aus den Einlagerungsbereichen: -
- Ende des Konvergenzprozesses: **n.a.**
- Art des dominierenden Transportprozesses: -

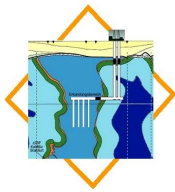
Insgesamt dringt ungefähr 5.000 m³ Lösung während des Nachweiszeitraumes in das Endlager ein, die zum größten Teil im Grubengebäude (Infrastrukturbereich) verbleibt. Weniger als 1% dieser Menge wird wieder aus dem Endlager gepresst.

Da es nicht zu einer Freisetzung von Radionukliden kommt, ist der sichere Einschluss für den Bezugsfall für beide Ausweisungen des ewG gegeben.

4.3.2 Ergebnisse der weiteren Rechenfälle

4.3.2.1 Effektive Restporosität im Bohrlochverschluss

Bei der Annahme einer effektiven Restporosität von 1% auch für den Bohrlochverschluss können für die Bewertung der Transportprozesse folgende Ergebnisse zusammengestellt werden:



- Am Schacht ausgepresste Lösungsmenge nach 10^6 a: **60 m³**
- Beginn der Auspressung: **1.074 a**
- Beginn der Radionuklidmobilisierung: **5.298 a (BBSK-1NW)**
- Beginn der Freisetzung aus den Einlagerungsbereichen: **13.098 a (BBSK-1NW)**
- Ende des Konvergenzprozesses: **124 a (BBSK-1NW)**
- Art des dominierenden Transportprozesses: **Diffusion**

In diesem Rechenfall erreicht die Lösung nach etwa 5.000 Jahren den vordersten Einlagerungsbereich (Beginn der Mobilisierung von Radionukliden im Bohrlochsegment BBSK-1NW). Nach etwa 13.000 Jahren ist dieser Bereich lösungserfüllt und ein Transport der mobilisierten Radionuklide in die darüber liegende Strecke BS-1NW findet statt. Da der Konvergenzprozess in dem Bohrloch (und in den anderen Einlagerungsbereichen) bereits abgeschlossen ist, findet der Transport von Radionukliden im Grubengebäude nur diffusiv statt. Zu späteren Zeitpunkten findet eine Mobilisierung von Radionukliden in allen anderen Einlagerungsbereichen statt, zuletzt in der hintersten Sektion des Endlagers mit den CSD-Kokillen (Zulauf von Lösung in BCSD-4NW ab ungefähr 80.000 Jahren, Beginn der Freisetzung ab ungefähr 225.000 Jahren).

Der Konvergenzprozess im Grubengebäude endet nach etwa 16.000 Jahren im Infrastrukturbereich (INFRA-B). Dorthin sind die diffusiv transportierten Radionuklide zu diesem Zeitpunkt noch nicht gelangt. Die Schadstofffront befindet sich zu diesem Zeitpunkt im Segment z2z3. Die ersten Radionuklidkonzentrationen erscheinen am Streckenverschluss nach ungefähr 13.500 Jahren (Abbildung 4.2).

Abbildung 4.2 illustriert den Vergleich zwischen dem RGI und der „Effektiven Dosis am ewG“. Dieser Vergleich wird in Abbildung 4.2 durchgeführt, um zu zeigen, dass eine Normierung der Indikatoren nichts an ihrem Informationsgehalt verändert, dafür aber auf irreführende Begrifflichkeiten und physikalische Einheiten verzichten kann (siehe Kapitel 3.2.2). Für die folgenden Rechenfälle wird nur noch der normierte Indikator dargestellt.

Abbildung 4.2 zeigt, dass der RGI für einen ewG, der am Streckenverschluss endet, nach etwa 15.000 Jahren eine Freisetzung von Radionukliden auftritt. Nach etwa 300.000 Jahren wird am Streckenverschluss das Kriterium überschritten.

Wenn der Rand des ewG am Schachtverschluss liegt, werden Radionuklide dort nach 500.000 Jahren freigesetzt. Ab diesem Zeitraum liegt der RGI bei einem Wert von kleiner als 0,01 und erreicht zum Ende des Nachweiszeitraums seinen Maximalwert von fast 0,02.

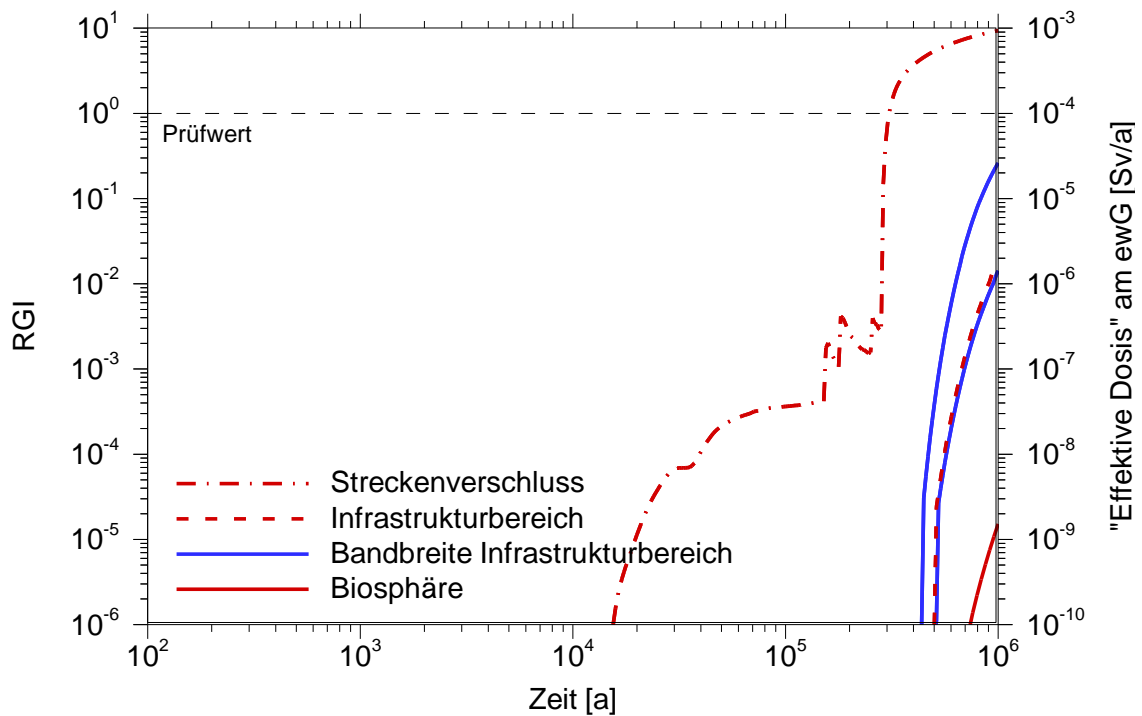
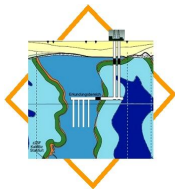


Abb. 4.2: RGI und „Effektive Dosis am ewG“ für den Rechenfall „Effektive Restporosität im Bohrlochverschluss“

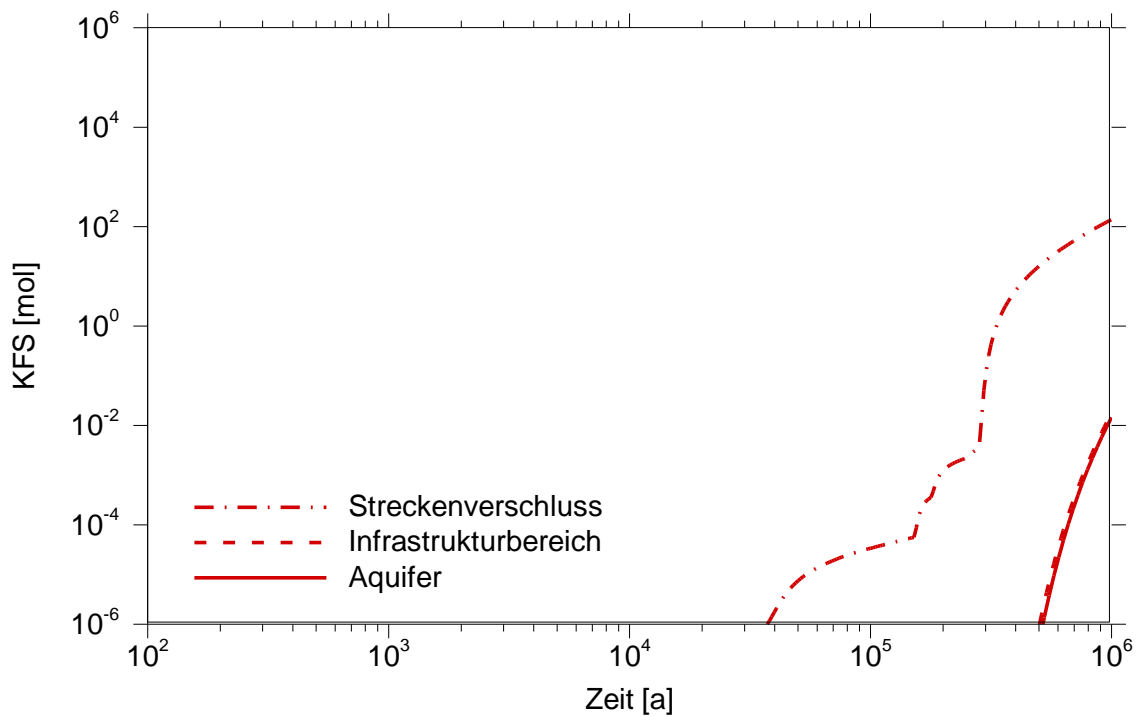
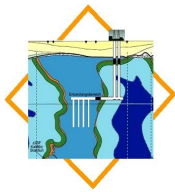


Abb. 4.3: Anteil der kumulierten freigesetzten Stoffmenge (KFS) für den Rechenfall „Effektive Restporosität im Bohrlochverschluss“



Gemäß der Definition für den ewG am Infrastrukturbereich, wurden die Bereiche, die nicht von Erosions- oder Subrosion betroffen sind, bei den Berechnungen mit einbezogen. Es wurde daher für die Diffusionsprozesse eine Strecke von 300 m zwischen Infrastrukturbereich und Rand des ewG (Bezugspunkt der Berechnung der Indikatoren) modelliert.

Um den Einfluss der Streckenlänge beurteilen zu können, wurde dieser Wert zwischen 10 und 400 m variiert. Der resultierende Bereich dieser Variation ist in Abbildung 4.2 durch die blauen Linien dargestellt. Auch bei einer geringen Streckenlänge von 10 m (obere blaue Linie) liegt der RGI am Infrastrukturbereich bei etwa 0,2 und damit fast zwei Größenordnungen unter dem Wert am Streckenverschluss. Grund hierfür ist hauptsächlich eine Verdünnung der Radionuklide mit der Lösung im Infrastrukturbereich.

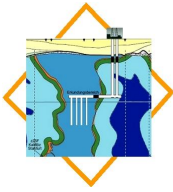
Die radiologische Einschätzung des Rechenfalls wird letztendlich durch die Berechnung der Strahlenexposition in der Biosphäre abgeschlossen. Diese beinhaltet eine Berücksichtigung der über dem Salzstock lagernden Schichten und dem dort herrschenden hydrogeologischen Verhältnissen. Diese Verhältnisse sind in dieser Form für den gesamten Nachweiszeitraum nicht konstant. Trotz dieser Einschränkung soll im Rahmen des Indikators RGI eine Abschätzung der Dosis in der Biosphäre mit den heutigen Bedingungen erfolgen, da diese Abschätzung eine bessere Einordnung der am ewG berechneten Ergebnisse erlaubt. In den folgenden Rechenfällen wird die Strahlenexposition in der Biosphäre nur noch normiert dargestellt (mit dem Wert 0,1 mSv/a).

Die für Rechenfall 1 errechnete Strahlenexposition liegt ungefähr fünf Größenordnungen unter dem Kriterium. Die maximale Dosis von etwa 10^{-9} Sv/a nach 10^6 Jahren ist sehr gering.

Der Anteil der freigesetzten Stoffmenge ist für beide Abgrenzungen des ewG sehr gering (Abbildung 4.3): Am Streckenverschluss werden nach 10^6 Jahren 140 mol freigesetzt, das entspricht einem Anteil von ungefähr $3 \cdot 10^{-6}$ des eingelagerten Inventars. Am Schachtverschluss sind es 0,02 mol ($4 \cdot 10^{-10}$) nach 10^6 Jahren. Das zeigt sich das große Rückhaltepotential für aus den Abfällen mobilisierte Radionuklide im Grubengebäude zwischen Strecken- und Infrastrukturbereich.

Der Vergleich der Kurvenverläufe zwischen der über 10^6 Jahre kumulierten freigesetzten Stoffmenge aus Streckenverschluss, Infrastrukturbereich und aus dem Aquifer verdeutlicht die Rückhaltung und die damit verbundenen Reduzierung des Radionuklidstroms. Der Unterschied zwischen Streckenverschluss und Infrastrukturbereich ist dabei um ein Vielfaches größer als der Beitrag des Deck- und Nebengebirges.

Die Abbildungen 4.2 und 4.3 zeigen, dass die diffusiven Radionuklidströme nach 10^6 Jahren noch nicht ihr Maximum erreicht haben. Um die diffusiven Freisetzungsprozesse besser verstehen können, wurden Modellrechnungen für 10^8 Jahre durchgeführt



und dabei die verbleibende Restporosität (Grenzporosität) zwischen 0,1 und 10% variiert (Abb. 4.4). Dabei ist zu beachten, dass Berechnung der Strahlenexposition für so lange Zeiträume nicht möglich ist, da die zugrundeliegenden Biosphärenmodelle nur für recht kurze Zeiträume gültig sind. Es handelt sich hier vielmehr um eine Abschätzung der radiologischen Auswirkungen in der Biosphäre auf der Grundlage heutiger Bedingungen.

