

**Bewertung der Wirksamkeit  
des Radionuklideinschlusses  
für ein Endlager in flach  
lagernden Salzformationen**

## **Bewertung der Wirksamkeit des Radionuklideinschlusses für ein Endlager in flach lagernden Salzformationen**

### **Ergebnisse aus dem Vorhaben KOSINA**

Jonathan Kindlein  
Dieter Buhmann  
Jörg Mönig  
Sabine Spießl  
Jens Wolf

Oktober 2018

#### **Anmerkung:**

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

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Auftragnehmer.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der Meinung des Auftraggebers übereinstimmen.

**Deskriptoren**

Endlager, FuE, Konsequenzanalyse, Langzeitsicherheit, Nuklidtransport, Salz, wärmeentwickelnder Abfall

## Kurzfassung

Die radiologischen Konsequenzen der Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle in Salzformationen mit flacher Lagerung wurden analysiert. Auf der Basis eines Sicherheits- und Nachweiskonzepts und detaillierten Grubengebäudeplanungen für vier Endlagerkonzepte wurde untersucht, ob die Radionuklide im einschlusswirksamen Gebirgsbereich sicher eingeschlossen sind. Dabei wurde angenommen, dass das Wirtsgestein in der Nähe des Endlagerbergwerks keine signifikanten Lösungseinschlüsse aufweist und dass die Integrität des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs in Übereinstimmung mit gebirgsmechanischen Berechnungen für den Nachweiszeitraum gewährleistet ist.

In allen Rechnungen gelangt Lösung über den Schachtbereich in das Grubengebäude und breitet sich dort langsam aus. Durch Gebirgskonvergenz kompaktiert der Versatz im Einlagerungsbereich, so dass zum Zeitpunkt des Lösungszutritts in diesem Bereich nur noch eine Restporosität vorhanden ist und der Versatz nicht weiter kompaktiert. Durch den Lösungskontakt werden Radionuklide aus den Abfällen mobilisiert. Unter der Annahme, dass Gasbildung vernachlässigbar ist, gibt es keinen advektiven Transport von Radionukliden aus den Einlagerungsfeldern und der Transport ist rein diffusiv. In allen deterministischen Rechnungen werden relevante Freisetzungen aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich erst nach Ende des Nachweiszeitraums von 1 Million Jahre berechnet. Die Maxima der Freisetzung am Rand des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches treten zwischen 1 und 10 Millionen Jahren auf und liegen um 2 oder mehr Größenordnungen unter dem zugrunde gelegten Grenzwert. Probabilistische Rechnungen mit statistischer Variation der wesentlichen Parameter bestätigen dieses Ergebnis. Die wichtigsten sensitiven Einflussgrößen sind die Diffusion und die Gebirgskonvergenz.



## **Abstract**

Within the framework of the KOSINA project the radiological consequences of deep geological disposal of heat-generating radioactive waste in bedded salt formations were investigated. On the basis of a safety concept and safety demonstration concept as well as detailed repository planning for several technical disposal options, the safe containment of radionuclides within the containment providing rock zone was examined. It was assumed that the host rock surrounding the repository mine has no significant brine inclusions and that the integrity of the containment providing rock zone is demonstrated in accordance with thermo-mechanical calculations for the entire demonstration period of one million years.

Deterministic and probabilistic transport calculations were performed with realistic parameters showing how brine intrudes into the repository through the shaft area and slowly propagates there. Due to salt rock convergence, the crushed salt backfill in the emplacement area is compacted, so that at the time of brine inflow in this area only a residual porosity is present and the backfill is not further compacting. The fluid contact mobilizes radionuclides from the waste. Assuming that gas generation is negligible, there is no considerable advective transport of radionuclides from the emplacement fields and the transport is dominated by diffusion. In all deterministic test cases, relevant releases from the containment providing rock zone are calculated only beyond the demonstration period of 1 million years. The maxima of the release at the upper edge of the shaft sealing occur between 1 and 10 million years and are two or more orders of magnitude below the regulatory limit value for the radiological safety indicator. Probabilistic calculations with statistical variation of the essential parameters confirm these results. Sensitivity studies show that the most influential parameters are diffusion coefficient and final porosity of the backfill.



# Inhaltsverzeichnis

	<b>Kurzfassung.....</b>	<b>I</b>
	<b>Abstract.....</b>	<b>III</b>
<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Vorgehensweise und Grundlagen .....</b>	<b>3</b>
2.1	Vorgaben der Sicherheitsanforderungen des BMU .....	3
2.2	Methodik.....	4
<b>3</b>	<b>Grundlagen der Modellrechnungen und Szenarien.....</b>	<b>9</b>
3.1	Instrumentarium für die Modellrechnungen.....	9
3.2	Modellzeitraum und Indikatoren .....	10
3.3	Endlagerkonzepte und Modellumsetzung .....	11
3.3.1	Flache Lagerung – Streckenlagerung .....	12
3.3.2	Flache Lagerung – Horizontale Bohrlochlagerung .....	14
3.3.3	Salzkissen – Vertikale Bohrlochlagerung .....	17
3.3.4	Salzkissen – Direkte Endlagerung .....	19
3.4	Beschreibung der Rechenfälle und Varianten .....	20
3.4.1	Referenzsystem.....	20
3.4.2	Vorlaufende Fallstudien zur Optimierung .....	22
3.4.3	Basisfall .....	25
3.4.4	Varianten des Basisfalls.....	26
3.4.5	What-if-Fälle .....	28
3.4.6	Probabilistische Analysen des Referenzsystems .....	29
3.4.7	Endlagervarianten.....	31
3.5	Datengrundlage .....	32
3.5.1	Daten für den Basisfall.....	32
3.5.2	Daten für die Varianten des Basisfalls und What-if-Fälle.....	46
3.5.3	Probabilistische Daten .....	47

3.5.4	Daten für die Endlagervarianten .....	50
<b>4</b>	<b>Ergebnisse der Modellrechnungen .....</b>	<b>55</b>
4.1	Referenzsystem „Flache Lagerung – Streckenlagerung“ .....	55
4.1.1	Vorlaufende Fallstudien .....	55
4.1.2	Basisfall .....	59
4.1.3	Varianten des Basisfalls.....	63
4.1.4	What-if-Rechenfälle für das Referenzsystem .....	70
4.1.5	Probabilistische Analysen .....	75
4.2	Endlagersystem „Flache Lagerung – horizontale Bohrlochlagerung“ .....	85
4.2.1	Variante 1: Zuschalten der Bohrlöcher .....	86
4.2.2	Variante 2: Modellierung der Bohrlochverschlüsse .....	87
4.3	Endlagersystem „Salzkissen – vertikale Bohrlochlagerung“ .....	90
4.3.1	Variante 1: Zuschalten der Bohrloch-Segmente nach 50.000 Jahren.....	90
4.3.2	Variante 2: Versagen der Bohrlochverschlüsse nach 50.000 Jahren .....	91
4.3.3	What-if-Rechenfälle für die vertikale Bohrlochlagerung.....	95
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung, Diskussion und Bewertung der Ergebnisse .....</b>	<b>97</b>
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>101</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>107</b>
	<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>111</b>

# 1 Einleitung

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

Die Modellrechnungen basieren auf einem Sicherheits- und Nachweiskonzept /KIN 18/. Das Sicherheitskonzept beschreibt verbal-argumentativ, durch welche geologischen Gegebenheiten und technischen Maßnahmen die geforderte Sicherheit für ein Endlager an einem Standort erreicht und langfristig gewährleistet werden kann. Aus dem Sicherheitskonzept leiten sich die Einzelnachweise ab, die zum Nachweis der Sicherheit der Endlagerung an einem Standort zu erbringen sind; sie werden im Nachweiskonzept beschrieben. Der vorliegende Bericht stellt die Ergebnisse der Modellrechnungen zum Einzelnachweis „Bewertung der Wirksamkeit des Radionuklideinschlusses im einschlusswirksamen Gebirgsbereich“ dar.

Das Sicherheitsniveau, das ein Endlager für wärmeentwickelnde radioaktive Abfälle in tiefen geologischen Formationen nachweislich einzuhalten hat, wird in Sicherheitsanforderungen festgelegt und veröffentlicht, zuletzt 2010 vom Bundesumweltministerium /BMU 10/. Durch die Sicherheitsanforderungen werden Vorgaben hinsichtlich der zu führenden Sicherheitsnachweise gemacht. Dies betrifft den Einschluss der radioaktiven Abfälle in einem einschlusswirksamen Gebirgsbereich (ewG), der einen in seiner Lage und in seinen Dimensionen festzulegenden Bereich im Wirtsgestein um die Grubenbaue des Endlagerbergwerks, mindestens um die Grubenbaue der Einlagerungsbereiche einschließt, und den Verschluss der technisch unvermeidbaren Durchörterung der geologischen Barriere. Außerdem ist die Sicherheit des Endlagers nach seiner Stille-

gung durch ein robustes Barrierensystem sicherzustellen, das seine Funktionen passiv und wartungsfrei erfüllt und das seine Funktionstüchtigkeit selbst für den Fall in ausreichendem Maße beibehält, dass einzelne Barrieren nicht ihre volle Wirkung entfalten. Die Sicherheitsanforderungen stellen damit die Sicherheitsfunktion Einschluss (im ewG) gegenüber den bis zum Jahr 2010 geltenden Sicherheitskriterien /BMI 83/ stärker in den Fokus des Sicherheitskonzeptes.

Im Kapitel 2 werden zunächst die Vorgehensweise und die Grundlagen zur Bewertung des Einschlussvermögens im ewG dargelegt. Anschließend werden in Kapitel 3 das Instrumentarium für die Modellrechnungen und die zugrunde liegenden Endlagerkonzepte vorgestellt. Es wird weiterhin auf die Auswahl der Rechenfälle für die numerischen Analysen eingegangen und es werden die Modellparameter für alle Rechnungen zusammengestellt. Dabei werden auch die Bandbreiten und Verteilungsfunktionen der Parameter für die probabilistischen Rechnungen angegeben. In Kapitel 4 werden die Ergebnisse der Modellrechnungen aufgezeigt und erläutert. Abschließend werden in Kapitel 5 die erzielten Ergebnisse diskutiert und bewertet.

## 2 Vorgehensweise und Grundlagen

### 2.1 Vorgaben der Sicherheitsanforderungen des BMU

Für die numerische Analyse des Langzeitverhaltens eines Endlagers im Hinblick auf die radiologischen Konsequenzen sind gemäß den Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle /BMU 10/<sup>1</sup> *deterministische Rechnungen auf der Basis einer möglichst realitätsnahen Modellierung (z. B. Medianwerte als Eingangsparameter) durchzuführen. Zielsetzungen dieser Rechnungen sind:*

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

*Zusätzlich sind Unsicherheits<sup>2</sup>- und Sensitivitätsanalysen durchzuführen, um den möglichen Lösungsraum aufzuzeigen sowie den Einfluss der Unsicherheiten einschätzen zu können. Dabei sind auch Modellunsicherheiten zu berücksichtigen. Die Einhaltung von numerischen Kriterien, die sich aus diesen Sicherheitsanalysen ergeben oder daraus abgeleitet wurden, muss unter Berücksichtigung der Unsicherheiten mit ausreichender Zuverlässigkeit gegeben sein. Bei den Analysen gegebenenfalls resultierende numerische Verletzungen dieser Kriterien sind in ihrer Relevanz zu bewerten.*

Bei der Analyse des Langzeitverhaltens ist zu berücksichtigen, dass trotz umfangreicher Kenntnisse der verschiedenen Einflussfaktoren die tatsächliche Entwicklung des Endlagersystems für den Nachweiszeitraum nicht belastbar in allen Einzelaspekten und Details prognostiziert werden kann. Die daraus resultierende Ungewissheit bezüglich der tatsächlichen Entwicklung des Endlagersystems kann durch weitere Erkundungs- und Forschungsarbeiten nur in einem begrenzten Maße verringert werden. Aus diesem Grund wird auf Basis einer systematischen Analyse relevanter Einflussfaktoren

---

<sup>1</sup> Im folgenden Text als „Sicherheitsanforderungen“ abgekürzt. Kursiv gesetzte Passagen sind den Sicherheitsanforderungen entnommen.