Es zeigt sich, dass die Maxima etwa nach 10^7 Jahren auftreten (entspricht in etwa der Halbwertszeit des bestimmenden Radionuklids I-129). Die auftretenden Maxima bleiben unter 10^{-6} Sv/a und damit zwei Größenordnungen unter dem geforderten Kriterium. Die maximale Dosis wird bei der den Rechnungen zugrundegelegten Grenzporosität von 1% erreicht. Höhere und niedrigere Porositäten ergeben kleinere Strahlenexpositionen. Die eingesetzte Grenzporosität von einem Prozent ist für diesen Rechenfall damit konservativ für das gewählte Endlagermodell. Höhere Porositäten geben kleinere Maxima, da in diesem Fall höhere Restvolumina im Grubengebäude verbleiben und damit die Konzentrationsgradienten, die die Diffusion antreiben, reduzieren. Bei kleineren Porositäten ergeben sich in den versetzten Strecken höhere Widerstände, die einen Zulauf stark verzögern. Bei 0,1% Grenzporosität ergeben sich in den versetzten Strecken so hohe Widerstände, dass auch in 10^8 Jahren keine Radionuklide freigesetzt werden.

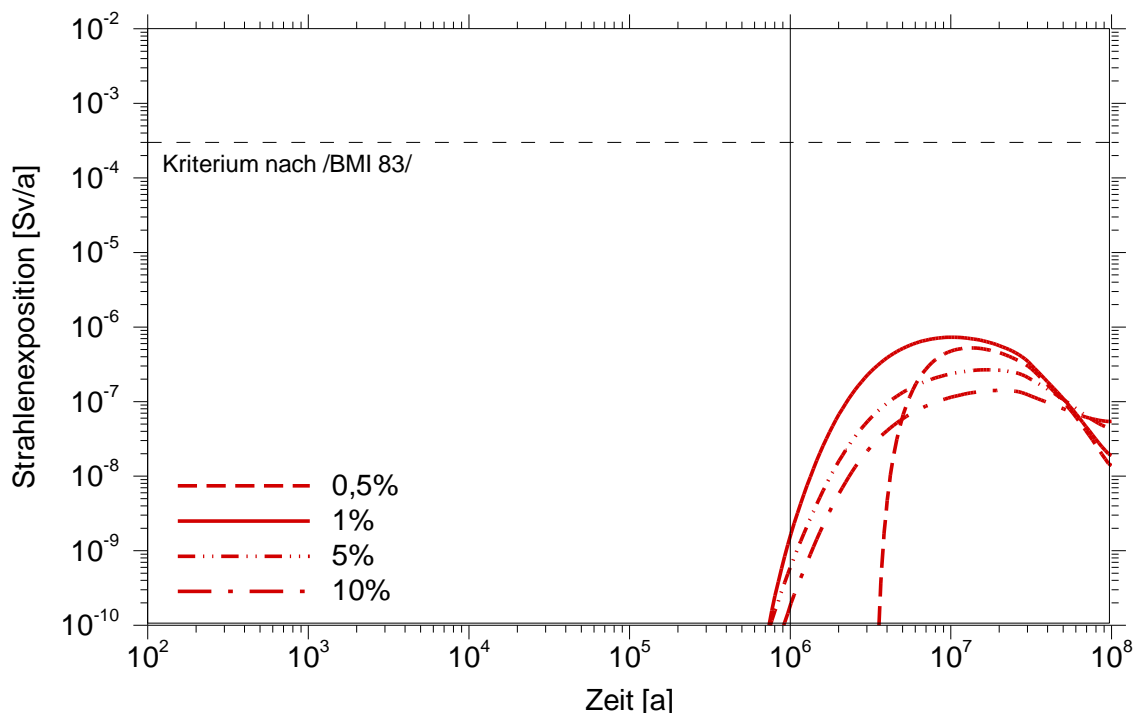
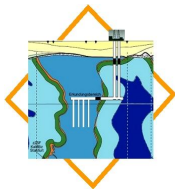


Abb. 4.4: Der Einfluss der Grenzporosität für den Rechenfall „Effektive Restporosität im Bohrlochverschluss“

Die beschriebenen gegeneinander wirkenden Effekte - kleine Konzentrationsgradienten bei großen Grenzporositäten gegen große Widerstände bei kleinen Grenzporositäten – können für andere Szenarien und andere Endlagersysteme zu unterschiedlichen



Grenzporositäten führen, die man einsetzen muss, um konservative Rechnungen durchzuführen. Eine allgemeingültige Aussage, wie sich eine Änderung der Grenzporosität auf die Ergebnisse auswirkt, ist nicht möglich.

4.3.2.2 Frühzeitiges Versagen des Schachtverschlusses

Bei einem frühzeitigen Ausfall des Schachtverschlusses, das entspricht im Modell einer Permeabilitätserhöhung von 10^{-18} auf 10^{-14} m^2 nach 50 Jahren, ändert sich gegenüber dem Bezugsfall (hier findet diese Erhöhung erst nach 1.000 Jahren statt) im wesentlichen nur die Menge an Lösung, die über den Schacht in den Infrastrukturbereich eindringen kann. Im Bezugsfall sind dies etwa 5.000 m^3 , bei einem frühzeitigen Versagen des Schachtverschlusses etwas mehr als 26.000 m^3 .

Eine Bewertung der Transportprozesse ergibt:

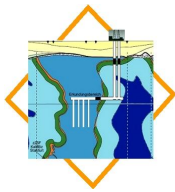
- Am Schacht ausgepresste Lösungsmenge nach 10^6 a : **21.118 m^3**
- Beginn der Auspressung: **64 a**
- Beginn der Radionuklidmobilisierung: -
- Beginn der Freisetzung aus den Einlagerungsbereichen: -
- Ende des Konvergenzprozesses: **n.a.**
- Art des dominierenden Transportprozesses: -

Wie schon in BUHMANN ET AL. 2008 gezeigt, hat ein vorzeitiger Ausfall des Schachtverschlusses bei ansonsten gleichbleibenden Bedingungen wenig Auswirkungen auf die Ergebnisse, da die eindringende Lösung die Einlagerungsbereiche nicht erreichen kann, bevor diese durch den Konvergenzprozess im Bohrlochverschluss verschlossen werden. Weitere Indikatoren können folglich nicht berechnet werden, der sichere Einschluss ist für beide Abgrenzungen des ewG gegeben.

4.3.2.3 Frühzeitiges Versagen des Streckenverschlusses

Ein frühzeitiger Ausfall des Streckenverschlusses, die im Modell durch eine Permeabilitätserhöhung im Segment DAMM (Abb. 4.1) von 10^{-18} auf 10^{-14} m^2 nach 50 Jahren umgesetzt ist, hat andere Auswirkungen auf die ablaufenden Transportprozesse und die Radionuklidmobilisierung als das frühzeitige Versagen des Schachtverschlusses im vorherigen Abschnitt:

- Am Schacht ausgepresste Lösungsmenge nach 10^6 a : **40 m^3**
- Beginn der Auspressung: **1.078 a**



- Beginn der Radionuklidmobilisierung: **51 a (BBSK-1NW)**
- Beginn der Freisetzung aus den Einlagerungsbereichen: -
- Ende des Konvergenzprozesses: **225 a (BBSK-1NW)**
- Art des dominierenden Transportprozesses: -

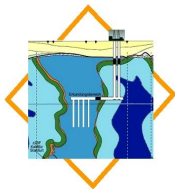
Es gelangt zwar über den intakten Schachtverschluss wie im Bezugsfall nur etwa 5.000 m³ Lösung in das Endlager, diese kann sich aber wegen des ausgefallenen Streckenverschlusses schneller ausbreiten und erreicht nach 51 Jahren die vordersten Einlagerungsbereiche. Die Lösungsmengen, die dorthin gelangen sind sehr gering und reichen nicht aus, um das Bohrloch zu füllen, bevor der Porenraum im Bohrlochverschluss durch Konvergenz geschlossen wird. Es kommt daher nicht zu einer Freisetzung von Radionukliden aus den Einlagerungsbereichen, d.h. die beiden quantitativen Indikatoren RGI und KFS sind gleich Null. Der sichere Einschluss ist für beide Abgrenzungen des ewG gegeben.

4.3.2.4 Lösungszutritt am Übergang z2/z3

Ein direkt nach Verschluss des Endlagers freigesetzter Lösungseinschluss von 10.000 m³ zwischen Infrastrukturbereich und Streckenverschluss hat zur Folge, dass sich von Beginn an doppelt soviel Lösung im Endlager befindet wie im Bezugsfall. Ein Großteil dieser Lösung wird in diesem Zeitraum wieder ausgepresst:

- Am Schacht ausgepresste Lösungsmenge nach 10⁶ a: **6.759 m³**
- Beginn der Auspressung: **323 a**
- Beginn der Radionuklidmobilisierung: **5 a (BBSK-1NW)**
- Beginn der Freisetzung aus den Einlagerungsbereichen: -
- Ende des Konvergenzprozesses: **228 a (BBSK-1NW)**
- Art des dominierenden Transportprozesses: -

Auf den ersten Blick scheint der intakte Streckenverschluss in diesem Rechenfall im Vergleich zu dem Rechenfall „Frühzeitiges Versagen des Streckenverschlusses“ eine geringere Wirkung zu haben, da bereits nach fünf Jahren die Einlagerungsbereiche von Lösung erreicht werden. Die Ursache für diese Diskrepanz liegt darin begründet, dass im Rechenfall „Lösungseinschluss am Übergang z2/z3“ das Segment vor dem Streckenverschluss durch die zulaufenden 10.000 m³ sehr schnell lösungserfüllt ist. Damit steht ein höherer Druck am Streckenverschluss an als im Rechenfall mit ausgefallenem Streckenverschluss. In beiden Rechenfällen ergeben sich von Beginn geringe Lösungsmengen, die den Streckenverschluss durchströmen. Im vorherigen Rechenfall sind die Lösungsmengen durch den geringen anstehenden Druck allerdings so klein,



dass sie unter die modelltechnisch vorgegebene Grenze von 10^{-12} m^3 fallen (Tab 4.1). Solch kleine Lösungsmengen werden im Modell nicht mehr berücksichtigt. Nach 50 Jahren fließt dann im Rechenfall „Frühzeitiges Versagen des Streckenverschlusses“ deutlich mehr Lösung durch den Streckenverschluss.

Wie gering in beiden Rechenfällen die Wassermengen sind, die sich im Einlagerungsbereich bewegen, zeigt ein Vergleich der maximalen Lösungsmengen im Bohrloch BBSK-1NW: Im Rechenfall „Versagen des Streckenverschlusses“ sind dort ungefähr 10^{-5} m^3 eingedrungen, im vorliegenden Rechenfall mit intaktem Streckenverschluss mit ungefähr 10^{-7} m^3 nur ein Hundertstel dieser Menge.

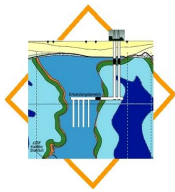
Diese geringen Mengen reichen bei weitem nicht aus, das Bohrloch (Anfangsporenvolumen bei BSK3 etwa 15 m^3) zu füllen und es kommt daher nicht zu einer Freisetzung von Radionukliden. Der sichere Einschluss ist damit auch in diesen beiden Rechenfällen für beide ewG gewährleistet.

4.3.2.5 Lösungszutritt an einem Bohrloch mit BSK3

Bei größeren Lösungseinschlüssen, die direkt an Einlagerungsbereichen mit wenig Hohlraumvolumen (beispielsweise Bohrlöcher) anschließen, ergibt sich auf der Basis des hydraulischen Endlagermodells zwangsläufig, dass diese Einlagerungsbereiche lösungserfüllt sind, Radionuklide freigesetzt und advektiv (durch Konvergenz) aus den Einlagerungsbereichen in benachbarte Strecken transportiert werden. Insofern gilt es, für diese Rechenfälle mit Hilfe der anderen Indikatoren nachzuweisen, dass die Auswirkungen der freigesetzten Radionuklide geringfügig sind:

- Am Schacht ausgepresste Lösungsmenge nach 10^6 a : **60 m^3**
- Beginn der Auspressung: **1.075 a**
- Beginn der Radionuklidmobilisierung: **sofort (BBSK-1NW)**
- Beginn der Freisetzung aus den Einlagerungsbereichen: **sofort (BBSK-1NW)**
- Ende des Konvergenzprozesses: **nicht erreicht (BBSK-1NW)**
- Art des dominierenden Transportprozesses: **Advektion (und Diffusion)**

Des Weiteren werden zu späteren Zeitpunkten alle weiteren Bereiche des vordersten Einlagerungsfeldes erreicht (BBSK-1NM, BBSK-1MW, BBSK-1MM). Je mehr Lösung dabei eindringt, desto langsamer wird der Konvergenzprozess, im instantan gefluteten Bohrloch wird er sehr langsam, kommt im betrachteten Zeitraum aber nicht zum Erliegen.