<sup>2</sup> In den Sicherheitsanforderungen werden die Begriffe „Unsicherheit“ und „Unsicherheitsanalyse“ verwendet. Diese können im Kontext von Sicherheitsanalysen jedoch irreführend erscheinen. Deshalb wird im vorliegenden Bericht stattdessen von „Ungewissheit“ bzw. „Ungewissheitsanalyse“ gesprochen, soweit es sich nicht um wörtliche Zitate handelt.

eine begrenzte Anzahl schlüssiger Zukunftsbilder (Szenarien) entworfen, die für eine zuverlässige Beurteilung der Sicherheit nach Stilllegung des Endlagers relevant sind. Dieses Vorgehen wird auch von den Sicherheitsanforderungen gefordert:

*Für die Nachverschlussphase ist nachzuweisen, dass für wahrscheinliche Entwicklungen durch Freisetzung von Radionukliden, die aus den eingelagerten radioaktiven Abfällen stammen, für Einzelpersonen der Bevölkerung nur eine zusätzliche effektive Dosis im Bereich von 10 Mikrosievert im Jahr auftreten kann. Dabei sind Einzelpersonen mit einer heutigen Lebenserwartung, die während der gesamten Lebenszeit exponiert werden, zu betrachten.*

*Für weniger wahrscheinliche Entwicklungen in der Nachverschlussphase ist nachzuweisen, dass die durch Freisetzung von Radionukliden, die aus den eingelagerten radioaktiven Abfällen stammen, verursachte zusätzliche effektive Dosis für die dadurch betroffenen Menschen 0,1 Millisievert pro Jahr nicht überschreitet. Dabei sind ebenfalls Einzelpersonen mit einer heutigen Lebenserwartung, die während der gesamten Lebenszeit exponiert werden, zu betrachten.*

*Für derartige Entwicklungen sind höhere Freisetzungen radioaktiver Stoffe zulässig, da das Eintreten solcher Entwicklungen eine geringere Wahrscheinlichkeit aufweist.*

*Für unwahrscheinliche Entwicklungen wird kein Wert für zumutbare Risiken oder zumutbare Strahlenexpositionen festgelegt. Soweit diese Entwicklungen aber zu hohen Strahlenexpositionen führen können, ist im Rahmen der Optimierung zu prüfen, ob eine Reduzierung dieser Auswirkungen mit vertretbarem Aufwand möglich ist. Hierdurch darf die Optimierung bezogen auf die anderen Entwicklungen jedoch nicht beeinträchtigt werden.*

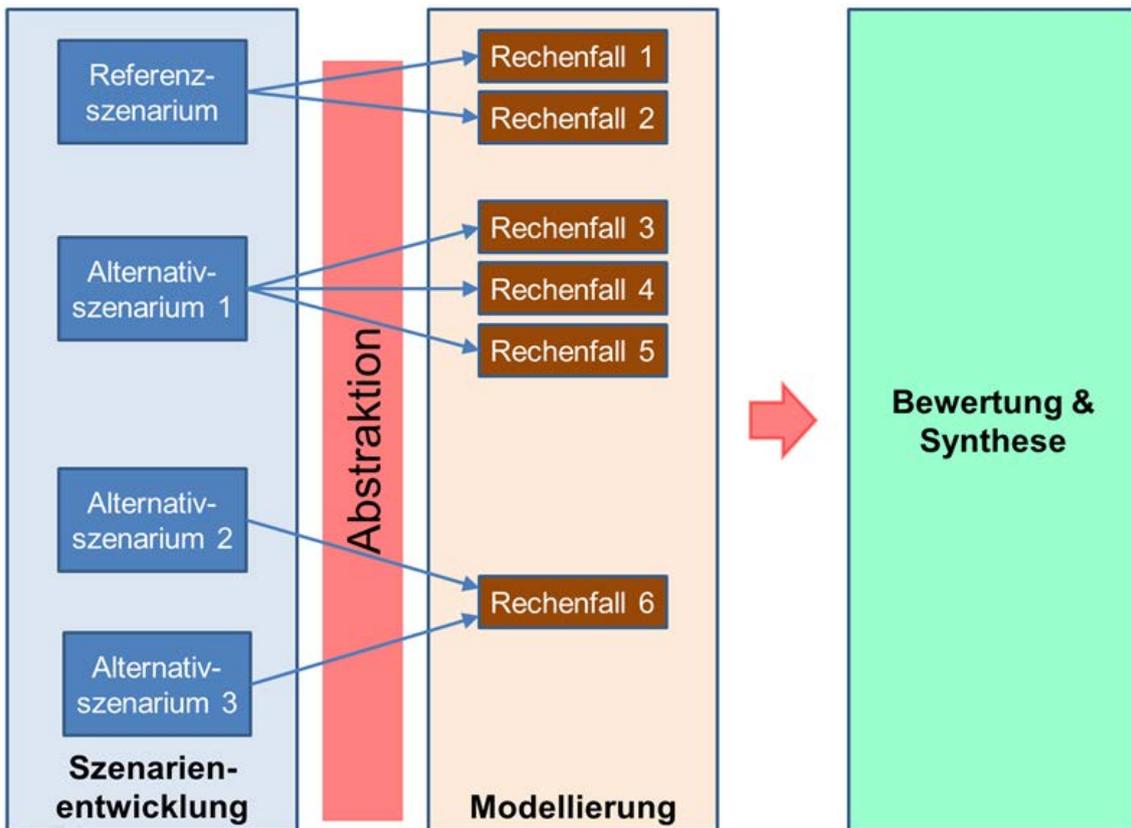
## **2.2 Methodik**

Im FuE-Vorhaben „Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben (VSG)“ /FIS 13/ wurden aus einer Reihe aus naturwissenschaftlicher Sicht plausibler Entwicklungsmöglichkeiten für den Standort Gorleben systematisch Szenarien abgeleitet /BEU 12/. Dabei wurden die zu betrachtenden Szenarien in ein Referenzszenarium und mehrere Alternativszenarien aufgeteilt. Im Vorhaben ISIBEL-II /BUH 16/ wurden weitergehende Untersuchungen durchgeführt, in denen das sicherheitsanalytische In-

strumentarium hinsichtlich seiner Anwendbarkeit für eine Konsequenzenanalyse von Szenarien getestet wurde. Dabei wurden wie in der VSG wahrscheinliche und weniger wahrscheinliche Entwicklungen des generischen Standorts betrachtet und die radiologischen Konsequenzen in deterministischen und probabilistischen Modellrechnungen analysiert.

Im Vorhaben KOSINA wurde keine umfassende Szenarientwicklung durchgeführt. Gleichwohl müssen für die Konsequenzenanalyse Rechenfälle definiert werden, die jeweils modellmäßige Abstraktionen von Szenarien bzw. Systementwicklungen mit definierten Parameterwerten, Parameterbandbreiten oder Kenngrößen zu den statistischen Verteilungen der Parameterwerte darstellen. Zur numerischen Analyse des Systemverhaltens werden im Regelfall mehrere Rechenfälle definiert. Die Erkenntnisse aus den formellen Szenarientwicklungen in den Vorhaben ISIBEL und VSG sind in die Ableitung von Rechenfällen für das Vorhaben KOSINA eingeflossen, um sicherzustellen, dass die definierten Rechenfälle in ihrer Gesamtheit eine umfassende Bewertung aller im Vorhaben KOSINA relevanten sicherheitlichen Fragestellungen zulassen. Abbildung 2.1 zeigt schematisch die Stationen und Elemente von der Entwicklung der Szenarien, über ihre Abstraktion in Rechenfälle bis zur Modellierung und analytischen Auswertung.

Neben der radiologischen Konsequenzenanalyse fordern die Sicherheitsanforderungen eine *Einschätzung der Zuverlässigkeit der Erfüllung der Sicherheitsfunktionen und damit auch der Robustheit des Endlagers*. Unter Robustheit wird *die Zuverlässigkeit und Qualität und somit die Unempfindlichkeit der Sicherheitsfunktionen des Endlagersystems und seiner Barrieren gegenüber inneren und äußeren Einflüssen und Störungen sowie die Unempfindlichkeit der Ergebnisse der Sicherheitsanalyse gegenüber Abweichungen von den zugrunde gelegten Annahmen* verstanden. Zur Betrachtung der Robustheit und Zuverlässigkeit können neben den unwahrscheinlichen Entwicklungen auch What-if-Fälle betrachtet werden, d. h. zukünftige Zustände des Endlagersystems, die nicht plausibel abgeleitet worden sind, aber zur Darstellung der Robustheit des Systems sinnvoll oder gar notwendig sind.



**Abb. 2.1** Schematische Darstellung von der Entwicklung von Szenarien bis zur rechen-technischen Auswertung und Synthese der Ergebnisse /BEU 12/

Im Vorhaben ISIBEL wurden deterministische Analysen zu den radiologischen Konsequenzen einzelner Entwicklungsmöglichkeiten eines Endlagersystems im Wirtsgestein Salz bei steiler Lagerung (Salzstock) durchgeführt /BUH 08a/. Im Vorhaben ISIBEL-II wurden diese Analysen erweitert und die in der VSG abgeleiteten Szenarien in Rechenfälle für Modellrechnungen umgesetzt und mit deterministischen und probabilistischen Werkzeugen untersucht /BUH 16/. Dabei konnte gezeigt werden, dass die Forderungen der Sicherheitsanforderungen nach einer Durchführung von Ungewissheits- und Sensitivitätsanalysen<sup>3</sup> dazu führen, dass den probabilistischen Rechnungen in der Nachweisführung eine sehr große Bedeutung zukommt. In der vorliegenden Studie wurden daher sowohl deterministische als auch probabilistische Rechenfälle abgeleitet und modelltechnisch untersucht.

<sup>3</sup> Statistische Methoden, um den möglichen Lösungsraum aufzuzeigen sowie den Einfluss der Ungewissheiten einschätzen zu können.

Die Auswirkungen von menschlichen Einwirkungen auf das Langzeitverhalten eines Endlagers in flach lagernden Salzformationen wurden im Vorhaben KOSINA nicht thematisiert.

Die zugrunde gelegten Endlagerkonzepte und Systementwicklungen werden konzeptionell und numerisch in Modelle für eine Langzeitsicherheitsanalyse überführt. Die Prozesse werden in gleicher Weise berücksichtigt wie in den genannten früheren Vorhaben. Die Modellrechnungen werden mit den vorhandenen Modellen und Computer Codes durchgeführt. Anhand der Ergebnisse wird geprüft, ob die Modelle zur Nachbildung aller identifizierten Prozesse, die für eine Bewertung der Wirksamkeit des Radionuklideinschlusses für ein Endlager in flach lagernden Salzformationen betrachtet werden müssen, vollständig vorhanden sind. Offene Punkte und Entwicklungsbedarf werden identifiziert und hinsichtlich ihrer Relevanz beurteilt.



### 3 Grundlagen der Modellrechnungen und Szenarien

Im Folgenden werden die Grundlagen der Modellrechnungen zusammengestellt, die die Basis für die in Kapitel 4 diskutierten Anwendungsrechnungen bilden.

Das Nahfeld<sup>4</sup> wird durch eine Modellstruktur aus verbundenen Teilbereichen dargestellt, die als Segmente bezeichnet werden. Diese Struktur basiert auf den vorhergehenden Arbeiten des Vorhabens ISIBEL-II /BUH 16/ und wurde in Anlehnung an die neu entwickelten Endlagerkonzepte im Vorhaben KOSINA /BER 18/ modifiziert. Die wesentlichen Eingangsdaten für die Modellrechnungen basieren auf Daten der VSG /LAR 13/. Falls möglich, wurde auf im Zuge des Vorhabens KOSINA aktualisierte Daten – beispielsweise für die Menge der eingelagerten Abfallbehälter – zurückgegriffen /BER 15/.

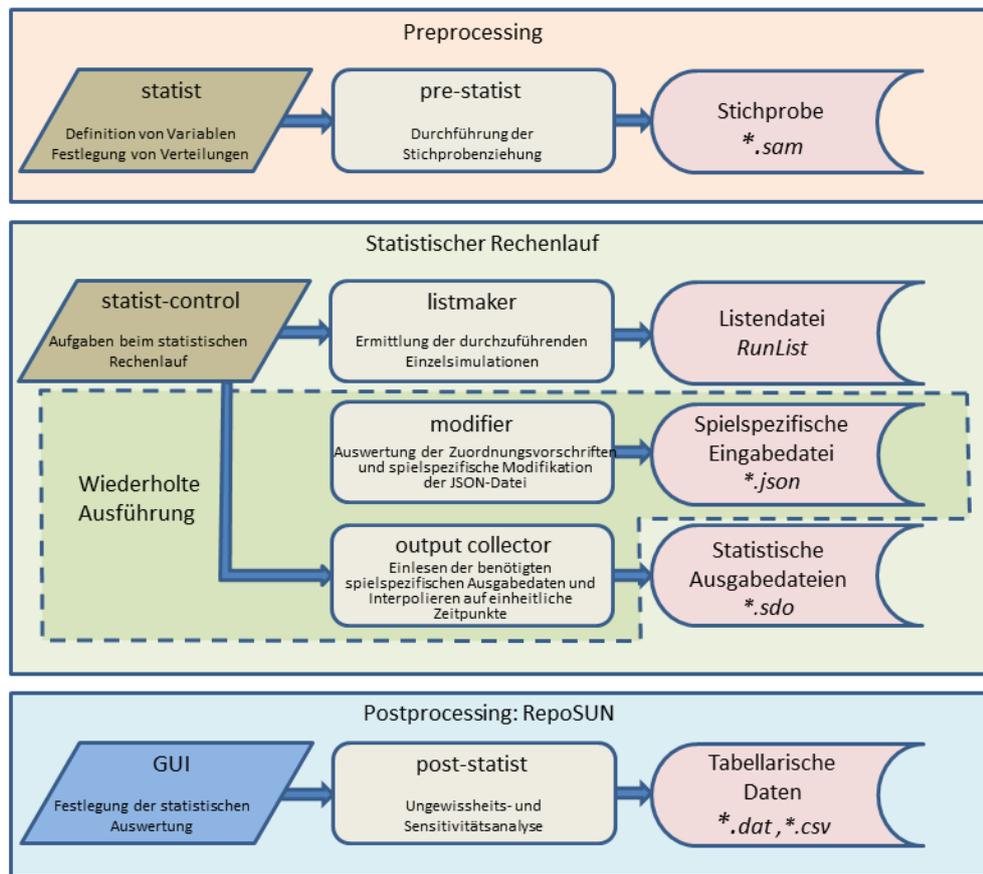
#### 3.1 Instrumentarium für die Modellrechnungen

Die Modellrechnungen wurden mit dem Programmpaket RepoTREND (Transport and REtention of Non-decaying and Decaying contaminants in final Repositories) /REI 16/ durchgeführt, wobei die Module LOPOS /HIR 99/ für das Nahfeld und BioTREND /REI 14/ für die Biosphäre eingesetzt wurden.

Für probabilistische Rechnungen verfügt das Programmpaket RepoTREND über einen Statistik-Rahmen, der den Namen RepoSTAR trägt (RepoTREND framework for STATistic Runs) /BEC 16/, siehe Abbildung 3.1. Dieser kam bei der Vorbereitung und Durchführung der probabilistischen Rechnungen zum Einsatz. Die Stichprobenziehung wurde mit dem Modul Statist durchgeführt. Für die Auswertung der Rechnungen wurde auf das in RepoSTAR implementierte Auswertewerkzeug RepoSUN zurückgegriffen. Ergänzend wurden für Ungewissheitsanalysen Ascii-Tabellen erzeugt und mit den Werkzeugen des kommerziellen Programms Excel<sup>®</sup> ausgewertet sowie für Sensitivitätsanalysen das Programm Matlab<sup>®</sup> eingesetzt. Gegenüber diesen in früheren Vorhaben noch ausschließlich eingesetzten, händischen Verfahren stellt RepoSUN in puncto Flexibilität, Benutzerfreundlichkeit und Robustheit gegen Bedienungsfehler eine erhebliche Verbesserung dar.

---

<sup>4</sup> Teil des Endlagersystems, welches die eingelagerten Abfälle, das Grubengebäude sowie alle Verschlusskomponenten umfasst.



**Abb. 3.1** Ablaufschema einer probabilistischen Rechnung mit RepoSTAR /BEC 16/

### 3.2 Modellzeitraum und Indikatoren

Der **Nachweiszeitraum** der Modellrechnungen beträgt in Anlehnung an die Vorgaben der Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ eine Million Jahre. Bis zu diesem Zeitpunkt treten aber in den meisten Rechenfällen keine oder nur sehr wenige Schadstoffe aus dem Grubengebäude aus, so dass die bis dahin errechneten effektiven Strahlenexpositionen so gering sind, dass sie nicht sinnvoll dargestellt werden können. Dabei ist zu beachten, dass die diffusiven Radionuklidströme nach  $10^6$  Jahren noch nicht ihr Maximum erreicht haben, sondern weiter ansteigen. Für alle Freisetzungsszenarien wurde deshalb der **Simulationszeitraum** auf 10 Millionen Jahre erhöht, um auch Systementwicklungen nach dem Nachweiszeitraum analysieren und vergleichend bewerten zu können.

Die Darstellung von Ergebnissen für den Simulationszeitraum außerhalb des Nachweiszeitraums dient der Vertiefung des Systemverständnisses, der modelltechnischen Abbildung langfristig wirksamer Rückhalte- und Transportprozesse sowie dem Ver-

gleich unterschiedlicher Systementwicklungen mit ausschließlich sehr langfristigen radiologischen Konsequenzen jenseits des Nachweiszeitraums. Es handelt sich bei diesen hypothetischen Langzeitergebnissen jedoch weder um eine Prognose eines realen Systemverhaltens noch um im Sinne der Sicherheitsanforderungen relevante Bewertungsgrößen.

Wegen der primären Zielsetzung der Sicherheitsanforderungen, des sicheren Einschlusses der Radionuklide im ewG, erfolgt die Bewertung des Sicherheitsniveaus der betrachteten Endlagersysteme mittels eines quantitativen Indikators für das Einschlussvermögen des ewG, bei dem die unterschiedlichen radiologischen Auswirkungen der verschiedenen Radionuklide berücksichtigt werden. In diesem Bericht werden die Vorgaben aus /BMU 10/ für eine sogenannte vereinfachte radiologische Langzeitaussage umgesetzt, so dass als Indikator nicht die Strahlenexposition in der Biosphäre, d. h. die effektive Dosis, verwendet wird, sondern ein abgeleiteter Wert, 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, dessen Ableitung u. a. im Nachweiskonzept /KIN 18/ beschrieben wird. Berechnungsvorschrift und Eingangsdaten für den RGI sind in Kapitel 3.5.1.2 angegeben. Bei einem Wert für den RGI  $\leq 1$  ist die Freisetzung geringfügig.

### **3.3 Endlagerkonzepte und Modellumsetzung**

Es werden zwei geologische Typen von flach lagernden Salzformationen betrachtet: Typ „flache Lagerung“ und Typ „Salzkissen“. Für jeden Typ werden jeweils zwei unterschiedliche Einlagerungsvarianten betrachtet, siehe /BER 18/. Für den Typ „flache Lagerung“ sind das die Streckenlagerung von POLLUX®- und anderen Behältern sowie die horizontale Bohrlochlagerung von Kokillen (BSK-H). Für den Typ „Salzkissen“ sind das die vertikale Bohrlochlagerung von Kokillen (BSK-V) und die direkte Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern (TLB) in horizontalen Kurzbohrlöchern. Die unterschiedlichen Einlagerungsvarianten betreffen die ausgedienten Brennelemente der Leistungsreaktoren. Die Strukturteile aus den Leistungsreaktoren sowie die ausgedienten Brennelemente aus Versuchs- und Prototyp-Kernkraftwerken und Forschungsreaktoren werden stets in Strecken eingelagert. Die jeweiligen Endlagerkonzepte und Grubengebäude sowie deren modelltechnische Abstraktionen werden nachfolgend

kurz erläutert, eine detaillierte Darstellung der Endlagerkonzepte sowie deren Auslegung findet sich in /BER 18/.

### **3.3.1 Flache Lagerung – Streckenlagerung**

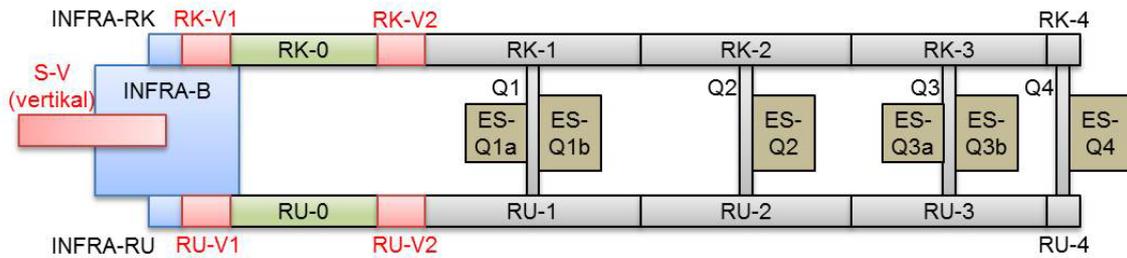
Das Endlagerkonzept für die Streckenlagerung in flach lagernden Salzformationen entspricht im Wesentlichen dem analogen Endlagerkonzept bei steiler Lagerung, siehe die Vorhaben ISIBEL und VSG. Wegen der dadurch bestehenden guten Datengrundlage und der Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit früheren Rechnungen wird es als Referenzkonzept für die Diskussion der Rechenergebnisse verwendet, siehe Kapitel 4.1.