Bewertung des sicheren Einschlusses

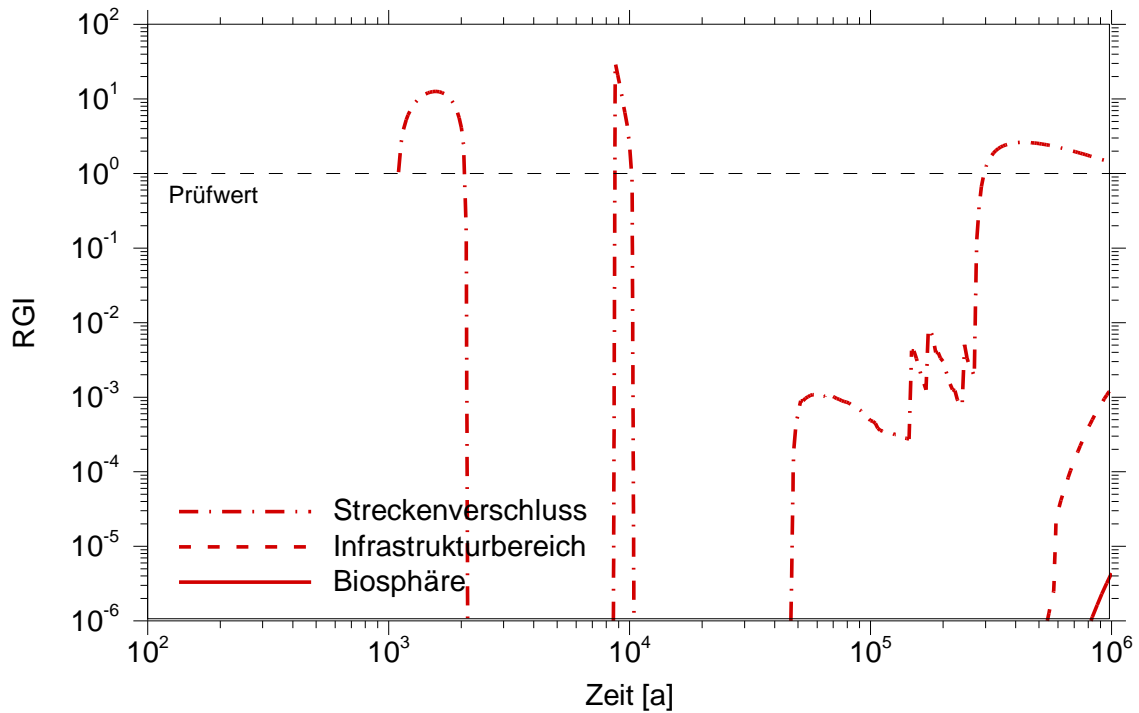


Abb. 4.5: RGI beim Rechenfall „Lösungseinschluss in einem Bohrloch mit BSK3“

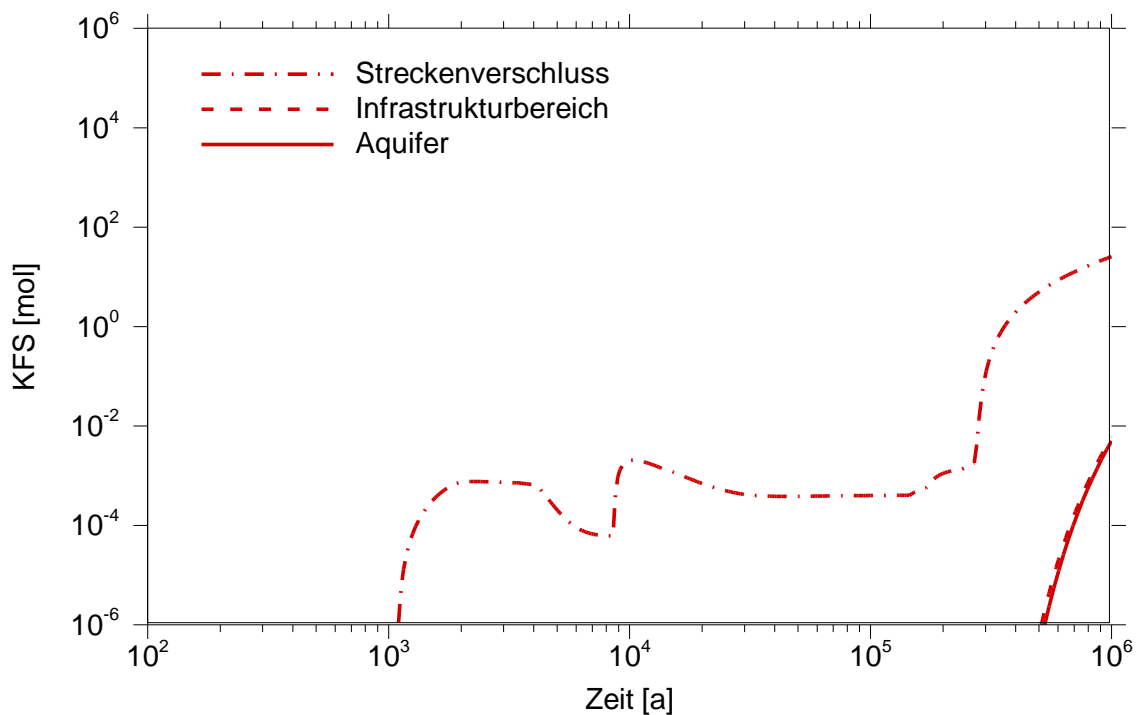
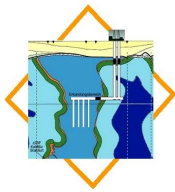


Abb. 4.6: Anteil der kumulierten freigesetzten Stoffmenge (KFS) für den Rechenfall „Lösungseinschluss in einem Bohrloch mit BSK3“



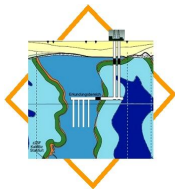
Zur Bewertung der Auswirkung des advektiven Radionuklidtransports werden die beiden quantitativen Indikatoren eingesetzt. Abbildung 4.5 zeigt, dass nach ungefähr 1.000 Jahren, nachdem die Verschlüsse ihre Dichtwirkung eingebüßt haben, ein Radionuklidstrom am Streckenverschluss auftritt. Dabei ergibt sich an dieser Stelle ein RGI-Wert von > 1 . Nach dem Ausfall des Streckenverschlusses kommt es zu einem komplexen Wechselspiel zwischen der unbelasteten, außen am Streckenverschluss anstehenden Lösung und dem Radionuklidstrom aus dem Endlager: Nach etwa 2.000 Jahren gelangt Lösung, die über den Schacht ins Endlager eingedrungen ist, zum Streckenverschluss und drängt die kontaminierte Lösung zurück in den Einlagerungsbereich (negative Ströme, d.h. der RGI-Wert ist Null). Es dauert ungefähr 7.000 Jahre bis wieder ein Radionuklidstrom durch den Streckenverschluss gedrückt wird und damit ein RGI-Wert > 0 am Streckenverschluss auftritt.

Es handelt sich um einen kurzen Peak von etwas mehr als 1.000 Jahren mit einem RGI-Wert > 10 . Danach treten erneut negative Ströme auf. Nach ungefähr 50.000 Jahren ergibt sich ein RGI-Wert größer Null am Streckenverschluss. Die ab 50.000 Jahren dargestellte Kurve in Abbildung 4.5 hat große Ähnlichkeiten mit der Kurve in Abbildung 4.2. In der Tat ist zu diesem Zeitpunkt der austretende Radionuklidstrom als rein diffusiver Strom anzusehen, da die Konvergenz im Grubengebäude zum Erliegen gekommen ist. Ausnahme bildet das Bohrloch BBSK-1NW. Die Konvergenz ist aber bereits so gering geworden, dass sie keine Auswirkungen mehr auf den Transport der Radionuklide hat.

Beim Infrastrukturbereich sind die komplexen advektiven Ströme innerhalb des Grubengebäudes nicht abzulesen, hier stellt sich erst nach 500.000 Jahren ein Radionuklidstrom aus dem Grubengebäude ein, aus dem sich ein RGI-Wert von etwa 0,001 errechnet. Die radiologischen Auswirkungen in der Biosphäre wären unter der Annahme heutiger Bedingungen mit weniger als 10^{-9} Sv/a außerordentlich gering.

Abbildung 4.6 zeigt die unterschiedlichen Strömungsrichtungen zwischen 2.000 und 50.000 Jahren mit einem Auf und Ab der Kurve ohne eine nennenswerte Zunahme der kumulierten Stoffmenge. Erst danach nimmt die kumulierte Stoffmenge wieder zu, die Kurve ähnelt in Verlauf und Größe wieder den Ergebnissen des diffusiven Transportes in Abbildung 4.3.

Abschließend lässt sich sagen, dass bei einer Abgrenzung des ewG am Streckenverschluss mehrfach ein RGI-Wert größer 1 auftritt, so dass die Geringfügigkeit der Radionuklidfreisetzung und damit der sichere Einschluss der Radionuklide im ewG an dieser Stelle nicht nachgewiesen wäre, obwohl praktisch keine Radionuklide das Endlager selbst verlassen. Für einen ewG, der am Ende des Infrastrukturbereichs endet, ist der Nachweis des sicheren Einschlusses gegeben.



4.3.2.6 Lösungszutritt an einem Bohrloch mit HAW-Kokillen

Wie im vorherigen Rechenfall gilt, dass es zu einem advektiven Radionuklidstrom aus dem instantan gefluteten Einlagerungsbereich kommen muss. Es bleibt daher wieder die Frage zu klären, wie groß die Auswirkungen dieser Freisetzung an den betrachteten Abgrenzungen des ewG sind.

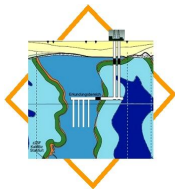
Die Bewertung der Transportprozesse liefert ein ähnliches Bild wie im vorherigen Rechenfall, nur diesmal für den HAW-Einlagerungsbereich:

- Am Schacht ausgepresste Lösungsmenge nach 10^6 a: **52 m³**
- Beginn der Auspressung: **1.076 a**
- Beginn der Radionuklidmobilisierung: **sofort (BHAW-3NW)**
- Beginn der Freisetzung aus den Einlagerungsbereichen: **sofort (BHAW-3NW)**
- Ende des Konvergenzprozesses: **nicht erreicht (BHAW-3NW)**
- Art des dominierenden Transportprozesses: **Advektion (und Diffusion)**

In diesem Rechenfall werden neben der Freisetzung aus BHAW-3NW auch aus dem benachbarten Segment BHAW-3NM Radionuklide freigesetzt. Andere Bereiche werden zwar noch erreicht, aber nicht vollständig gefüllt. Dies ist eine Abweichung gegenüber dem Rechenfall „Lösungseinschluss in einem Bohrloch mit BSK3“. In diesem Rechenfall sind alle Einlagerungsbereiche des entsprechenden BSK-Feldes gefüllt. Der Grund für diese Abweichung ist, dass die Konvergenz in den HAW-Bohrlöchern etwas schneller zu Ende geht als bei den BSK3, da hier ein kleineres Anfangsporenvolumen angenommen wird. Auf Grund der Berücksichtigung von 80 kg Metalmasse pro HAW-Kokille liegt das Resthohlraumvolumen zu Beginn der Rechnungen bei knapp 9 m³.

Die errechneten Freisetzungen sind deutlich geringer (Verschiebung der Abszisse in Abbildung 4.7) als beim Rechenfall „Lösungseinschluss in einem Bohrloch mit BSK3“. Das hat folgende Gründe:

- Das Einlagerungsfeld mit HAW-Kokillen ist deutlich weiter entfernt von den Verschlüssen. Auf dem daraus resultierenden längeren Transportweg zerfallen kurzlebige Radionuklide zu einem beträchtlichen Teil.
- Es werden nicht aus dem gesamten HAW-Feld Radionuklide freigesetzt (s.o.).
- I-129, das neben Cs-135 auf Grund seiner hohen Löslichkeit und hohen Halbwertszeit bei der Betrachtung längerer Zeiträume die Strahlenexpositionen bestimmt, ist beim Wiederaufbereitungsprozess zu einem großen Teil entfernt worden (Tab 3.3).



Bewertung des sicheren Einschlusses

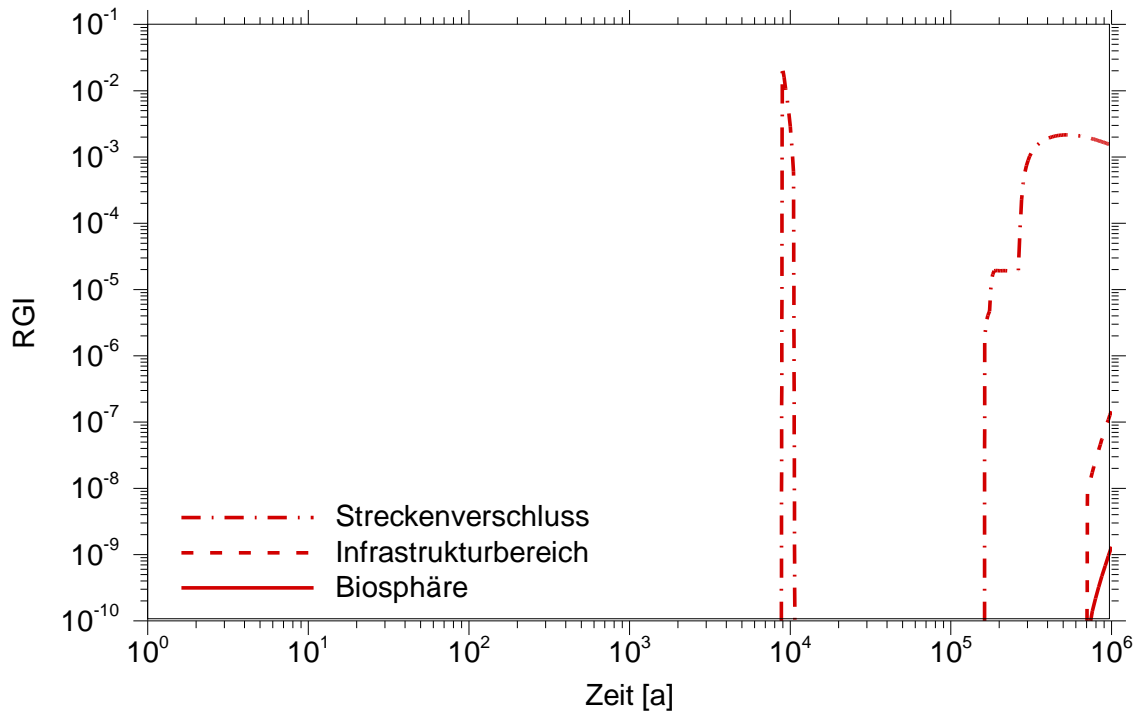


Abb. 4.7: RGI für den Rechenfall „Lösungseinschluss in einem Bohrloch mit HAW-Kokillen“

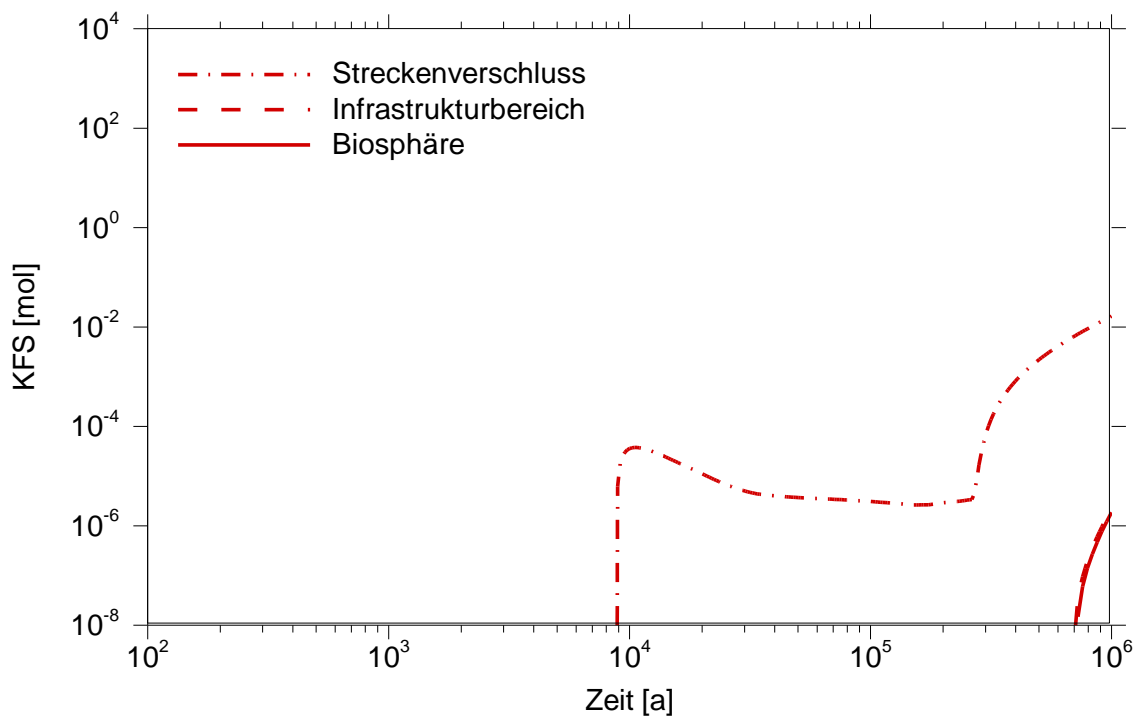
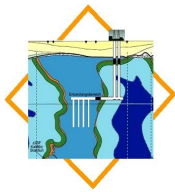


Abb. 4.8: Anteil der kumulierten freigesetzten Stoffmenge (KFS) für den Rechenfall „Lösungseinschluss in einem Bohrloch mit HAW-Kokillen“



Die berechneten RGI-Werte am Infrastrukturbereich und in der Biosphäre liegen bei 10^{-6} Sv/a, d.h. die Strahlenexpositionen sind kleiner als 10^{-10} Sv/a.