Das Grubengebäude für die Streckenlagerung ist /BER 18/ entnommen und im Grundriss in Abbildung 3.2 dargestellt. Mit eingezeichnet sind die Zusammenfassung von Bereichen für das LOPOS-Modell sowie die jeweiligen Behältertypen. In Abbildung 3.3 ist schematisch dargestellt, welche Segmentstruktur sich für die Modellrechnungen mit LOPOS aus dieser Zusammenfassung von Bereichen ergibt.

Wesentlich für die Betrachtungen zur Freisetzung von Radionukliden aus dem ewG ist der Infrastrukturbereich mit den angrenzenden Barrieren (Verschlussbauwerken): (vertikaler) Schachtverschluss S-V sowie (horizontale) Streckenverschlüsse RK-V1 und RU-V1. Die Bezeichnungen für die Segmente bedeuten „S“=Schacht, „R“=Richtstrecke und „Q“=Querschlag. „ES-Q“ sind die Einlagerungsstrecken am jeweiligen Querschlag. Die in der Abbildung oberen Richtstrecken haben die Kennung „K“ für Kontrollbereich, die unteren Richtstrecken „U“ für Überwachungsbereich. Als Zugangsstrecken werden die Bereiche der Richtstrecken bezeichnet, die dem Infrastrukturbereich am nächsten liegen (RK-0 und RU-0).

Die Eingangsdaten für die Modellrechnungen sind in Kapitel 3.5 zusammengestellt.



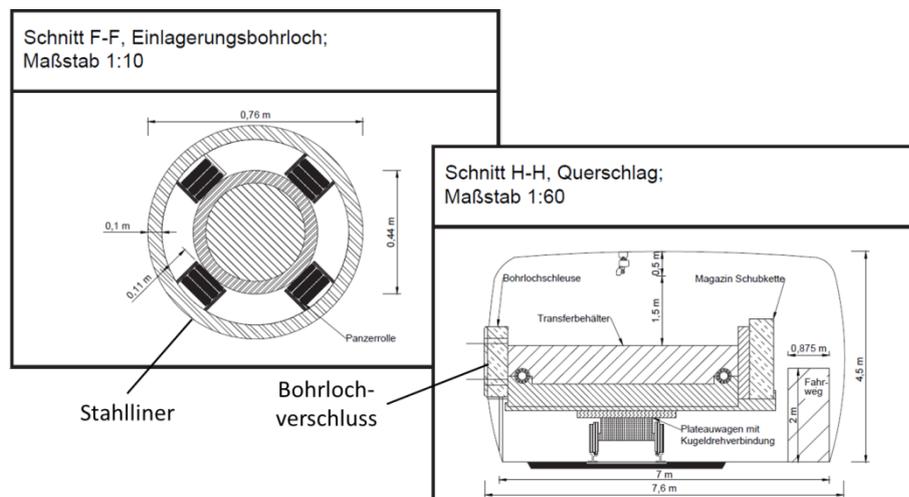


**Abb. 3.3** Segmentstruktur für die Streckenlagerung (LOPOS-Modell)

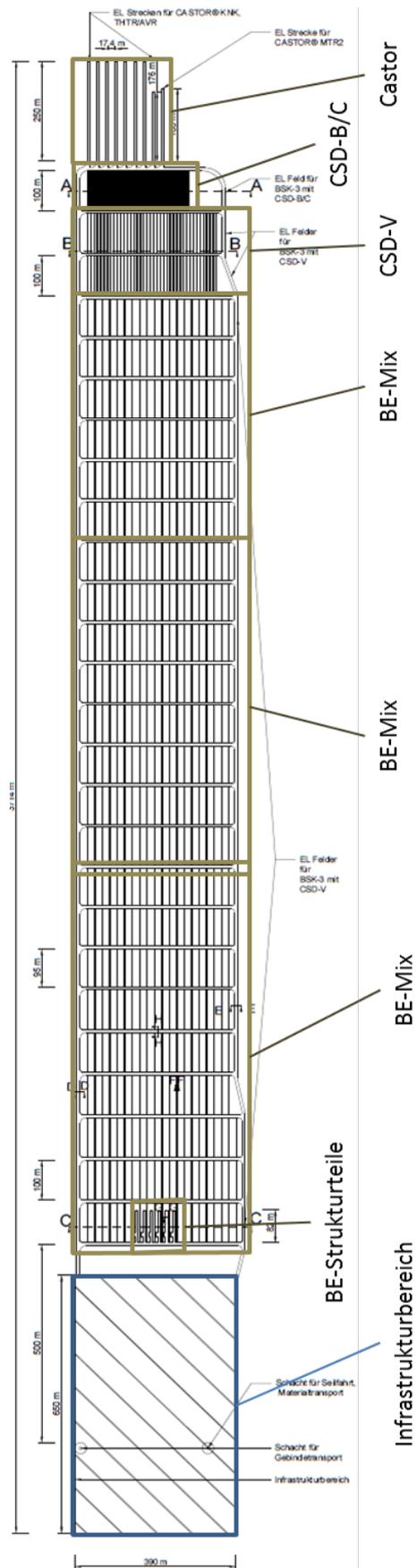
### 3.3.2 Flache Lagerung – Horizontale Bohrlochlagerung

Das Endlagerkonzept für die horizontale Bohrlochlagerung beruht auf der Einlagerung von Kokillen (BSK-H) und CASTOR®-Behältern, wobei die Kokillen in den Bohrlöchern und die CASTOR®-Behälter in Strecken gelagert werden. Das Grubengebäude ist /BER 18/ entnommen und im Grundriss in Abbildung 3.5 dargestellt. Mit eingezeichnet sind die Zusammenfassung von Bereichen für das LOPOS-Modell sowie die jeweiligen Behältertypen.

Da die Einlagerungsbohrlöcher horizontal orientiert sind, werden für das LOPOS-Endlagermodell dieselben Segmenttypen wie für die (horizontale) Streckenlagerung verwendet. Im Gegensatz zu den Einlagerungsstrecken im Endlagerkonzept „Flache Lagerung – Streckenlagerung“ werden die Einlagerungsbohrlöcher jedoch an der Bohrlochwandung jeweils mit massiven Stahllinern versehen sowie an der Stirnseite dauerhaft hermetisch und hydraulisch dicht verschlossen, siehe Abbildung 3.4. Der Hohlraum zwischen Kokillen und Bohrlochlinern bleibt unverfüllt.



**Abb. 3.4** Einlagerungsbohrloch und Querschlag, Schnitte (nach /BER 18/, ergänzt)

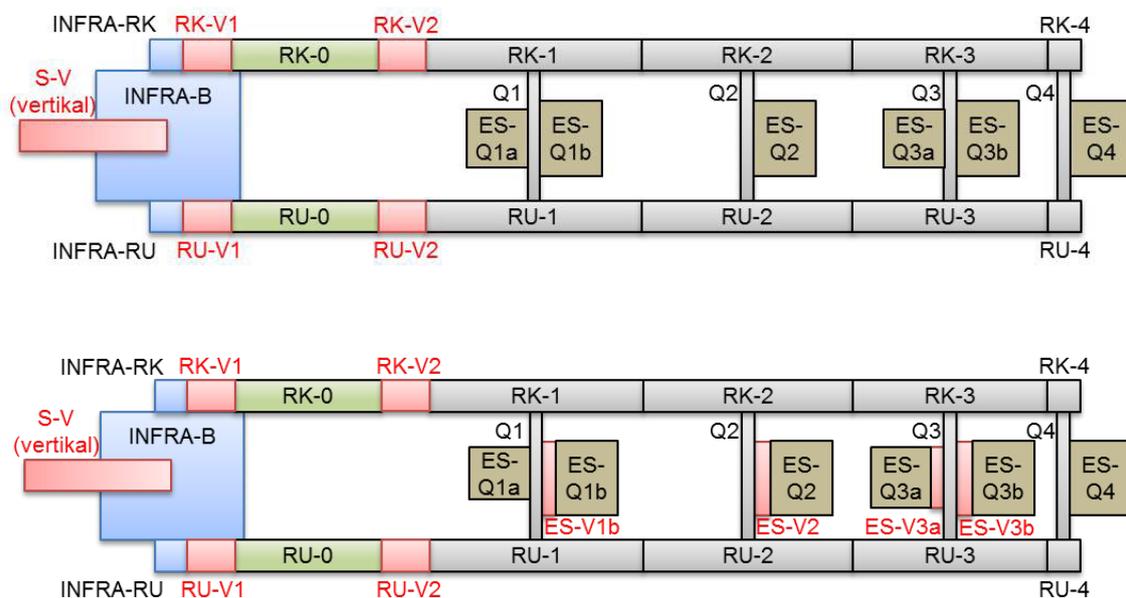


**Abb. 3.5** Grundriss Grubengebäude für die horizontale Bohrlochlagerung /BER 18/

Die realistische Annahme für das langzeitige Verhalten der verschlossenen Bohrlöcher ist, dass sie über den gesamten Nachweiszeitraum hydraulisch dicht bleiben. Ein Versagen der Bohrlochverschlüsse kann jedoch nicht ausgeschlossen werden und wird modelltechnisch auf zweierlei Art simuliert: entweder die entsprechenden Einlagerungssegmente werden erst nach dem Verschlussversagen im Modell zeitversetzt zugeschaltet (Variante 1) oder ein abdichtender Bohrlochverschluss wird von Beginn des Simulationszeitraums an separat modelliert und erfährt zum Zeitpunkt des Versagens eine Permeabilitätsänderung (Variante 2).

Die Segmentstrukturen für die Modellrechnungen mit LOPOS für die horizontale Bohrlochlagerung sind in Abbildung 3.6 dargestellt. Für die Variante 1 ist sie identisch zu derjenigen für die Streckenlagerung, vgl. Abbildung 3.3, wobei diejenigen Modellsegmente, welche die horizontalen Einlagerungsbohrlöcher repräsentieren (ES-Q1b, ES-Q2, ES-Q3a und ES-Q3b) erst zum Modellzeitpunkt des Verschlussversagens aktiviert werden. Die Segmentstruktur für die Variante 2, in der die Bohrlochverschlüsse separat modelliert werden, ist ebenfalls dargestellt (Abbildung 3.6, unten). Die Segmente ES-V repräsentieren dort die Bohrlochverschlüsse.

Die Eingangsdaten für die Modellrechnungen sind in Kapitel 3.5 zusammengestellt.