Abbildung 4.8 zeigt das deutlich spätere Eintreffen der Schadstofffront im Vergleich zum Rechenfall „Lösungseinschluss in einem Bohrloch mit BSK3“. Wie in diesem Rechenfall nimmt der KFS auf Grund der umgekehrten Strömungsrichtung zunächst wieder ab. Erst nach etwa 300.000 Jahren nimmt die kumulierte Stoffmenge wieder zu.

4.3.2.7 Lösungszutritt an einem Bohrloch mit CSD-C

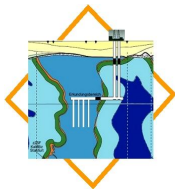
Der Rechenfall mit einem Lösungseinschluss an den CSD-C-Einlagerungsorten führt zu ähnlichen Ergebnissen bei der Bewertung der Transportprozesse wie der Rechenfall mit den HAW-Kokillen:

- Am Schacht ausgepresste Lösungsmenge nach 10^6 a: **50 m³**
- Beginn der Auspressung: **1.076 a**
- Beginn der Radionuklidmobilisierung: **sofort (BMAW-4NW)**
- Beginn der Freisetzung aus den Einlagerungsbereichen: **sofort (BMAW-4NW)**
- Ende des Konvergenzprozesses: **nicht erreicht (BMAW-4NW)**
- Art des dominierenden Transportprozesses: **Advektion und Diffusion**

Analog zu den HAW-Abfällen werden auch hier nur die zum Lösungseinschluss direkt benachbarten Einlagerungsbereiche vollständig gefüllt.

In Abbildung 4.9 sind die errechneten Ergebnisse der Radionuklidfreisetzung dargestellt. Die Kurve am Streckenschluss ist im Verlauf sehr ähnlich wie im Rechenfall mit HAW-Kokillen, der RGI-Wert ist aber um mehr als eine Größenordnung kleiner. Zwar befindet sich im CSD-C-Inventar mehr I-129 als beim HAW, dafür sind die Inventare der anderen relevanten Radionuklide deutlich geringer (vor allem Cs-135). Insgesamt nehmen die Inventare in den Segmenten gegenüber dem Rechenfall mit BSK3 und HAW-Kokillen daher deutlich ab. Diese Abnahme reicht aus, dass im Infrastrukturbereich die Konzentrationen so niedrig geworden sind, dass im Modell keine Radionuklidfreisetzung aus dem Schacht mehr berechnet wird.

Der Anteil der freigesetzten Stoffmenge ist für beide Abgrenzungen des ewG sehr gering (Abbildung 4.10): Am Streckenschluss werden nach 10^6 Jahren $2,5 \cdot 10^{-4}$ mol freigesetzt, das entspricht einem Anteil von ungefähr $5 \cdot 10^{-12}$ des eingelagerten Inventars. Am Infrastrukturbereich wird im Modell gar keine Freisetzung mehr ausgegeben.



Bewertung des sicheren Einschlusses

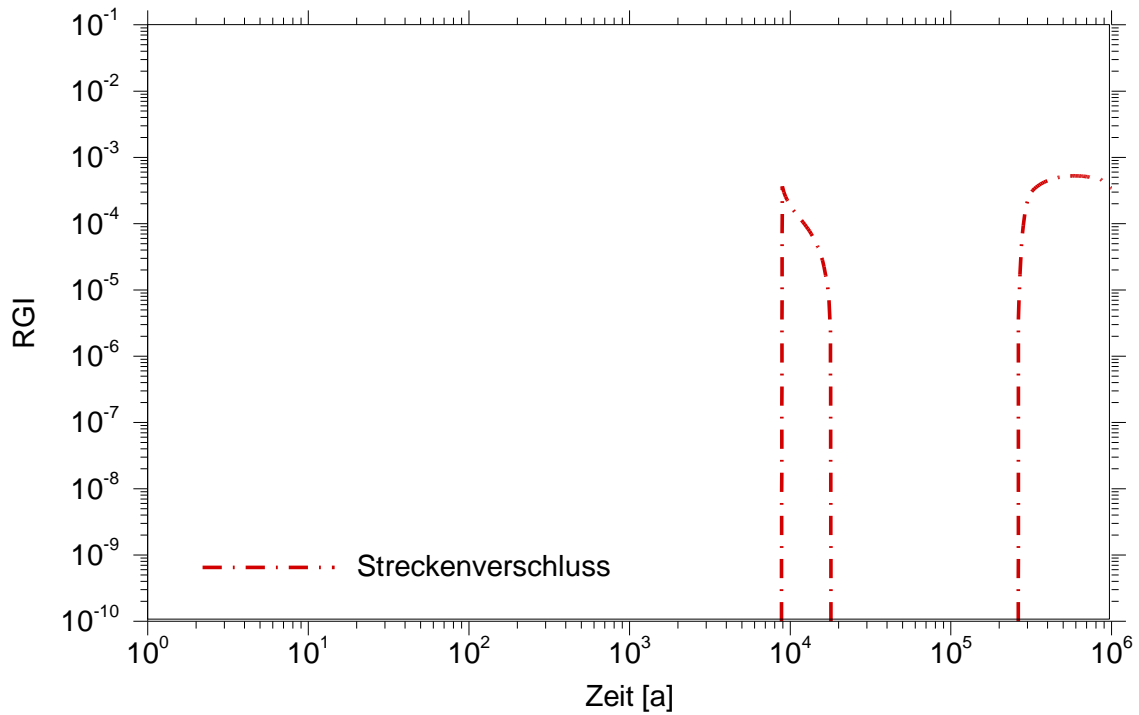


Abb. 4.9: RGI beim Rechenfall „Lösungseinschluss in einem Bohrloch mit CSD-C“

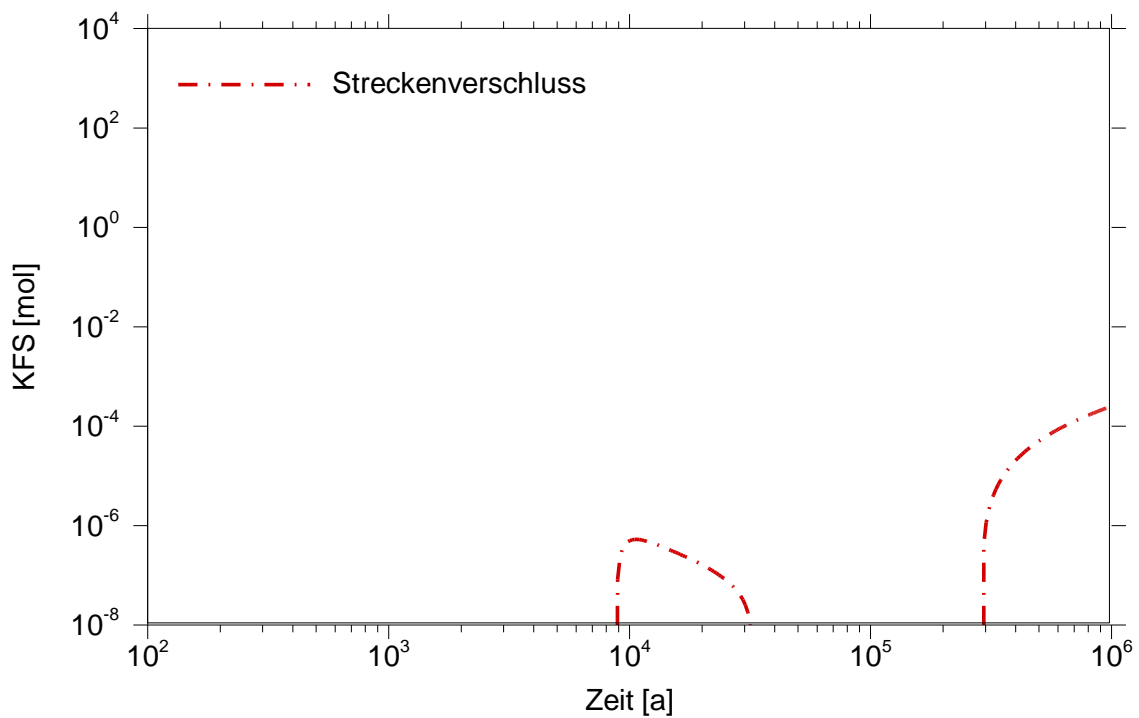
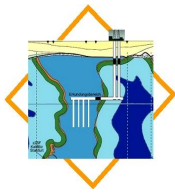


Abb. 4.10: Anteil der kumulierten freigesetzten Stoffmenge (KFS) für den Rechenfall „Lösungseinschluss in einem Bohrloch mit CSD-C“



4.4 Probabilistische Rechnungen

Eine rein deterministische Analyse eines komplexen Endlagersystems mit vielen Parametern ist nicht zielführend, da zu viele Einzelrechnungen ausgewertet werden müssten. Um das Verhalten komplexer Endlagersysteme besser beurteilen zu können, werden daher zusätzlich zu den deterministischen Rechnungen probabilistische Rechnungen durchgeführt. Dabei sollen vor allem die Ungewissheiten der Parameter untersucht werden, die relevant für die Ergebnisse sind. Dafür wurden sechs wichtige Parameter ausgewählt und diese in zwei probabilistischen Analysen als Zufallsgrößen mit einer vorgegebenen Verteilung interpretiert. Die Analysen wurden für

1. den Bezugsfall und
2. den Rechenfall „Effektive Restporosität im Bohrlochverschluss“

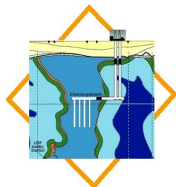
durchgeführt. Diese Rechenfälle wurden gewählt, da mit ihnen die unterschiedlichen Modellvorstellungen zum Verhalten der Versatzkompaktion bewertet werden können, das – wie in den vorangegangenen Kapiteln gezeigt werden konnte - eine wichtige Rolle bei der Beurteilung des Sicherheits- und Nachweiskonzeptes spielt.

Der Berechnungszeitraum für die probabilistischen Läufe beträgt wie bei den deterministischen Läufen 10^6 Jahre. Neben der Behandlung der Ungewissheiten wird auch die Sensitivität der einzelnen Parameter untersucht, d.h. die Eingangsparameter werden entsprechend ihres Einflusses auf die berechneten Konsequenzen in eine Rangfolge gebracht.

Die ausgewählten Parameter sind in Tabelle 4.9 aufgelistet. Der Auswahl der Parameter und der Zuweisung entsprechender Verteilungen konnten keine objektiven Kriterien zugrunde gelegt werden, sie basieren vielmehr auf Überlegungen und Ergebnissen von Sensitivitätsstudien aus vorangegangenen Untersuchungen (STORCK ET AL. 2004, BUHMANN ET AL. 2004 UND BUHMANN ET AL. 2008B). Die Permeabilitäten und die Lebensdauern der geotechnischen Komponenten wurden aus dem im Projekt ISIBEL erarbeiteten Sicherheitskonzept abgeleitet. Für die Referenzkonvergenzrate wurde keine gleichförmige sondern eine lognormale Verteilungsfunktion angenommen. Aus den in Tabelle 4.9 gesetzten Quantilen ergibt sich für die Referenzkonvergenzrate ein Erwartungswert von 0,017.

Insgesamt führt diese Untersuchung durch die Kombination der Parameter zu einem sehr weiten Spektrum an Rechenfällen. Darunter befinden sich auch Rechenfällen, die in einer deterministischen Untersuchung in die Kategorie „nicht zu betrachten“ einzuordnen wären, z.B. ein gleichzeitiger Ausfall beider Verschlussbauwerke.

Für die probabilistische Analyse wurde nur der RGI-Wert herangezogen. Eine probabilistische Berechnung von Indikatoren des Typs II oder III erfordert eine detaillierte



Überprüfung und gegebenenfalls eine Anpassung der verfügbaren statistischen Werkzeuge. Ziel dieser Projektphase ist es nicht, das Instrumentarium für probabilistischen Modellrechnungen zu testen. Diese Arbeiten sind im Rahmen des Nachfolgeprojektes ISIBEL-II vorgesehen. Aus den gleichen Gründen konnte nur die Ausgabe am Schachtverschluss untersucht werden, da die gegenwärtige Version des in EMOS eingesetzten Statistikprogramms (BUHMANN 1999) keine Ströme innerhalb des Grubengebäudes auswerten kann. Für die Ziele der Arbeiten im Rahmen dieses Berichtes reicht die gegenwärtige Version aber aus.

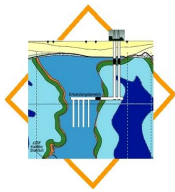
Tab. 4.10: Variierte Parameter für die probabilistischen Läufe

Parameter	Dimension	Verteilung	Minimum*	Maximum*
Permeabilität Schachtverschluss (nach Versagen)	m ²	logarithmisch gleichförmig	10 ⁻¹⁷	10 ⁻¹⁴
Zeitpunkt Versagen des Schachtverschlusses	a	gleichförmig	0	1.000
Permeabilität Streckenverschluss (nach Versagen)	m ²	logarithmisch gleichförmig	10 ⁻¹⁷	10 ⁻¹⁴
Zeitpunkt Versagen des Streckenverschlusses	a	gleichförmig	0	1.000
Grenzporosität (alle Segmente)	-	logarithmisch gleichförmig	0,001	0,02
Referenzkonvergenzrate	1/a	lognormal	0,005	0,05

* bei normalen und lognormalen Verteilungen die 0,001- und 0,999-Quantile

Im ersten probabilistischen Lauf (Bezugsfall) wurde in den 1.000 Realisationen keine Freisetzung festgestellt. Wie in den Untersuchungen in BUHMANN ET AL. 2008B gezeigt, müssen bei Modellen mit Einlagerungsbereichen, die einen Verschluss aus kompaktierendem Versatz besitzen, der nach wenigen Jahrzehnten bis Jahrhunderten eine Endporosität erreicht, die keine Transportprozesse mehr zulässt, sehr ungünstige Parameterkonstellationen angesetzt werden, damit Lösung in diesem kurzen Zeitraum diese Bereiche erreicht. Solche ungünstigen Konstellationen wurden in den 1.000 Ziehungen aus dem angegebenen Parameterraum nicht realisiert.

Im zweiten Lauf (Rechenfall "Effektive Restporosität im Bohrlochverschluss") liefern 262 der 1.000 Realisationen Freisetzungen von Radionukliden aus dem ewG. Bei allen Freisetzungen handelt es sich um diffusive Freisetzungen mit ähnlichen Verläufen wie in Abbildung 4.2.



Bewertung des sicheren Einschlusses

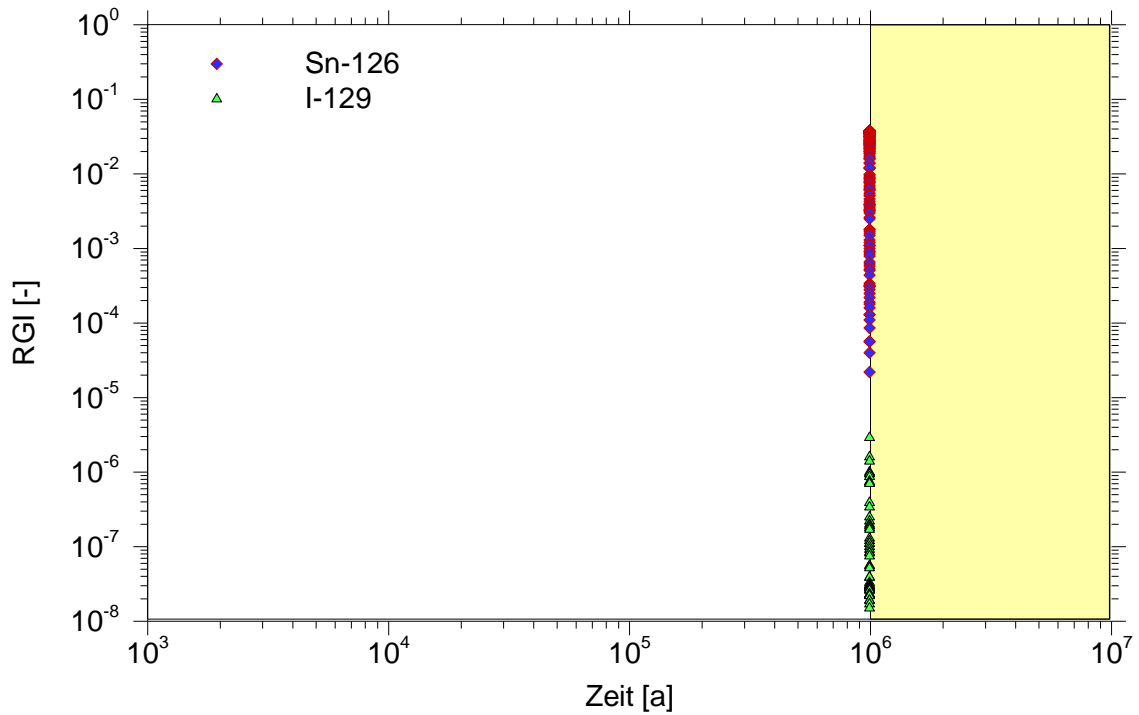


Abb. 4.11: Auftreten der Maximalkonzentrationen des RGI beim Rechenfall "Effektive Restporosität im Bohrlochverschluss"

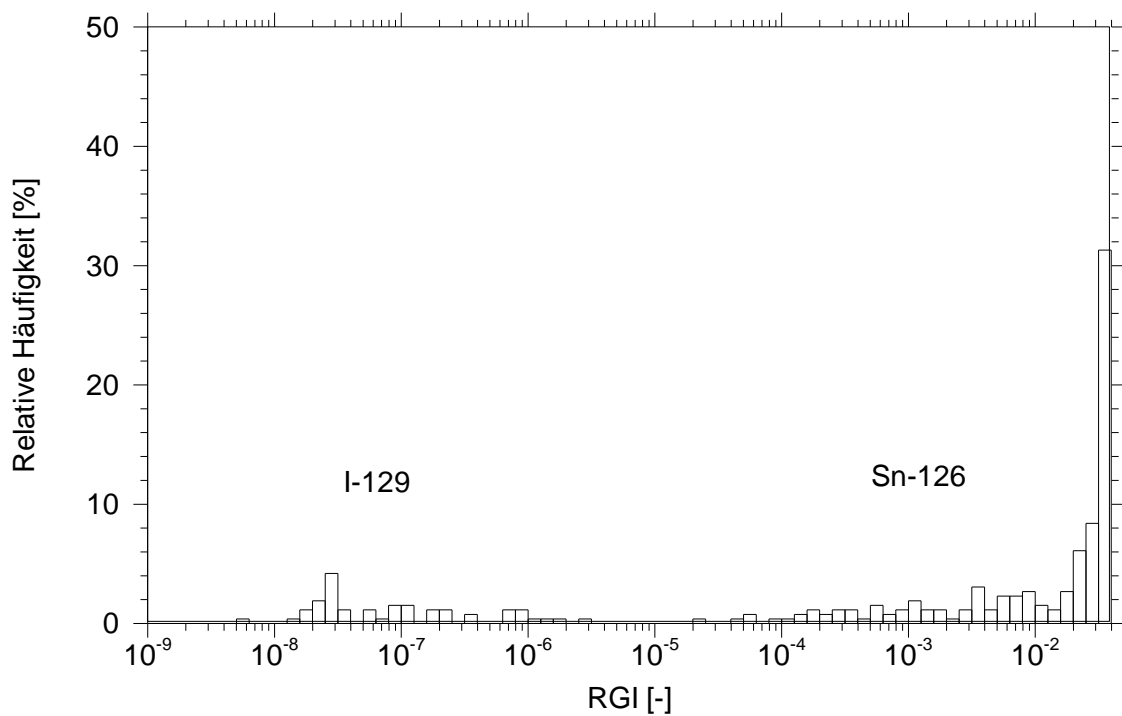
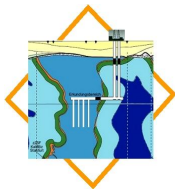


Abb. 4.12: Häufigkeitsverteilung der Maximalkonzentrationen des RGI beim Rechenfall "Effektive Restporosität im Bohrlochverschluss"

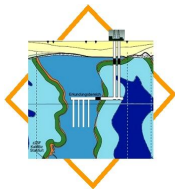


Die Auswertungen der maximalen Konzentrationen zeigen Maximalwerte von $3,8 \cdot 10^{-6}$ Sv/a (Abbildung 4.11, die Erweiterung der Abszisse auf 10^7 Jahre (gelb hinterlegte Fläche) dient lediglich der besseren Darstellung der Ergebnisse). Die höchsten RGI-Werte treten in allen Realisationen nach 10^6 Jahren auf. Mit 0,038 bleiben sie unter dem geforderten Kriterium von 1.

Die wichtigsten Radionuklide für die Realisationen mit Freisetzen sind Sn-126, I-129, Cs-135 und Th-229. Sn-126 spielt bei der vorliegenden Definition des RGI-Wertes eine besondere Rolle, da es von den dosisrelevanten Spalt- und Aktivierungsprodukten den höchsten Dosiskonversionsfaktor hat ($1,6 \cdot 10^{-5}$). Damit wird es durch die Wichtung zum bedeutsamsten Radionuklid für den RGI-Wert. Die höchsten Aktivitätsströme und Aktivitätskonzentrationen erreichen auf Grund ihrer langen Halbwertszeit und ihrer hohen Löslichkeit ansonsten die Radionuklide Cs-135 und I-129. Erst durch die hohe Wichtung mit den Dosiskonversionsfaktoren wird Sn-126 gegenüber I-129 (Faktor 28) und Cs-135 (Faktor 281) zum dominierenden Radionuklid in den Freisetzungsszenarien. Sn-126 macht etwa 75% des RGI-Wertes aus. Bei Berechnungen von Radiotoxizitäten mit Ingestionsdosiskoeffizienten tritt diese starke Wichtung des Sn-126 nicht auf (Faktor 0,046 gegenüber I-129 und 2,5 gegenüber Cs-135).

In einigen Rechnungen mit Radionuklidfreisetzungen wird kein Sn-126 aus dem ewG freigesetzt (alle Rechenfälle, in denen in Abbildung 4.11 I-129 als dominierendes Radionuklid gekennzeichnet ist). Hier handelt es sich um die Rechenfälle mit den geringsten Freisetzungen. Die Freisetzungen aus den Einlagerungsbereichen und die daraus resultierenden Konzentrationen sind insgesamt sehr gering und die meisten Konzentrationen der Radionuklide werden bei den Berechnungen von Freisetzungen aus dem Endlager vom Programm auf Null gesetzt. Die Ausnahme bilden die höheren Konzentrationen, vor allem von Cs-135 und I-129. Da die Wichtung mit den Dosiskonversionsfaktoren erst anschließend erfolgt, werden die Auswirkungen dieser Rechenfälle unterschätzt. Resultat ist die in Abbildung 4.11 dargestellte Aufteilung der Rechenfälle in zwei Bereiche. Diese Aufteilung ist ein numerisches Artefakt und wäre bei Berücksichtigung aller Konzentrationen (im vorliegenden Fall nur abhängig von Sn-126) nicht gegeben. Dann würden alle Rechenfälle in Abbildung 4.11 mit I-129 als dominierendem Radionuklid direkt am unteren Ende der oberen Punktreihe liegen (mit Sn-126 als dominierendem Radionuklid). Sollte eine genaue Auswertung von Radionuklidfreisetzungen mit solch niedrigen Konzentrationen gewünscht sein, ist eine Programmanpassung notwendig. Da bei der Bewertung des sicheren Einschlusses die maximal auftretenden Konzentrationen entscheidend sind, spielt diese Unterschätzung für die vorliegende Bewertung aber keine Rolle.

Zur besseren Darstellung der Ergebnisse nach 10^6 Jahren ist in Abbildung 4.12 die Häufigkeitsverteilung zu diesem Zeitpunkt aufgetragen. Die Häufigkeitsverteilung zeigt eine ungewöhnliche Form, da sie einerseits durch die bereits beschriebene Nullsetzung von sehr geringen Konzentrationen in den Modellen in zwei Bereiche aufgeteilt ist und andererseits die Maximalkonzentrationen bei den diffusiven Freisetzungen nach



10^6 Jahren noch nicht erreicht worden sind (siehe Abbildung 4.4). Der Großteil der maximalen RGI-Werte nach 10^6 Jahren liegt im Intervall zwischen 0,02 und 0,038.

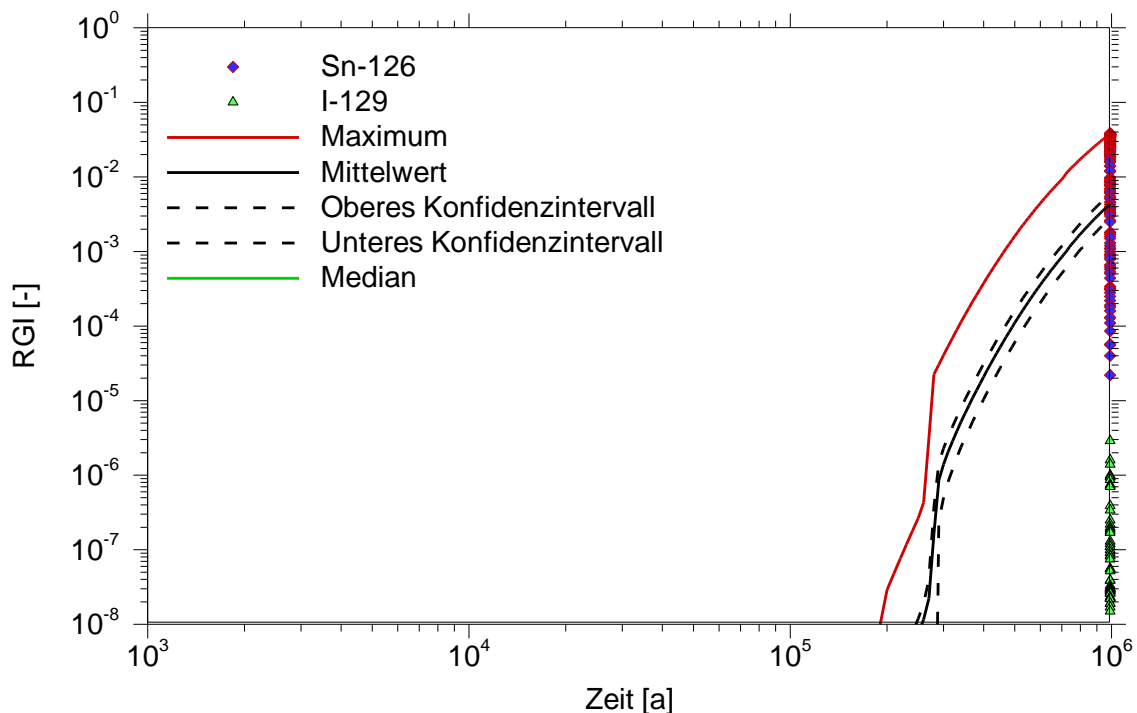


Abb. 4.13: Maximalkonzentrationen beim Rechenfall "Effektive Restporosität im Bohrlochverschluss"

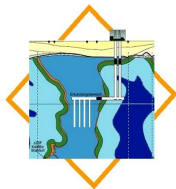
Abbildung 4.13 zeigt den zeitlichen Verlauf der Maximalkonzentration, des Mittelwertes mit oberem und unterem Konfidenzintervall (nur der Realisationen mit Freisetzungen) und des Medianwertes (dieser berücksichtigt alle Realisationen und ist auf Grund der vielen Nullemissionen für alle Zeitpunkte Null).