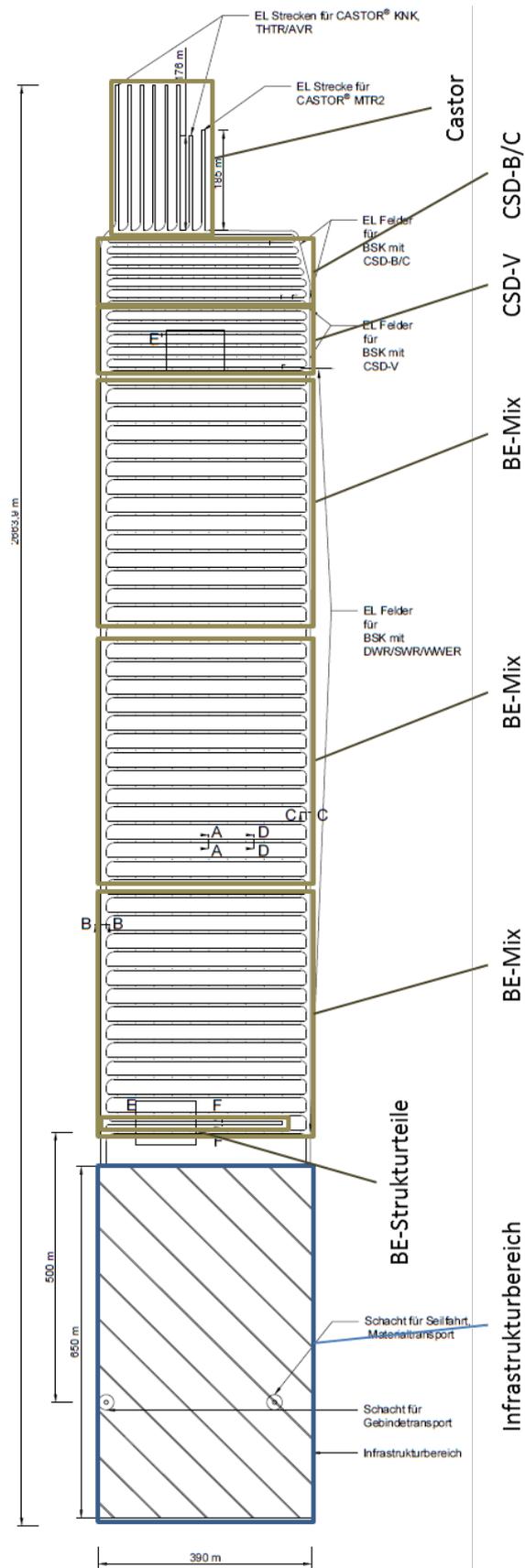
**Abb. 3.6** Segmentstruktur für die horizontale Bohrlochlagerung (LOPOS-Modell); Variante 1 (oben) und Variante 2 (unten)

### 3.3.3 Salzkissen – Vertikale Bohrlochlagerung

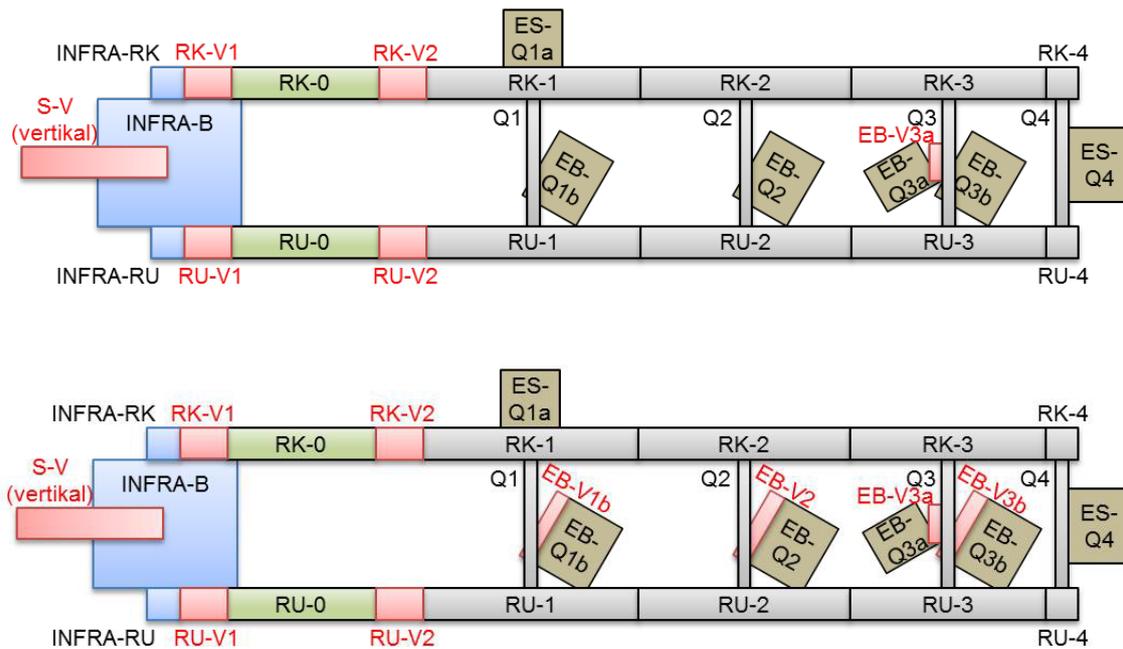
Das Endlagerkonzept für die vertikale Bohrlochlagerung beruht wie bei der horizontalen Bohrlochlagerung auf der Einlagerung von Kokillen (BSK-V) und CASTOR®-Behältern, wobei die Kokillen in den Bohrlöchern und die CASTOR®-Behälter in Strecken gelagert werden. Das Grubengebäude ist /BER 18/ entnommen und im Grundriss in Abbildung 3.7 dargestellt. Mit eingezeichnet sind die Zusammenfassung von Bereichen für das LOPOS-Modell sowie die jeweiligen Behältertypen. In Abbildung 3.8 ist schematisch dargestellt, welche Segmentstruktur sich für die Modellrechnungen mit LOPOS aus dieser Zusammenfassung von Bereichen ergibt.

Für die Endlagervariante Vertikale Bohrlochlagerung kommen im Unterschied zur Streckenlagerung und Horizontalen Bohrlochlagerung spezielle Segmenttypen für vertikale Einlagerungsbohrlöcher zur Anwendung (Segmente EB-xx). Analog zum Einlagerungskonzept der horizontalen Bohrlöcher werden in den vertikalen Bohrlöchern Stahl liner sowie dauerhaft dichte Bohrlochverschlüsse vorgesehen /BER 18/. Der Ringraum zwischen Kokillen und Bohrlochlinern wird mit Quarzsand verfüllt. Ein Versagen der Bohrlochverschlüsse kann wie beim Modellkonzept der Horizontalen Bohrlochlagerung entweder über zeitversetztes Zuschalten der Einlagerungsbohrlöcher modelltechnisch simuliert (Variante 1) oder als eigene Abdichtsegmente separat modelliert werden (Variante 2).

Die Eingangsdaten für die Modellrechnungen sind in Kapitel 3.5 zusammengestellt.



**Abb. 3.7** Grundriss Grubengebäude für die vertikale Bohrlochlagerung /BER 18/



**Abb. 3.8** Segmentstruktur für die vertikale Bohrlochlagerung (LOPOS-Modell); Variante 1 (oben) und Variante 2 (unten); vertikale Segmente sind gedreht dargestellt

### 3.3.4 Salzkissen – Direkte Endlagerung

Das Endlagerkonzept für die Direkte Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern beruht auf der ausschließlichen Einlagerung von CASTOR®-Behältern in horizontalen Kurzbohrlöchern. Dieses Einlagerungskonzept wurde im Rahmen des FuE-Vorhabens DIREGT (/GRA 12/, /FIL 14/) entwickelt und in KOSINA erstmalig für eine konkrete Endlagerplanung und -auslegung umgesetzt. Details zum Layout des Grubengebäudes, zu den Behältern sowie der Einlagerungstechnik können /BER 18/ entnommen werden.

Die Endlagervariante Direkte Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern wurde in den hier vorgestellten Modellrechnungen nicht weiter analysiert. Da Grubengebäude und Einlagerungstechnik mit denen der Varianten „Streckenlagerung“ und „horizontale Bohrlochlagerung“ vergleichbar sind, wird davon ausgegangen, dass auch die langzeitigen radiologischen Konsequenzen ähnlich verlaufen werden. Zudem befinden sich Endlagerplanung und Einlagerungstechnik für eine Direkte Endlagerung noch auf grobkonzeptioneller Ebene; Daten und Erfahrung z. B. für die langfristigen Behälterereigen-

schaften fehlen. Weiterhin waren Dokumentation und bergtechnische Auslegung für diese Endlagervariante im Projektfortschritt zeitlich erst spät vorhanden.

### **3.4 Beschreibung der Rechenfälle und Varianten**

Die verwendeten Rechenfälle werden im Folgenden zusammengestellt und begründet. Es wird darauf eingegangen, wie die unterschiedlichen Endlagerkonzepte und Bandbreiten der zukünftigen Entwicklung der jeweiligen Endlagersysteme in Rechenfälle für die Modellrechnungen umgesetzt werden. Analysiert werden nur die Endlagervarianten „Flache Lagerung – Streckenlagerung“, „Flache Lagerung – horizontale Bohrlochlagerung“ und „Salzkissen – vertikale Bohrlochlagerung“. Für die Endlagervariante „Salzkissen – direkte Endlagerung“ wurden keine Berechnungen durchgeführt (siehe Kapitel 3.3.4).

#### **3.4.1 Referenzsystem**

Als Referenzsystem für die deterministischen und probabilistischen Modellrechnungen zum Radionuklidtransport wurde der geologische Typ „Flache Lagerung“ mit der Einlagerungsvariante „Streckenlagerung“ ausgewählt. Grund hierfür ist vor allem die aus anderen FuE-Vorhaben bestehende gute Datengrundlage für dieses Endlagersystem sowie die dadurch gegebene Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit in der Vergangenheit intensiv untersuchten Referenzsystemen in der steilen Lagerung, wie in VSG und ISIBEL. Zudem waren technische Endlagerkonzepte und Layout-Entwürfe für das Grubengebäude für die Variante „Flache Lagerung – Streckenlagerung“ zeitlich als erste verfügbar.

Für das Referenzsystem wurden mehrere Rechenfälle abgeleitet – siehe nachfolgende Kapitel – und im Detail modelltechnisch untersucht. Ziel der Modellrechnungen war dabei primär die Überprüfung der Anwendbarkeit der vorhandenen Instrumentarien und der Ausweisbarkeit eines ewG sowie sekundär eine sicherheitliche Bewertung der generischen Endlagersysteme hinsichtlich langzeitiger radiologischer Konsequenzen nach den Kriterien der Sicherheitsanforderungen.

Grundlage der Berechnungen ist die ungestörte und erwartete Entwicklung des Systems, wie sie anhand vorliegender FEP-Analysen und Szenarienentwicklungen für das Referenzsystem Salz in steiler Lagerung abgeleitet wurde und deren Annahmen und

Konventionen unter anderem in /BUH 16/ dokumentiert sind. Diese Entwicklung wird als Referenzszenarium bezeichnet und beinhaltet eine möglichst große Gesamtheit als wahrscheinlich anzusehender Entwicklungsmöglichkeiten des Endlagersystems (wahrscheinliche FEP). Eine detaillierte Beschreibung des Referenzszenariums ist in /BEU 12/ gegeben. Dort wird zu jedem beteiligten FEP diskutiert, wie es sich auf das Teilsystem konkret auswirken kann, sowie eine orientierende zeitliche Einordnung der für die jeweiligen Teilsysteme „Nahfeld“, „Strecken und Schächte“, „Wirtsgestein“ und „Deck- und Nebengebirge“ sowie die Radionuklidmobilisierung und den Radionuklidtransport zu berücksichtigenden Initial-FEP angegeben.

Grundsätzlich gilt die folgende Annahme: Bei einem Endlager im Salzgestein treten keine Wegsamkeiten im Wirtsgestein auf, so dass kein Lösungszutritt von außen erfolgt. Durch entsprechende Erkundung wird sichergestellt, dass Lösungseinschlüsse im Wirtsgestein nicht angetroffen werden bzw. sich bei der Auffahrung der Grubenbaue entleeren.