Die Sensitivitätsanalyse der variierten Parameter zeigt für die eingesetzten Methoden

1. SPEA: Spearman
2. PRCC: Partielle Korrelation
3. SRRC: Rangregression
4. SMIR: Smirnov-Test

die gleiche Rangfolge (Tabelle 4.10). Eine Beschreibung der Methoden ist z.B. in (BUHMANN ET AL. 2004) zu finden. Eine detaillierte Überprüfung und Bewertung der Methoden zur Sensitivitätsanalyse ist im Nachfolgeprojekt ISIBEL-II vorgesehen.

Aus Tabelle 4.11 ergibt sich, dass die Grenzporosität den einflussreichsten Parameter für den vorliegenden Rechenfall darstellt. Wie bereits in den deterministischen Läufen



Bewertung des sicheren Einschlusses

erkannt, spielt sie eine bedeutende Rolle für die Freisetzung der Radionuklide. In den Realisationen mit den höchsten Freisetzungsliegen die Grenzporosität in einem relativ engen Bereich zwischen 1,2 und 1,8%. In den sieben Realisationen mit den höchsten Freisetzungsliegen alle Grenzporositäten im Bereich zwischen 1,5 und 1,8% (Tabelle 4.12).

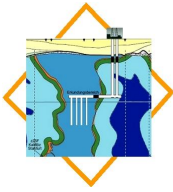
Tab. 4.11: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für den Rechenfall "Effektive Restporosität im Bohrlochverschluss"

Parameter	SPEA	PRCC	SRRC	SMIR	Summe
Grenzporosität (alle Segmente)	1	1	1	1	4
Zeitpunkt Schachtversagen	2	2	2	2	8
Referenzkonvergenzrate	3	3	3	3	12
Permeabilität Schachtverschluss (nach Ausfall)	4	4	4	4	16
Permeabilität Streckenverschluss (nach Ausfall)	5	5	5	5	20
Zeitpunkt Versagen des Streckenverschlusses	6	6	6	6	24

Tab. 4.12: Parameterwerte der sieben Realisationen mit den höchsten Freisetzungsliegen im Rechenfall "Effektive Restporosität im Bohrlochverschluss"

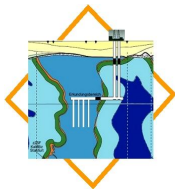
Realisation	RGI [nach 10^6 a]	P1 [%]	P2 [a]	P3 [1/a]	P4 [m ²]	P5 [m ²]	P6 [a]
990	$3,8 \cdot 10^{-2}$	1,56	17	$0,99 \cdot 10^{-2}$	$0,7 \cdot 10^{-15}$	$2,5 \cdot 10^{-15}$	915
38	$3,8 \cdot 10^{-2}$	1,53	262	$0,78 \cdot 10^{-2}$	$0,6 \cdot 10^{-15}$	$3,4 \cdot 10^{-17}$	272
248	$3,8 \cdot 10^{-2}$	1,69	124	$1,17 \cdot 10^{-2}$	$8,9 \cdot 10^{-15}$	$2,9 \cdot 10^{-17}$	803
983	$3,8 \cdot 10^{-2}$	1,78	75	$1,53 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{-15}$	$6,9 \cdot 10^{-17}$	81
408	$3,8 \cdot 10^{-2}$	1,66	14	$1,38 \cdot 10^{-2}$	$0,3 \cdot 10^{-15}$	$4,2 \cdot 10^{-17}$	701
963	$3,8 \cdot 10^{-2}$	1,73	231	$1,47 \cdot 10^{-2}$	$5,8 \cdot 10^{-15}$	$5,4 \cdot 10^{-17}$	199
637	$3,8 \cdot 10^{-2}$	1,67	170	$1,40 \cdot 10^{-2}$	$1,9 \cdot 10^{-15}$	$1,2 \cdot 10^{-17}$	521

P1: Grenzporosität (alle Segmente), P2: Zeitpunkt des Schachtversagen, P3: Referenzkonvergenzrate, P4: Permeabilität des Schachtverschlusses nach Ausfall, P5: Permeabilität des Streckenverschlusses (nach Ausfall), P6: Zeitpunkt Versagen des Streckenverschlusses



Mit den Ergebnissen aus den probabilistischen Rechnungen zeigt sich, dass auch bei einer Variation wichtiger Parameter die in den deterministischen Rechnungen gewonnenen Ergebnisse und daraus gezogenen Schlussfolgerungen ihre Gültigkeit behalten:

1. Bezugsfall: Bei keiner Realisation kommt es im Bezugsfall zu einer Freisetzung von Radionukliden aus dem ewG.
2. Rechenfall „Effektive Restporosität im Bohrlochverschluss“: Bei einem Viertel der Realisationen kommt es zu einer diffusiven Freisetzung aus dem ewG. Diese liegt bei allen Parameterkonstellationen deutlich unter dem Prüfwert. Die Grenzporosität ist bei den gegebenen Annahmen unter den sechs variierten Parametern der bei weitem einflussreichste Parameter.



5 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Sicherheitsanforderungen (BMU 2009) geben eine Definition für den ewG vor, der auch im Projekt ISIBEL gefolgt wird:

Der einschlusswirksame Gebirgsbereich (ewG) ist der Teil des Endlagersystems, der im Zusammenwirken mit den technischen Verschlüssen den Einschluss der Abfälle sicherstellt.

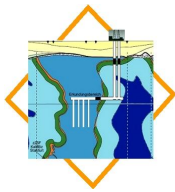
Des Weiteren wird in den Sicherheitsanforderungen gefordert, für den einschlusswirksamen Gebirgsbereich auf der Grundlage einer geowissenschaftlichen Langzeitprognose nachzuweisen, dass die Integrität dieses Gebirgsbereichs über den Nachweiszeitraum von 1 Million Jahre sichergestellt ist. Hierfür ist vom Antragsteller der einschlusswirksame Gebirgsbereich räumlich und zeitlich eindeutig zu definieren.

Auf der Grundlage des im Projekt ISIBEL erstellten Sicherheits- und Nachweiskonzeptes und der hier vorgestellten Ergebnisse für ein generisches Endlager in einem Salzstock in Norddeutschland wird folgende allgemeine räumliche und zeitliche Abgrenzung für den ewG in einem Salzstock vorgeschlagen:

Der einschlusswirksame Gebirgsbereich liegt in einem Teil des Salzstocks, der zum jeweiligen Betrachtungszeitpunkt nicht durch Subrosion oder Erosion beeinträchtigt werden kann. Im einschlusswirksamen Gebirgsbereich sind die Grubenbaue in ausreichendem Abstand zu geologischen Einheiten, die Wegsamkeiten zu grundwasserführenden Schichten ausbilden können, angeordnet.

Abbildung 5.1 verdeutlicht diese räumliche und zeitliche Ausweisung: Zum Salzspiegel hin ist der ewG dadurch begrenzt, dass die zum Betrachtungszeitpunkt abgelaufenen Subrosionsprozesse (eventuell auch Erosionsprozesse) einen Teil des Salzstockes beeinträchtigen bzw. auflösen. Unterhalb dieser Grenze (gestrichelte Linie) ist der ewG durch die Schichten begrenzt, die Wegsamkeiten zu grundwasserführenden Schichten im Deck- und Nebengebirge bilden können. Dies könnten beispielsweise bis zum Salzspiegel durchgehende Anhydritbänder sein.

Diese allgemeine Ausweisung des ewG gibt den möglichen Bereich vor, in dem der ewG liegen kann. Für den Nachweis des sicheren Einschlusses ist es sinnvoll, von Beginn an aus dem möglichen Bereich des ewG nur den Teilbereich als Bezugspunkt für den Nachweis auszuwählen, der auch am Ende des Nachweiszeitraumes nicht von Subrosions- oder Erosionsprozessen beeinträchtigt wird.



Zusammenfassung der Ergebnisse

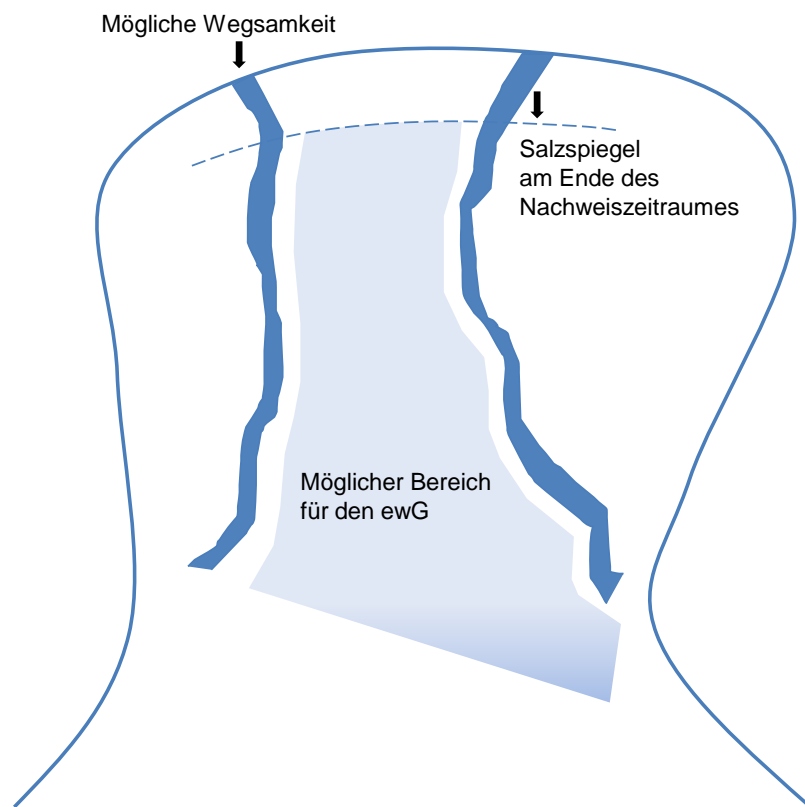
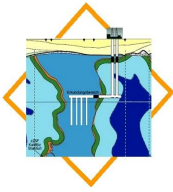


Abb. 5.1: Räumliche und zeitliche Abgrenzung des ewG in einem Salzstock

Spröde Gesteinsschichten (z.B. Anhydritbänder), bei denen ein hoher Viskositätskontrast zu den umliegenden Schichten vorliegt, zerbrechen in der Regel unter mechanischer Beanspruchung und bilden einzelne isolierte Schollen, die im umgebenden Gestein (Steinsalz) schwimmen (BORNEMANN ET AL. 2008). Diese Strukturen können nicht als durchgehende Wegsamkeiten betrachtet werden und stellen gemäß der gegebenen Definition keine Begrenzungen für einen ewG dar. Der Bereich, in dem der ewG liegen darf, kann dann auf einen größeren Bereich des Salzstockes ausgedehnt werden (Abbildung 5.2). Es muss aber darauf geachtet und nachgewiesen werden, dass einzelne Schollen den ewG nicht mit grundwasserführenden Schichten verbinden.

Das für das Sicherheitskonzept erstellte Endlagerkonzept und die durchgeführten Modellrechnungen basieren auf einer geologischen Situation wie in Abbildung 5.2. Die für den Bau des Endlagers notwendigerweise aufgefahrenen Strecken und Schächte, in denen zur Zeit nicht mit ausreichender Gewissheit angenommen werden kann, ob der dort eingebrachte Versatz die hydraulischen Eigenschaften des umgebenen Salzgesteins erreichen kann, sind in Abbildung 5.3 eingetragen. Bei Nachweis der Integrität der geologischen Barriere kann angenommen werden, dass der Großteil einer eventuellen Freisetzung von Radionukliden über die Strecken und Schächte erfolgen wird.



Zusammenfassung der Ergebnisse

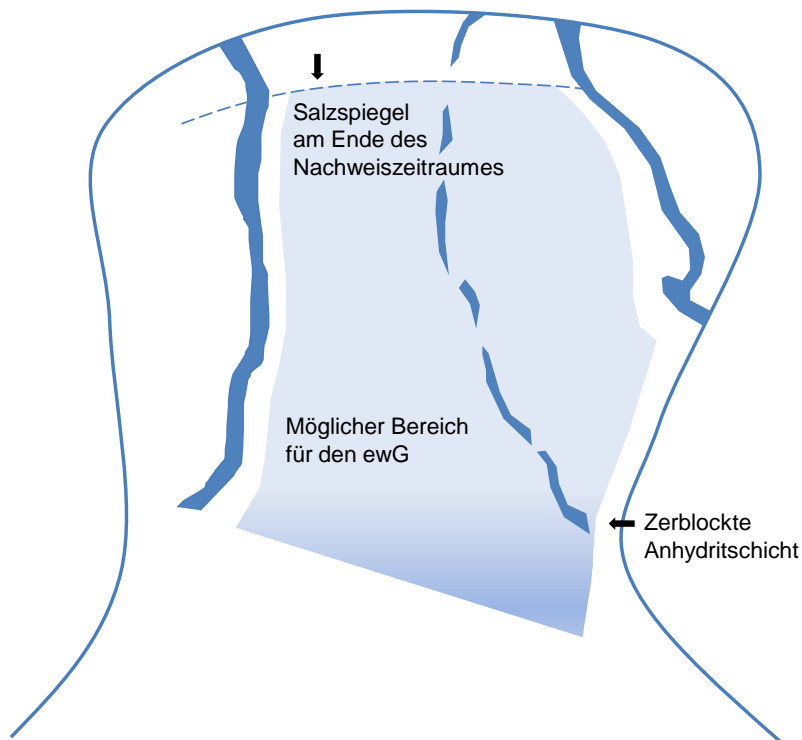


Abb. 5.2: Räumliche und zeitliche Abgrenzung des ewG in einem Salzstock mit zerblockter Anhydritstruktur im ewG

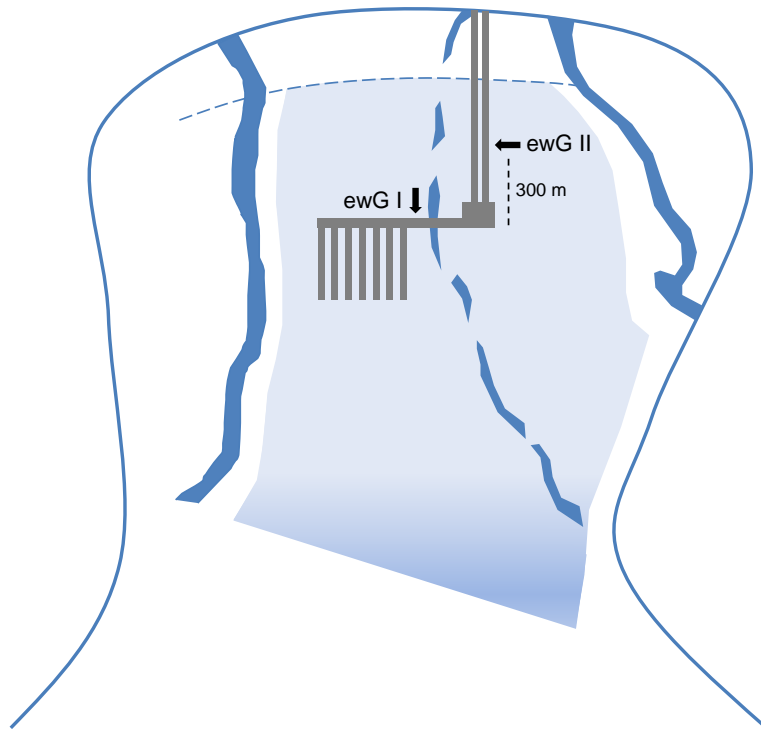
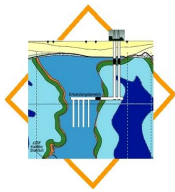


Abb. 5.3: Die in den Modellrechnungen berücksichtigten räumlichen und zeitlichen Abgrenzungen des ewG



Zusammenfassung der Ergebnisse

Bei den beiden Abbildungen 5.2 und 5.3 wurde das westliche Anhydritband als durchgehende Wegsamkeit dargestellt, obwohl erwartet werden kann, dass es genau wie das östliche Band in isolierte Einzelschollen zerbrochen ist (siehe Abbildung 3.1). Diese Darstellung wurde gewählt, da die Frage der Zerblockung des westlichen Anhydritbandes keinen Einfluss auf das vorgestellte Nachweiskonzept hat und zum gegenwärtigen Zeitpunkt auch noch nicht nachgewiesen ist.

Für die Gegebenheiten am Referenzstandort wurden gemäß der beschriebenen geologischen Situation entlang der Strecken und Schächte zwei Abgrenzungen für den ewG getestet (Abbildung 5.3):

1. Der ewG endet an der Grenze des Hauptsalzes zu den spröderen Anhydritschollen (ewG I).
2. Der ewG umfasst den Bereich des Endlagerbergwerkes, der während des Nachweiszeitraums nicht von Subrosion betroffen ist (ewG II).

Als Bewertungsgrundlage für den sicheren Einschluss wurden drei Indikatoren getestet, um die folgenden Bereiche abzudecken:

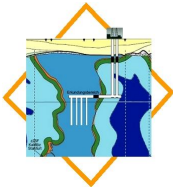
1. Bewertung der hydraulischen Verhältnisse im Endlagersystem. Es werden folgende Fragen beantwortet: Kommt es zu einem Zutritt von Lösung zu den Einlagerungsbereichen? Werden Radionuklide mobilisiert und aus den Einlagerungsbereichen freigesetzt?

An Hand der Beantwortung dieser Fragen kann für viele betrachtete Fälle bereits der sichere Einschluss nachgewiesen werden. Das höchste Maß an Sicherheit bieten dabei die Entwicklungen des Endlagersystems, bei denen es nicht zu einem Kontakt zwischen Lösung und Abfällen kommt. Aber auch nach einem erfolgten Kontakt, kommt es nicht zwangsläufig zu einer Freisetzung von Radionukliden.

Erfolgt eine Freisetzung von Radionukliden müssen Indikatoren herangezogen werden, um diese Freisetzung zu bewerten:

2. Bewertung der Radionuklidfreisetzung am Rand des ewG. Mit Hilfe des RGI-Wertes wird das Ausmaß der Freisetzung von Radionukliden aus dem ewG in Relation zu einem Maximalwert, der noch als geringfügig betrachtet wird, gesetzt. Als Bemessungsgrenze für die Geringfügigkeit der Radionuklidfreisetzungen aus dem ewG dient ein Wert von 0,1 mSv/a.

Die Strahlenexposition in der Biosphäre kann im Zusammenhang mit diesem Indikator berücksichtigt werden oder aber als eigenständiger Indikator angesehen werden. Auf Grund des Bezuges dieses Indikators zu StrSchV, sollte er aber grundsätzlich zur Bewertung des sicheren Einschlusses einbezogen werden.



Zusammenfassung der Ergebnisse

3. Bewertung der Isolationswirkung: Welcher Anteil des eingebrachten Abfalls verbleibt innerhalb des ewG? Hier ist vor allem die Auswertung des Zeitverlaufes des freigesetzten Radionuklidanteils sehr anschaulich.

Bei der Auswertung der Rechenfälle in diesem Bericht zeigte sich, dass die Bewertung des sicheren Einschlusses nur mit den ersten beiden Indikatoren plausibel durchgeführt werden kann. Die Bewertung der Isolationswirkung mit Hilfe des KFS-Wertes ist in der hier vorgestellten Darstellung ein anschaulicher Performanceindikator, hilft aber bei der Beurteilung des sicheren Einschlusses nicht weiter, da es nicht möglich ist, sicherheitsrelevante Bewertungsmaßstäbe zu definieren. Daher wird der KFS-Wert nicht in das Nachweiskonzept mit aufgenommen.

Aus dem gleichen Grund wird man auch keine Indikatoren des Typs 2, bei denen die freigesetzte Menge aus dem ewG mit natürlich vorhandenen Konzentrationen entweder lokal am Standort (natürliche Radionuklidkonzentrationen in tiefen Grundwässern) und/oder regional (Wasserqualität in oberflächennahen Grundwässern) verglichen wird, in das Nachweiskonzept aufnehmen. Mit solchen Indikatoren kann zwar gezeigt werden, inwieweit die natürlich vorliegenden Bedingungen durch eine Freisetzung aus dem Endlager geändert werden. Eine sicherheitsrelevante Bewertungsgröße ist daraus aber wahrscheinlich nur sehr schwer abzuleiten.

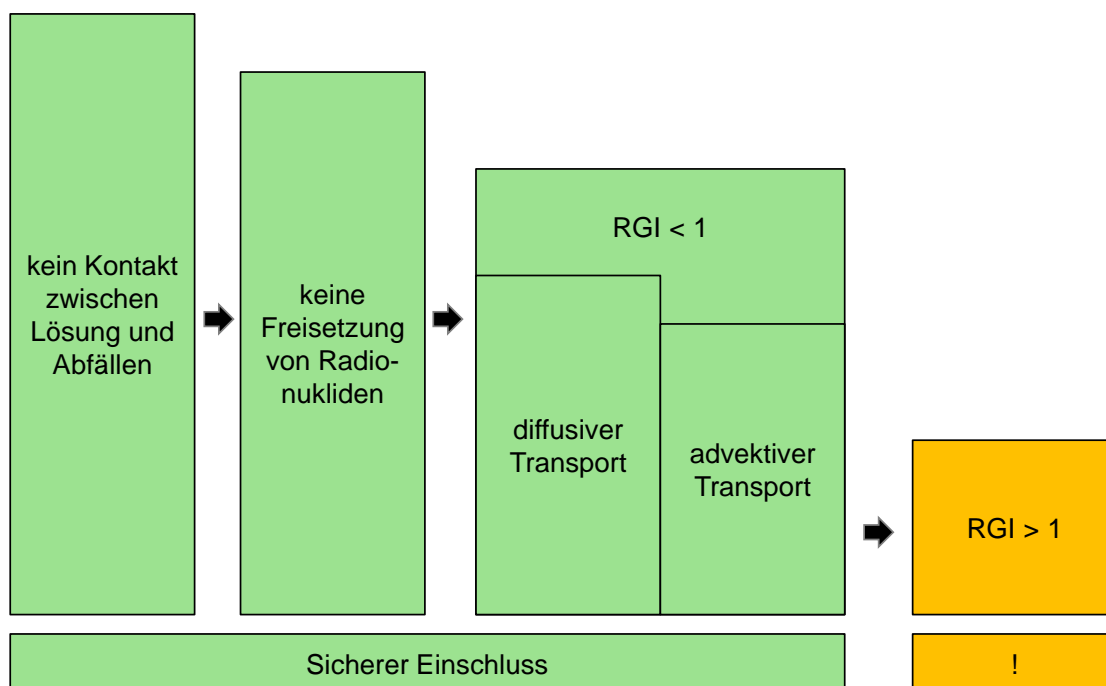
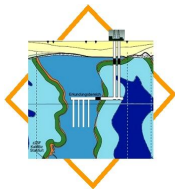


Abb. 5.4: Methodik zum Nachweis des sicheren Einschlusses

Daher wird ein Konzept vorgeschlagen, dass die Bewertung der hydraulischen Verhältnisse (eindringende Lösungsmengen, dominierende Transportprozesse) mit der Bewertung der Radionuklidfreisetzung verbindet. Im Prinzip würde eine Betrachtung



Zusammenfassung der Ergebnisse

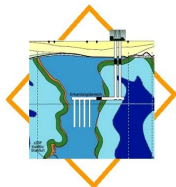
ausschließlich über den RGI-Wert ausreichen, um den sicheren Einschluss zu bewerten. Dabei würde aber eine Menge an Informationen verloren gehen, die Aussagen über die Qualität des sicheren Einschlusses zulassen. So ist z.B. der sichere Einschluss bei dem keine Lösung zu den Abfällen gelangt, höher zu bewerten als ein sicherer Einschluss bei dem zwar Radionuklide freigesetzt werden, diese aber den ewG nie verlassen. Beide Fälle ergeben aber einen RGI von Null und wären bei einer rein quantitativen Betrachtung über den RGI-Wert identisch.

Aus diesem Grund ist das hier vorgeschlagene Konzept als gestuftes Verfahren angelegt (Abbildung 5.4):

1. Zuerst wird untersucht, ob die eingelagerten radioaktiven Abfälle überhaupt mit Lösungen in Kontakt kommen. Ist dies nicht der Fall, ist der sichere Einschluss gegeben. Dies ist der qualitativ beste Nachweis für den sicheren Einschluss.
2. Kommt es zu einem Kontakt zwischen Lösung und Abfällen, wird im nächsten Schritt untersucht, ob es zu einer Freisetzung von Radionukliden aus dem ewG kommt. Werden keine Radionuklide freigesetzt, ist der sichere Einschluss ebenfalls gegeben.
3. Kommt es zu einer Freisetzung von Radionukliden aus dem ewG, wird der RGI-Wert zur Beurteilung herangezogen. Bleibt dieser Wert unter 1, ist die Freisetzung als geringfügig einzustufen und der sichere Einschluss ist gegeben. Hierbei kann noch unterschieden werden, ob der maximale RGI durch advektiven oder diffusiven Transport von Radionukliden hervorgerufen wurde. Bei diesem Vergleich wird der in der Regel deutlich langsamer ablaufende diffusive Transportprozess als sicherer eingestuft.
4. Bei RGI-Werten größer 1, ist der sichere Einschluss nach diesem Ansatz nicht nachgewiesen. In diesem Fall ergibt sich die Notwendigkeit, durch weitere Untersuchungen die Relevanz der Freisetzung zu bewerten, z.B. durch Berechnung der Strahlenexposition in der Biosphäre auf der Grundlage der heutigen Zustände im Deckgebirge und der Biosphäre.

Sowohl die Bezugsgröße der Geringfügigkeit als auch die Berücksichtigung einer Verdünnung der aus dem Endlager austretenden Lösungsmengen sind in einem Langzeitsicherheitsnachweis detaillierter zu begründen als das in diesem Bericht geschehen ist. Hier wurden konservative Werte angenommen, insbesondere für die Verdünnung. Die in diesem Bericht vorgestellte Methodik ist von Veränderungen der entsprechenden Werte nicht betroffen.

Tabelle 5.1 stellt die mit diesem Konzept durchgeführte Bewertung der in diesem Bericht untersuchten Rechenfälle zusammen. Obwohl es sich bei diesen Rechenfällen nicht um das Ergebnis einer abgeschlossenen Szenarienentwicklung handelt, lassen sich aussagekräftige Schlüsse hinsichtlich der Methodik ziehen. Die Ergebnisse sind aber nicht als Bewertung eines bestimmten Standortes zu sehen.



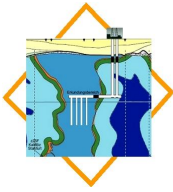
Zusammenfassung der Ergebnisse

Bei der Bewertung des sicheren Einschlusses der eingelagerten Abfälle innerhalb der beiden untersuchten ewG fällt auf, dass für den ewG II (am Infrastrukturbereich) sowohl im Bezugsfall als auch in den weiteren Rechenfällen der sichere Einschluss nachgewiesen werden kann. Es kommt zu keinen advektiv angetriebenen Freisetzungen aus diesem Bereich. Das gilt auch für die Ergebnisse aus den probabilistischen Rechnungen. Die diffusiven Freisetzungen in einigen Rechenfällen erfolgen zu sehr späten Zeitpunkten und die berechneten RGI-Werte am Rande des ewG sind äußerst gering. Dieses ist vor allem auf den Abstand zwischen der Grenze des ewG und den Abfällen auf der einen Seite und den lösungsgefüllten Restporenraum im Infrastrukturbereich auf der anderen Seite zurückzuführen. Die Lösungsmenge im Infrastrukturbereich ist ein wichtiger Verdünnungsfaktor bei der Ausbreitung der Radionuklidströme.