Im Vorhaben KOSINA wurden folgende spezifische Annahmen getroffen, die aus dem Vorhaben ISIBEL übernommen wurden /BUH 16/:

- Die für die Standortentwicklung zugrunde zu legende Klimaentwicklung entspricht einem 100.000-Jahre-Zyklus mit einem regelmäßigen Wechsel von Kalt- und Warmzeiten entsprechend dem im Vorhaben VSG vorgegebenen Klimabild /MRU 11/.
- Die Schacht- und Streckenverschlüsse werden auslegungsgerecht errichtet.
- Es liegen keine fehlinterpretierten Erkundungsergebnisse oder unerkannten geologischen Merkmale vor, die zu einer Verringerung des vorgesehenen Sicherheitsabstandes (Planung 50 m) zwischen den Grubenbauen der Einlagerungsbereiche zu Gesteinsschichten mit möglichen größeren Lösungsvorkommen sowie zu potenziellen Fließwegen für Lösungen führen.

In den Modellrechnungen wird die ausgelegte Lebensdauer der Verschlussbauwerke wie in ISIBEL mit 50.000 Jahren angenommen; die Referenzpermeabilität für alle Verschlussbauwerke wird für diesen Zeitraum mit einem realistischen Wert von  $10^{-17} \text{ m}^2$  angesetzt. Es wird angenommen, dass nach Überschreiten der Lebensdauer die Verschlussbauwerke nicht mehr ihre anfängliche Dichtwirkung haben werden. Im Modell nimmt dabei die Permeabilität der Bauwerke um zwei Größenordnungen zu.

Für ein eindeutiges Auseinanderhalten der Rechenfälle wird folgende Unterscheidung getroffen:

1. **Basisfall:** Deterministischer Rechenfall innerhalb der wahrscheinlichen Entwicklungen des Endlagersystems mit möglichst realitätsnahen Werten (Best-Estimate-Werte) im Sinne der Sicherheitsanforderungen.
2. **Referenzfall:** Probabilistischer Rechenfall mit den wahrscheinlichen Ausprägungen (aller variierten Parameter), der zur Umsetzung einer möglichst großen Gesamtheit an wahrscheinlichen Entwicklungen dient.

### **3.4.2 Vorlaufende Fallstudien zur Optimierung**

Im Vorhaben KOSINA kam zur Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen Endlagerplanung und vorläufigen Sicherheitsbewertungen ein iteratives Vorgehen zur Anwendung. Da keine Szenarientwicklung mit (Vor-)Festlegung des Referenzszenarios erfolgte, wurden zeitgleich zur Endlagerplanung und -auslegung sinnvoll ausgewählte und plausibel begründete Modellrechnungen zur Optimierung des Referenzsystems durchgeführt.

Die für eine mögliche Optimierung untersuchten Spezifikationen der Endlagerauslegung betrafen die Länge der Schachtverschlüsse, die Länge der Zugangsstrecken sowie die Feuchte des Versatzes in ausgewählten Bereichen der Richtstrecken des Einlagerungsbereiches. Die zugehörigen Rechenfälle sind in den nachfolgenden Kapiteln beschrieben. Aus den Ergebnissen dieser vorlaufenden Fallstudien wurden Rückschlüsse auf das endgültige Layout für das Referenzsystem gezogen, welche in die Festlegung des Basisfalls als repräsentativen deterministischen Rechenfall eingeflossen sind.

#### **3.4.2.1 Länge Schachtverschlüsse**

Im Endlagerkonzept der VSG, bei dem ein Salzstock in steiler Lagerung betrachtet wurde, konnte für die Länge der Schachtverschlüsse von einer vergleichsweise mächtigen Salzüberdeckung Kredit genommen werden. Da die Schachtverschlüsse vollständig im hydraulisch undurchlässigen Salinar errichtet werden müssen, sind für Endlager in steiler Lagerung prinzipiell hinreichend lange Schachtverschlüsse von einigen 100 m Länge realisierbar. Für Endlager in flach lagernden Salzformationen ist die

mögliche Länge der Schachtverschlüsse hingegen aufgrund der geringer mächtigen Salzüberdeckung begrenzt.

In vorlaufenden Rechnungen wurde untersucht, wie sich kürzere Schachtverschlüsse auf potenzielle Lösungszuflüsse in das Grubengebäude und somit auf die Austräge von Radionukliden aus dem Endlagersystem auswirken. Ausgangspunkt der Optimierung ist ein Schachtverschluss, der für steile Lagerung betrachtet wurde (ca. 500 m Länge möglich). Für Vergleichsrechnungen wurden realisierbare Verschlusslängen aus den Gegebenheiten des generischen geologischen Modells /VÖL 17/ für eine flach lagernde Salzformation abgeleitet. Eine Reduktion der Schachtverschlusslängen auf 250 m (Mächtigkeit der Salzüberdeckung im Wirtsgestein / Salinar) und auf 100 m (Mächtigkeit der Salzüberdeckung im Einlagerungshorizont / Staßfurt-Formation z2) wurde modelltechnisch hinsichtlich der Relevanz für die radiologischen Konsequenzen überprüft. Aus den Ergebnissen wurden Anforderungen an erforderliche Schachtverschlusslängen unter Berücksichtigung der geologischen Randbedingungen in flach lagernden Salzformationen abgeleitet.

### **3.4.2.2 Länge Zugangsstrecken**

Lange Zugangsstrecken vom Schacht zum Einlagerungsbereich sind grundsätzlich sicherheitsgerichtet, da sie wartungsfrei und robust dicht werden, sobald der dort eingebrachte Salzgrusversatz ausreichend kompaktiert ist. Der minimale Sicherheitsabstand zwischen Schächten und Einlagerungsbereich beträgt gemäß dem Sicherheitskonzept 300 m (siehe strategische Maßnahme M4 in /KIN 18/). Ein Vorteil der flachen Lagerung gegenüber Salzstöcken ist die Verfügbarkeit einer großen Grundfläche in lateraler Ausdehnung (siehe /VÖL 17/) zur Realisierung langer Zugangsstrecken.

Mittels vorlaufender Vergleichsrechnungen wurde geprüft, ob längere Zugangsstrecken einen Ansatzpunkt für eine Optimierung des Referenzsystems darstellen. Ausgangspunkt der Optimierung sind Zugangsstrecken, deren Längen dem minimalen Sicherheitsabstand von 300 m entsprechen. Zusätzlich wurden Varianten mit Streckenlängen von 500 m und 1000 m gerechnet und hinsichtlich der langzeitigen radiologischen Konsequenzen bewertet. Hierbei ist jedoch zu bedenken, dass längere Zugangsstrecken zum einen einen höheren bergtechnischen Aufwand bei der Erstellung und Verfüllung erfordern, zum anderen die Dimensionierung des Grubengebäudes bergrechtlichen Restriktionen, z. B. hinsichtlich Bewetterung und Fluchtwegen, unterliegt. Für die Strecken ist somit im Hinblick auf eine Optimierung des Gesamtsystems keine

beliebig große Länge möglich, sondern eine Abwägung zwischen Belangen der Langzeitsicherheit und dem noch vertretbaren Aufwand bzw. den Restriktionen während der Errichtung des Endlagers vorzunehmen.

### **3.4.2.3     Versatzfeuchte**

Feuchter Versatz konvergiert grundsätzlich schneller als trockener Versatz. Für den kompaktierenden Salzversatz in den Richtstrecken wird eine schnelle Konvergenz angestrebt, damit die Endporosität und damit eine hydraulische Langzeitdichtwirkung möglichst frühzeitig erreicht werden, siehe /KIN 18/. Im Endlagerkonzept der VSG wurden deshalb alle Richtstrecken mit angefeuchtetem Versatz verfüllt. Dies hat den Nachteil, dass nicht unerhebliche Mengen Feuchtigkeit nahe den Abfalleinlagerungsorten eingebracht werden. Durch Konvergenz wird der Porenraum in den Richtstrecken schon zu frühen Zeiten stark komprimiert. Dadurch kann die mit dem Versatz eingebrachte Feuchte im verbleibenden Porenraum als Lösungspegel in den Richtstrecken ansteigen, die Abfälle früh erreichen und einen potenziellen Transportpfad für gelöste Radionuklide zu vergleichsweise frühen Zeiten darstellen.

Mittels Vergleichsrechnungen wurde überprüft, ob die mit dem angefeuchteten Versatz eingebrachten Lösungsmengen einen diffusiven Austrag von Schadstoffen zu frühen Zeiten ermöglichen und somit negative Auswirkungen auf die radiologischen Konsequenzen haben können. Als Ansatzpunkt für eine Optimierung wird eine Variante mit trocken eingebrachtem Versatz in den Richtstrecken gerechnet. Hier erfolgt die Konvergenz zwar etwas langsamer, dafür wird keine zusätzliche Feuchtigkeit in das System eingebracht. Darüber hinaus kann bei der Verwendung trockenen Versatzes auf zusätzliche Abdichtungen, welche bei einer Trennung des feuchten Versatzes in den Richtstrecken vom trockenen Versatz in den Querschlägen erforderlich sind, verzichtet werden. Der Versatz in den Zugangsstrecken von den Schächten zum Einlagerungsbereich bleibt auch in der Vergleichsrechnung mit trockenem Versatz in den Richtstrecken angefeuchtet. Dies erfordert zusätzliche Abdichtungen zwischen den Zugangsstrecken und den Richtstrecken im Einlagerungsbereich, um feuchten von trockenem Versatz zu trennen. Der zusätzliche technische Aufwand hierfür wird als gering angesehen. Aus den Modellergebnissen wurde abgeleitet, ob trockener Versatz in den Richtstrecken und ein Verzicht auf die technische Abdichtung der Querschläge einen positiven Effekt auf das Systemverhalten haben können. Dies wäre ein weiterer Ansatzpunkt für eine Optimierung des Referenzsystems.

### 3.4.3 Basisfall

Der **Basisfall** dient als repräsentativer deterministischer Rechenfall und beschreibt ein Szenarium innerhalb der wahrscheinlichen Entwicklungen des Endlagersystems mit möglichst realitätsnahen Werten (Best-Estimate-Werte) im Sinne der Sicherheitsanforderungen.

Ein deterministischer Best-Estimate-Rechenfall ist gemäß Sicherheitsanforderungen erforderlich und für verschiedene Auswertungen nützlich, kann aber nicht zur Umsetzung des Referenzszenariums in einen Rechenfall ausreichen /BUH 16/. Zur Einbindung einer möglichst großen Vielzahl von Entwicklungen ist der Einsatz von probabilistischen Verfahren zielführend, siehe Kapitel 2.2. Auch wenn das Referenzsystem letztlich mit einem probabilistischen Rechenlauf (dem Referenzfall, siehe Kapitel 3.4.6) bewertet werden muss, sind deterministische Rechnungen sinnvoll, insbesondere um ein Verständnis für das Systemverhalten zu bekommen bzw. Grundlagen für die Diskussion der Ergebnisse der probabilistischen Rechnungen zu schaffen.

Eine wesentliche Randbedingung des Basisfalls – und aller weiteren Rechenfälle – ist die Annahme, dass ein Lösungszutritt nur über die Strecken und Schächte erfolgen kann. Das heißt: Die Gesteinsbereiche des ewG behalten ihre Integrität über den gesamten Nachweiszeitraum; dies wird durch die Ergebnisse von gebirgsmechanischen Integritätsanalysen bestätigt /LIU 18/. Interne Fluidvorkommen im Wirtsgestein, die zu einem direkten Lösungszutritt in das Grubengebäude führen können, werden ausgeschlossen.