Tab. 5.1: Anwendung des Nachweiskonzeptes auf die untersuchten Rechenfälle

Kriterium		ewG I	ewG II
Kein Kontakt zwischen Lösung und Abfällen		Bezugsfall Ausfall Schachtverschluss	Bezugsfall Ausfall Schachtverschluss
Keine Freisetzung von Radionukliden		Ausfall Streckenverschluss	Ausfall Streckenverschluss Lösungseinschluss z2/z3
RGI < 1	diffusiv	Lösungseinschluss z2/z3	Lösungseinschluss CSD-C Lösungseinschluss HAW Lösungseinschluss BSK3 Effektive Porosität im Bohrlochverschluss
	advektiv	Lösungseinschluss CSD-C Lösungseinschluss HAW	
RGI > 1		Lösungseinschluss BSK3 Effektive Porosität im Bohrlochverschluss	

Diese beiden Vorteile sind bei der Betrachtung des ewG I (am Streckenverschluss) nicht gegeben. Der Bezugsfall führt zwar wie beim ewG II zu keinen Freisetzungen. Dafür überschreiten bei zwei untersuchten Rechenfällen die Radionuklidfreisetzungen die gesetzten Kriterien. So kommt es z.B. bei Unterstellung eines Lösungseinschlusses in einem Einlagerungsbereich, der sich nahe am Streckenverschluss befindet (Rechenfall: Lösungseinschluss in einem Bohrloch mit BSK3), nach etwa 1.000 Jahren relativ früh zu advektiven Radionuklidströmen aus dem Streckenverschluss. Es ergeben sich RGI-Werte, die über dem Prüfwert liegen. Die Radionuklide verlassen aber nicht das Grubengebäude sondern werden durch einströmende Lösung wieder in den Einlagerungsbereich zurückgedrängt. Obwohl in diesem Rechenfall nur eine sehr geringe Menge an Radionukliden das Endlagergebäude verlässt, werden beim ewG I aber formal gesehen die Kriterien für den sicheren Einschluss nicht eingehalten.

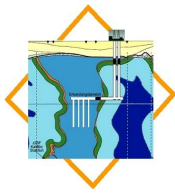


Zusammenfassung der Ergebnisse

Aus den Untersuchungen wird abgeleitet, dass für den Nachweis des sicheren Einschlusses der Radionuklide im ewG eine sachgerechte Ausweisung der räumlichen Ausdehnung des ewG erforderlich ist. Wünschenswert ist eine nicht zu große Ausdehnung des ewG, da dem ewG-Konzept inhärent der Gedanken des Konzentrierens der Abfälle innewohnt und außerdem der Nachweis der Integrität der geologischen Barriere und der Unversehrtheit des ewG über den Nachweiszeitraum dann prinzipiell leichter durchzuführen ist. Der ewG sollte aber auch räumlich nicht so eng gefasst werden, dass es aufgrund der Prozessabläufe im Grubengebäude formal zur Verletzung eines Geringfügigkeitskriteriums kommt, obwohl keine Radionuklide den unmittelbaren Endlagernahbereich verlassen. Vom Antragsteller für ein Endlager ist zu belegen, dass mit dem Sicherheits- und Nachweiskonzept bei der für den ewG ausgewiesenen räumlichen Ausdehnung ein plausibler und robuster Nachweis für den sicheren Einschluss der Radionuklide geführt werden kann.

Für das Nachweiskonzept im Projekt ISIBEL ist der ewG II ein geeigneter Bereich. Unter der Voraussetzung, dass die Integrität des Wirtsgesteins gezeigt werden kann, bietet dieser Bereich sowohl ein ausreichendes Maß an Sicherheit gegenüber einwirkenden Subrosions- oder Erosionsprozessen als auch an Robustheit bei der Berechnung möglicher alternativer Entwicklungen. Der Teil der geologischen Barriere, der dabei außerhalb des ewG liegt, bietet einerseits eine Sicherheitsreserve, wenn für diesen Bereich der Integritätsnachweis ebenfalls erbracht wurde, und dient andererseits dazu, den ewG vor äußeren Einflüssen zu schützen. Gegenüber dem ewG I ist für den ewG II allerdings die Integrität des Wirtsgesteins für einen größeren Bereich des Salzstockes zu zeigen. Es ist dann insbesondere auf die Lage, Größe und Abstand der Anhydritschollen einzugehen.

Im Sicherheitskonzept (BUHMANN ET AL. 2008A) ist derzeit ein einzelner Schachtverschluss vorgesehen. Da der Großteil eventueller Freisetzungen aus dem ewG über die Strecken und Schächte erfolgen wird, könnte ein zweiter Schachtverschluss zusätzliche Sicherheit bieten. Ein weiteres Ergebnis der Diskussion im Zusammenhang mit dem Nachweiskonzept für den sicheren Einschluss ist die Prüfung der technischen Realisierbarkeit eines solchen zusätzlichen Verschlusses und dessen Einfluss auf das Sicherheitskonzept im Nachfolgeprojekt ISIBEL-II.



6 Glossar

Anfangsporosität: Porosität, mit der der Versatz ins Grubengebäude eingebracht wird.

Einschlusswirksamer Gebirgsbereich: Teil des Endlagersystems, der im Zusammenwirken mit den technischen Verschlüssen (Schachtverschlüsse, Kammerabschlussbauwerke, Dammbauwerke, Versatz, ...) den Einschluss der Abfälle sicherstellt.

Endporosität: Porosität, bei dem der Versatz durch Konvergenz so weit kompaktiert ist, dass keine effektive Porosität für Transportprozesse zur Verfügung steht.

Grenzporosität: Effektive Porosität, bei dem der Versatz Konvergenz so eine Stützwirkung aufgebaut hat, dass keine weitere Konvergenz mehr stattfinden kann. Die verbleibende Porosität steht für Transportprozesse zur Verfügung.

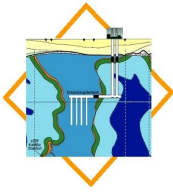
Integrität: Fähigkeit eines Bereiches, das Eindringen von Fluiden aus dem Deck- und Nebengebirge in das Endlagerbergwerk sowie gegebenenfalls das Austreten von Fluiden aus dem Endlagerbergwerk dauerhaft zu verhindern oder zumindest stark zu behindern.

Nachweiskonzept: Das Nachweiskonzept beschreibt, an Hand welcher Kriterien die Funktionsfähigkeit der im Sicherheitskonzept definierten Komponenten nachgewiesen werden soll.

Referenzporosität: Porosität, ab deren Unterschreitung die Konvergenz durch das Materialgerüst behindert wird (Stützwirkung des Versatzes). In den vorgenommenen Untersuchungen ist die Referenzporosität gleich der Anfangsporosität, d.h. die Abhängigkeit der Konvergenz von der Porosität wird von Anfang an berücksichtigt.

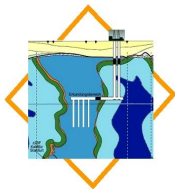
Sicherer Einschluss: Als Sicherer Einschluss wird eine Sicherheitsfunktion des Endlagersystems bezeichnet, die dadurch charakterisiert ist, dass die radioaktiven Abfälle in einem definierten Gebirgsbereich so eingeschlossen sind, dass sie im wesentlichen am Einlagerungsort verbleiben und allenfalls geringe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

Sicherheitskonzept: Das Sicherheitskonzept für ein Endlager konkretisiert die Umsetzung zur Erreichung der allgemein formulierten sicherheitlichen Zielsetzungen. Unter Beachtung der standortspezifischen Gegebenheiten und der jeweils geltenden nationa-



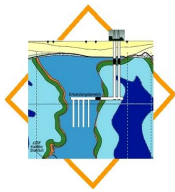
len Regelungen definiert es die zu betrachtenden Komponenten eines Endlagersystems, die zur Sicherheit dieses Systems beitragen.

Vollständiger Einschluss: Als Vollständiger Einschluss wird eine Sicherheitsfunktion des Endlagersystems bezeichnet, die dadurch charakterisiert ist, dass die radioaktiven Abfälle in einem definierten Gebirgsbereich so eingeschlossen sind, dass sie am Einlagerungsort verbleiben und keine Stoffmengen diesen Gebirgsbereich verlassen.

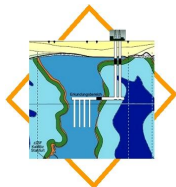


7 Literatur

- ALLGEMEINE VERWALTUNGSVORSCHRIFT (AVV 1990) ZU §45 STRAHLENSCHUTZ-VERORDNUNG: Ermittlung der Strahlenexposition durch die Ableitung radioaktiver Stoffe aus kerntechnischen Anlagen oder Einrichtungen (21. Februar 1990). Erschienen im Bundesanzeiger, 42. Jg. Nummer 64a.
- BALTES, B., RÖHLIG, K.-J., KINDT, A. (2007): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-A-3358, Köln.
- BALTES, B. (2008): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen. atw 53, vol. 2, pp.92-96.
- BECKER, D.-A., BUHMANN, D., STORCK, R., ALONSO, J., CORMENZANA, J.-L., HUGI, M., VAN GEMERT, F., O'SULLIVAN, P., LACIOK, A., MARIVOET, J., SILLEN, X., NORDMAN, H., VIENO, T., NIEMEYER, M. (2003): Testing of Safety and Performance Indicators (SPIN), EUR 19965 EN, European Commission, Brussels.
- BUNDESMINISTERIUM DES INNERN (BMI 1983): Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk. – RdSchr. D. BMI v. 20.4.1983 – RS – AGK 3-515 790/2, GMBI.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (BMU 2009): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle. BMU, Berlin, Juli 2009.
- BOLLINGERFEHR, W., FILBERT, W., PÖHLER, M., THOLEN, M., WEHRMANN, J. (2008): Konzeptionelle Endlagerplanung und Zusammenstellung des endzulagernden Inventars. DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine.
- BORNEMANN, O., BEHLAU, J., FISCHBECK, R., HAMMER, J., JARITZ, W., KELLER, S., MINGERZAHN, G., SCHRAMM, M. (2008): Standortbeschreibung Gorleben Teil 3 - Ergebnisse der über- und untertägigen Erkundung des Salinars. Geologisches Jahrbuch Reihe C, Band C 73, Hannover.
- BUHMANN, D., NIES, A., STORCK, R. (1991): Analyse der Langzeitsicherheit von Endlagerkonzepten für wärmeerzeugende radioaktive Abfälle. GSF-Bericht 27/91. GSF – Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit GmbH, Braunschweig.
-



- BUHMANN, D. (1999): Das Programmpaket EMOS - Ein Instrumentarium zur Analyse der Langzeitsicherheit von Endlagern. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-159, Braunschweig.
- BUHMANN, D., BECKER, D.-A., KEESMANN, S., KRÖHN, K.-P., RÜBEL, A. (2004): Aktualisierung sicherheitsanalytischer Rechenprogramme für Teilsystem eines Endlagers. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-200, Braunschweig.
- BUHMANN, D., MÖNIG, J., WOLF, J., HEUSERMANN, S., KELLER, S., WEBER, J. R., BOLLINGERFEHR, W., FILBERT, W., KREIENMEYER, M., KRONE, J., THOLEN, M. (2008A): Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW – ISIBEL. Gemeinsamer Bericht von DBE TECHNOLOGY GmbH, BGR und GRS. DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine.
- BUHMANN, D., MÖNIG, J., WOLF, J. (2008B): Untersuchung und Ermittlung von Freisetzungsszenarien – Teilbericht zum Projekt ISIBEL: "Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW". Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-233, Braunschweig.
- CADELLI, N., COTTONE, G., ORLOWSKI, S., BERTOZZI, G., GIRARDI, F., SALTELLI, A. (1988): PAGIS: Performance Assessment of Geological Isolation Systems for Radioactive Waste – Summary Report. EUR Report 11775 EN, Luxemburg.
- HEUSERMANN, S. (2007): Langzeitsicherheitsanalyse für ein HAW-Endlager im Salz - Nachweis der Integrität der geologischen Barriere. Technischer Bericht, Tagebuchnummer 10402/08, BGR, Hannover.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA 2006): Geological Disposal of Radioactive Waste. Safety Requirements No. WS-R-4, IAEA, Wien.
- KELLER, S. (2007): Langzeitsicherheitsanalyse für ein HAW-Endlager im Salz – Geologisches Referenzmodell für einen HAW-Endlagerstandort im Salz – Technischer Bericht. Beitrag für das Projekt ISIBEL. BGR, Tagebuchnummer 11614/05, Hannover.
- KREIENMEYER, M., LERCH, C., POLSTER, M., THOLEN, M. (2008): Nachweiskonzept zur Integrität der einschlusswirksamen technischen Barrieren. DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine.



- MÜLLER-LYDA, I., BIRTHLER, H., FEIN, E. (1999): Ableitung von Permeabilitäts-Porositätsrelationen für Salzgrus. GRS-148, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Braunschweig.
- NUCLEAR ENERGY AGENCY (NEA 2004): The Handling of Timescales in Assessing Post-Closure Safety, Lessons Learnt from the April 2002 Workshop in Paris, France, NEA/OECD, Paris.
- NOSECK, U., BREWITZ, W., BECKER, D.-A., BUHMANN, D., FAHRENHOLZ, C., FEIN, E., HIRSEKORN, R.-P., KEESMANN, S., KRÖHN, K.-P., MÜLLER-LYDA, I., RÜBEL, A., SCHNEIDER, A., STORCK, R. (2005): Wissenschaftliche Grundlagen zum Nachweis der Langzeitsicherheit von Endlagern. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-204, Braunschweig.
- PRÖHL, G., GERING, F. (2002): Dosiskonversionsfaktoren zur Berechnung der Strahlenexposition in der Nachbetriebsphase von Endlagern nach dem Entwurf der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zu § 47 Strahlenschutzverordnung in Anlehnung an die Vorgehensweise im Rahmen des Planfeststellungsverfahrens des geplanten Endlagers Konrad. GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, Institut für Strahlenschutz, Neuherberg.
- REAKTOR-SICHERHEITSKOMMISSION (RSK 2008): Gemeinsame Stellungnahme der RSK und der SSK zum GRS-Bericht „Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen“. 408. Sitzung, 09.05.2008, <http://www.rskonline.de/>.
- STORCK, R., BECKER, D.-A., BUHMANN, D., HIRSEKORN, R.-P., MEYER, T., NOSECK, U., RÜBEL, A. (2004): Endlager Morsleben - Modellrechnungen zur Langzeitsicherheit mit dem Rechenprogramm EMOS. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-A-3185, Braunschweig.
- WEBER, J.R., KELLER, S. (2008): FEP-Generierung und Szenarienentwicklung – Stand November 2006. BGR, Hannover, Tagebuchnummer 10402/08.
- WOLF, J., RÜBEL, A., NOSECK, U., BECKER, D.-A. (2008): Safety and performance indicators for repositories in clay and salt formations. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-240, Braunschweig.