Weitere Randbedingungen des Basisfalls leiten sich aus den Ergebnissen der vorlaufenden Modellrechnungen zur Optimierung, siehe Kapitel 3.4.2, ab: die Länge des Schachtverschlusses beträgt 100 m; die Länge der Zugangsstrecken beträgt 500 m, der Versatz in den Richtstrecken im Einlagerungsbereich wird nicht zusätzlich angefeuchtet. Ein Versagen der geotechnischen Verschlüsse nach 50.000 Jahren (modelliert durch eine Permeabilitätserhöhung von  $10^{-17} \text{ m}^2$  auf  $10^{-15} \text{ m}^2$ ) führt zu einem beschleunigten Lösungszufluss über die Schächte in das Grubengebäude. Die Ausbreitung von Lösung im Grubengebäude wird durch Speichervolumina der Auffahrungen und die Permeabilität der Verfüllbaustoffe in den Strecken bestimmt. Die lokale Hohlraumkonvergenz hängt dabei von Temperatur und Feuchte ab.

Die Daten und Parameterwerte für den Basisfall sind in Kapitel 3.5.1 angegeben.

#### **3.4.4 Varianten des Basisfalls**

Ausgehend vom Basisfall wurden mehrere **Varianten des Basisfalls** deterministisch gerechnet und mit dem Basisfall verglichen, um das Systemverständnis zu verbessern. Zunächst wurden der Einfluss der Diffusion sowie der Konvergenz untersucht. Als weitere Varianten wurden Vergleichsrechnungen für die Grenzen des ewG und geänderte numerische Diskretisierungen durchgeführt. Die Varianten werden nachfolgend im Einzelnen beschrieben. Die gegenüber dem Basisfall geänderten Daten für die Varianten sind in Kapitel 3.5.2 zusammengestellt.

##### **3.4.4.1 Variante Geringe Diffusion**

Die **Variante Geringe Diffusion** analysiert den Einfluss von Diffusionsprozessen auf die Ergebnisse der radiologischen Konsequenzenanalyse. Hintergrund dieser Betrachtungen ist die Erwartung, dass der diffusive Transport im Basisfall stark überschätzt wird.

Der für den Basisfall angesetzte Diffusionskoeffizient entspricht einem durchschnittlichen Diffusionskoeffizienten in reinem Wasser bei Normbedingungen und unter Berücksichtigung der Gesamtporosität. Poren, die aufgrund ihrer Größe für die diffundierenden Teilchen nicht zugänglich sind, sowie Sackgassen- und blinde Poren (Poren ohne Verbindung zum restlichen Porensystem) werden dabei nicht abgezogen. Ebenfalls unberücksichtigt bleiben Tortuosität („Gewundenheit“ des Fließweges durch die Poren), Konstriktivität (Verlangsamung der Diffusion durch eine Erhöhung der Viskosität in engen Poren als Folge der größeren durchschnittlichen Nähe zur Porenwand) und Größe der diffundierenden Teilchen.

Es ist daher begründet anzunehmen, dass der real zu erwartende, effektive Diffusionskoeffizient deutlich geringer als der im Basisfall angesetzte, absolute Diffusionskoeffizient sein wird, vermutlich um mehrere Größenordnungen darunter liegend. In der Variante Geringe Diffusion wurde der Diffusionskoeffizient gegenüber dem Basisfall um den Faktor 10 reduziert.

#### 3.4.4.2 Variante Langsame Konvergenz

Die **Variante Langsame Konvergenz** analysiert den Einfluss einer vergleichsweise geringeren Konvergenzrate der Grubenbaue auf die Rückhaltung bzw. den Nuklidaustrag. Da es sich bei den in KOSINA betrachteten geologischen Systemen um generische Systeme handelt, können zu den Kriecheigenschaften der Salzgesteine keine genauen Kriechklassen, sondern nur deren Bandbreiten angegeben werden, welche in unterschiedlichen Konvergenzverläufen resultieren.

Im Vorhaben KOSINA wurden keine neuen, an die jeweiligen Endlagervarianten, Auslegungstemperaturen und Versatzeigenschaften spezifisch angepassten Konvergenzberechnungen durchgeführt, sondern exemplarisch Konvergenzkurven der generischen KOSINA-Systeme mit denen der VSG verglichen, siehe /KNA 17/. Im Vorhaben VSG wurden zwei verschiedene Konvergenzverläufe angegeben und als „langsame“ bzw. „schnelle“ Konvergenz bezeichnet. Beide Verläufe wurden als wahrscheinliche Entwicklungen angesehen, wobei die „langsame“ Konvergenz für den Basisfall und die „schnelle“ Konvergenz für Variantenrechnungen verwendet wurde. Im Vergleich der VSG-Konvergenzrechnungen mit den KOSINA-Ergebnissen konnte gezeigt werden, dass die zu erwartenden Konvergenzverläufe bei Ansatz der wahrscheinlichen Kriechklasse 5 bzw. des Stoffmodells  $BGR_{EB1}$  sehr gut mit denen der „schnellen“ Konvergenz bei der VSG übereinstimmen.

Für den Basisfall KOSINA wurde daher die Parametrisierung für die „schnelle“ Konvergenz aus den VSG- bzw. ISIBEL-Rechnungen übernommen. In der Variante Langsame Konvergenz wurden die Parameter der entsprechenden VSG-Rechnung angesetzt, welches in Konsequenz eine Reduktion der Konvergenzrate um etwa eine Größenordnung bedeutet.

#### 3.4.4.3 Variante Kleiner ewG

In der **Variante Kleiner ewG** wird der Einfluss der angenommenen Ausdehnung des ewG, d. h. der jeweilige Ortspunkt für die Auswertung der Nuklidströme als Input für das generische Expositionsmodell des radiologischen Sicherheitsindikators, analysiert. Da das Wirtsgestein innerhalb des ewG als integer und daher transportunwirksam gilt, handelt es sich hierbei ausschließlich um Lokationen an Verschlussbauwerken in bergmännischen Auffahrungen des Endlagers.

Im Basisfall wird der Rand des ewG an der Außenseite der Schachtverschlüsse angesetzt. In der Variante Kleiner ewG wird die Auswertung hingegen an den Außenseiten der Streckenverschlüsse in den Zugangsstrecken zum Einlagerungsbereich durchgeführt. In dieser Variante ist der Infrastrukturbereich somit nicht Teil des ewG und bleibt daher mit seinem Rückhalte- und Verdünnungsvermögen für die sicherheitliche Bewertung des Einschlussvermögens unberücksichtigt. Die Ergebnisse der numerischen Analyse dieses Rechenfalles sind hinsichtlich der Ausweisung des ewG und der Bewertung seines Einschlussvermögens als konservativ abdeckend zu betrachten.

#### **3.4.4.4 Fallstudie Diskretisierung**

In der **Fallstudie Diskretisierung** wird der Einfluss der numerischen Diskretisierung, d. h. die interne Aufteilung der Modellsegmente in Blöcke, analysiert. Es werden hierfür Varianten mit gröberer und mit feinerer Diskretisierung mit den Ergebnissen des Basisfalls verglichen.

Im Basisfall wurden die Segmente für die Richtstrecken intern mit Blocklängen von etwa 20 m diskretisiert. In der Variante „grobe“ Diskretisierung wurde auf eine interne Diskretisierung der Segmente gänzlich verzichtet, die Länge der Segmente entspricht damit der Blocklänge. In der Variante „feine“ Diskretisierung wurden die internen Blocklängen auf etwa 5 m reduziert, die Diskretisierung der Richtstrecken also im Vergleich zum Basisfall etwa 4-fach verfeinert.

Auf Grundlage der erzielten Ergebnisse dieser Varianten kann zum einen eine Aussage über den Einfluss der numerischen Diskretisierung auf die Modellergebnisse getroffen werden. Zum anderen kann auch bewertet werden, ob der im Basisfall gewählte Diskretisierungsgrad ausreichend fein ist und die Ergebnisse insofern hinreichend genau für die sicherheitliche Bewertung des Referenzsystems sind.

#### **3.4.5 What-if-Fälle**

Außerhalb der Betrachtung des Basisfalls und seiner Varianten wurden zusätzliche What-if-Fälle definiert, um die Robustheit des Systemverhaltens und den Einfluss einzelner Systemkomponenten und deren Sicherheitsfunktionen gezielt analysieren zu können. Dabei wurden z. B. einzelne Parameter mit Werten verwendet, die außerhalb realistischer Bandbreiten liegen, oder es wurden Annahmen getroffen, die sich bei einer Szenarienanalyse als nicht plausibel darstellen, z. B. das gleichzeitige instantane

Versagen der geotechnischen Barrieren. Letztlich ist allen What-if-Fällen gemein, dass sie nicht von einer Einteilung der Eintrittswahrscheinlichkeit herrühren. Für solche What-if-Fälle existieren daher auch keine Vorgaben in den Sicherheitsanforderungen.

#### **3.4.5.1 Kein Versagen der Verschlussbauwerke im Nachweiszeitraum**

Im Basisfall wird unterstellt, dass die Verschlussbauwerke nach 50.000 Jahren versagen. Dies wird im Modell durch eine um zwei Größenordnungen erhöhte Permeabilität umgesetzt. Im What-if-Fall wird unterstellt, dass alle Verschlüsse bis zum Ende des Simulationszeitraums intakt bleiben, bzw. dass im Modell die niedrige Permeabilität der Verschlussbauwerke erhalten bleibt.

#### **3.4.5.2 Instantanes Versagen der Verschlussbauwerke**

Im Gegensatz zur Annahme, dass die Verschlussbauwerke nicht versagen (siehe Kapitel 3.4.5.1), wird in diesem What-if-Fall angenommen, dass die Verschlussbauwerke instantan ausfallen. Das bedeutet im Modell, dass die erhöhte Permeabilität der Verschlussbauwerke ab Beginn der Modellrechnung angesetzt wird und bis zum Ende der Simulationsdauer anhält.

#### **3.4.5.3 Inventar ohne Berücksichtigung der ausgedienten Brennelemente**

Die POLLUX<sup>®</sup>-Behälter mit den ausgedienten Brennelementen aus den Leistungsreaktoren nehmen einen großen Teil der Endlagerfläche ein, so dass anzunehmen ist, dass die Freisetzung der Radionuklide aus diesen Brennelementen die Konsequenzen dominiert. Um den Einfluss der ausgedienten Brennelemente aus den Leistungsreaktoren zu untersuchen, wird das Inventar der POLLUX<sup>®</sup>-Behälter auf Null gesetzt. Alle übrigen Eingangsparameter bleiben wie im Basisfall.

#### **3.4.6 Probabilistische Analysen des Referenzsystems**

Für das Referenzsystem „Flache Lagerung – Streckenlagerung“ wurden neben den aufgeführten deterministischen Rechnungen auch **probabilistische Rechnungen** mit **Ungewissheits- und Sensitivitätsanalysen** durchgeführt. Zwei Varianten wurden dabei zu Grunde gelegt: Ein Referenzfall als Basis mit realitätsnahen Werten innerhalb der wahrscheinlichen Entwicklungen des Endlagersystems im Sinne der Sicherheitsanforderung und ein Fall mit auch weniger wahrscheinlichen Ausprägungen aller variier-

ten Parameter, der zur Bewertung der Auswirkungen einer möglichst großen Gesamtheit an wahrscheinlichen und weniger wahrscheinlichen Entwicklungen dient. Letzterer wird als klassischer Ansatz bezeichnet. Es wurden Stichproben für die Monte-Carlo-Simulationen erzeugt, wobei der Umfang der Stichprobe für den Referenzfall 1000 Realisationen und für den klassischen Ansatz 2000 Realisationen beträgt. Eine höhere Anzahl von Realisationen für den klassischen Ansatz wurde gewählt, damit die Auswertung für die Sensitivitätsanalyse robuster wird. Die probabilistischen Berechnungen wurden mit den eigenentwickelten Codes RepoSTAR /BEC 16/ und RepoSUN durchgeführt, die als Module im Programmpaket RepoTREND /REI 16/ enthalten sind.

#### **3.4.6.1 Referenzfall**

Der **Referenzfall** repräsentiert den probabilistischen Rechenfall mit den wahrscheinlichen Ausprägungen (aller variierten Parameter) zur Umsetzung einer möglichst großen Gesamtheit an wahrscheinlichen Entwicklungen des Endlagersystems.

Die Auswahl der Parameter sowie die Festlegung der Bandbreiten ist ein aufwändiges Unterfangen, das einen großen Abstimmungsbedarf erfordert. Letztlich muss für jeden Parameter im Modell entschieden werden, ob und mit welcher Verteilungsfunktion er variiert wird. Diese Entscheidungen müssen aus Gründen der Nachvollziehbarkeit dokumentiert werden. Im vorliegenden FuE-Vorhaben wurde dieser Schritt ausgelassen und die Parameterauswahl auf der Grundlage der Erfahrungen von Sensitivitätsanalysen aus früheren sicherheitsanalytischen Bewertungen, insbesondere aus ISIBEL-II /BUH 16/, durchgeführt. Für die Verteilungen und Bandbreiten wurden Einschätzungen der Modellierer verwendet. Die vorgenommenen Einschätzungen sollen beispielhaft die Umsetzung des Referenzszenariums in einen probabilistischen Rechenlauf aufzeigen und dienen dem Test des vorhandenen Instrumentariums.

#### **3.4.6.2 Klassischer Ansatz**

Nach dem in ISIBEL-II eingeführten, neuen Ansatz probabilistischer Sicherheitsanalysen werden einzelne, bezüglich der Wahrscheinlichkeit bereits klassifizierte, Szenarien untersucht und an den in den Sicherheitsanforderungen vorgegebenen Kriterien gemessen /BUH 16/. Dieses Verfahren gelangte in KOSINA für die Ableitung des Referenzfalls als Repräsentant für eine wahrscheinliche Entwicklung des Referenzsystems beispielhaft zur Anwendung. Dagegen wurde in früheren Analysen durch die Variation aller unabhängigen Parameter untersucht, wie sich das Gesamtsystem verhält, wenn

diese Parameter gleichzeitig mit festgelegten Verteilungen (über ihre gesamte Ausprägung) variiert werden. Mit einem solchen „globalen“ Rechenfall können Wahrscheinlichkeiten aus den Konsequenzen abgeleitet werden. Dieser Rechenfall wird als klassischer Ansatz bezeichnet.

Zusätzlich zu dem in Kapitel 3.4.6.1 aufgeführten probabilistischen Referenzfall wurde daher ein Rechenfall mit dem klassischen Ansatz untersucht. Der Vergleich der Ergebnisse soll veranschaulichen, welche globale Bandbreite der Konsequenzen theoretisch möglich ist und welche Unterschiede zum Referenzfall und dem neuen Ansatz bestehen. Gegenüber dem Rechenfall des Referenzszenariums sind die Bandbreiten der Parameterwerte größer und es werden andere Verteilungsfunktionen verwendet. Die Ergebnisse mit dem klassischen Ansatz sollen weitere Einschätzungen ermöglichen, wie zuverlässig die mit den deterministischen Variantenrechnungen und dem probabilistischen Referenzfall erzielten Ergebnisse sind.

### 3.4.7 Endlagervarianten

Die Rechenfälle für die Endlagervarianten „Horizontale Bohrlochlagerung“ und „Vertikale Bohrlochlagerung“ basieren im Wesentlichen auf den gleichen Modellannahmen wie das Referenzsystem „Streckenlagerung“, siehe Kapitel 3.4.1. Die zugrundeliegenden Endlagerkonzepte sind in /BER 18/ detailliert beschrieben und in den Kapiteln 3.3.2 und 3.3.3 grob umrissen.

Allen Modellrechnungen zu den Endlagervarianten mit horizontaler oder vertikaler Bohrlochlagerung liegt die Annahme zugrunde, dass jeweils im **Referenzszenarium** der Varianten durch die technische Auslegung der Bohrlochverrohrung (Liner) und Bohrlochverschlüsse ein Lösungskontakt der Abfälle dauerhaft, d. h. über den gesamten Nachweiszeitraum von einer Million Jahre, vermieden werden kann. Als **Versagensszenarium** für die Varianten der Bohrlochlagerung wird hingegen unterstellt, dass alle Bohrlochverschlüsse nach einer gewissen Zeitdauer ihre Dichtheit verlieren und hydraulisch durchlässig für in das Endlager eindringende Lösungen werden. Der Zeitpunkt des Versagens der Bohrlochverschlüsse der horizontalen und vertikalen Bohrlochlagerung wird in diesen Rechenfällen analog zur Lebensdauer der geotechnischen Schacht- und Streckenverschlüsse mit 50.000 Jahren angenommen.

Zusätzlich zum Referenz- und Versagensszenarium wurden für die (vertikale) Bohrlochlagerung zum besseren Verständnis des Systemverhaltens zwei What-if-

Rechenfälle untersucht: beschleunigtes Versagen der Behälter und beschleunigte Mobilisierung aus den Behältern. Anhand der Ergebnisse können Aussagen über den Einfluss von Behälterausfall und Mobilisierung für die Brennstab-Kokillen (BSK) getroffen werden. Diese können sich diesbezüglich ggf. von den Eigenschaften der POLLUX®-Behälter (Streckenlagerung, Basisfall) unterscheiden.

### **3.5 Datengrundlage**

Wie in Kapitel 3.4 dargestellt, basieren die hier vorgestellten Rechnungen, insbesondere für das Referenzsystem der Streckenlagerung, auf Modellrechnungen im Vorhaben ISIBEL /BUH 08b/ und ISIBEL-II /BUH 16/. Daher wurden die dort verwendeten Eingangsdaten in großem Umfang übernommen und mit den spezifischen Daten des Vorhabens KOSINA modifiziert. Im Folgenden sind die Daten für alle Modellrechnungen in gestraffter Form zusammengestellt; Details sind den o. g. Berichten aus dem Vorhaben ISIBEL zu entnehmen.

Als Zeitpunkt Null der Modellrechnungen wird der Zeitpunkt angenommen, an dem das gesamte Grubengebäude verfüllt und verschlossen ist. Dass einige der zuerst verfüllten Einlagerungsfelder bereits vorher abgeworfen werden, wird in den Modellrechnungen berücksichtigt.

#### **3.5.1 Daten für den Basisfall**

Die Grundlagen für das Referenzsystem sind in Kapitel 3.3.1 beschrieben. Im vorliegenden Kapitel sind die Parameterwerte für die deterministischen Rechnungen des Basisfalls zusammengestellt.

##### **3.5.1.1 Nahfeld**

Im Folgenden werden die Modelldaten für die Abfallbinde, die Abfallinventare, die Mobilisierung und das Grubengebäude sowie die allgemeinen Modelldaten zusammengestellt. Die Rechnungen wurden ohne Berücksichtigung von Gasbildung und Gasspeicher-Effekten durchgeführt.

Die Mobilisierung der Radionuklide aus den verglasten Abfällen (CSD-V-Kokillen) erfolgt kongruent mit der Korrosion der Glasmatrix. Die Glaskorrosion wird über die oberflächenbezogene Reaktionsrate  $j(t)$  in  $\text{kg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$  berechnet /HIR 99/:

$$j(t) = A_{MOB} \cdot \exp\left(-\frac{Q}{R} \left[\frac{1}{T} - \frac{1}{T_R}\right]\right) \quad (3.1)$$

Hierbei sind  $Q$  die Aktivierungsenergie in  $\text{J}\cdot\text{kmol}^{-1}$ ,  $A_{MOB}$  die oberflächenbezogene Reaktionsrate zum Zeitpunkt  $t$  in  $\text{kg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$  bei der Referenztemperatur  $T_R$  in K,  $R$  die allgemeine Gaskonstante in  $\text{J}\cdot(\text{K}\cdot\text{kmol})^{-1}$  und  $T$  die Temperatur in K.

In Anlehnung an frühere Arbeiten wird eine Glasmasse pro CSD-V-Kokille von 412 kg angenommen, als Hohlraumvolumen  $0,02 \text{ m}^3$  pro Kokille. Die Glasoberfläche wurde mit  $16,5 \text{ m}^2$  pro Kokille angenommen, die Metallmasse pro Kokille mit 80 kg. In Tabelle 3.1 sind die Parameter zusammengestellt, die für die Mobilisierung aus verglasten Abfällen und aus Strukturteilen verwendet wurden.

**Tab. 3.1** Mobilisierungsparameter /BUH 16/

Parameter	Wert	Dimension
Reaktionsrate der Glasmatrix ( $A_{MOB}$ )	0,365	$\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$
Aktivierungsenergie der Glasmatrix ( $Q$ )	75	$\text{kJ}/\text{mol}$
Effektive Oberfläche der Glasmatrix	16,5	$\text{m}^2$
Referenztemperatur für Glasmobilisierung ( $T_R$ )	298,15	K
Mobilisierungsrate Strukturteile	0,1	$\text{a}^{-1}$

Für die Mobilisierung der Radionuklide aus den ausgedienten Brennelementen wird ein Ansatz verwendet, der eine Mobilisierung mit einer konstanten Rate aus drei Bereichen der Brennelemente vorsieht: aus den Metallteilen, der Brennstoffmatrix und aus der sogenannten „instant release fraction“ (IRF). In Tabelle 3.2 sind die Daten zusammengestellt, die zur Berechnung der Mobilisierung und der Inventare in den Brennelement-Behältern und ggf. zur Berechnung der Sorption an den Behältermaterialien erforderlich sind.

**Tab. 3.2** Daten für die Behälter der Streckenlagerung /BER 15/

Typ	Volumen [m <sup>3</sup> ]	Anzahl	Masse [Mg]
POLLUX <sup>®</sup> -9	10,55	887	65
POLLUX <sup>®</sup> -10	10,55	2120	65
CASTOR <sup>®</sup> THTR/AVR, KNK	4,16	461	26
CASTOR <sup>®</sup> MTR 2	2,62	69	16
Gussbehälter Typ II	1,3	2620	10

Für den Ausfall aller Brennelement-Behälter wurde eine Lebensdauer von 500 Jahren angesetzt, siehe Tabelle 3.14.

In Tabelle 3.3 sind die (konstanten) relativen Freisetzungsraten für die Mobilisierung aus den drei oben genannten Bereichen der Brennelemente zusammengestellt. Diese Werte wurden in /BUH 08b/ für LWR-Brennelemente ermittelt, im vorliegenden Bericht aber für die Mobilisierung aus dem Gemisch aus LWR-, DWR- und WWER-Brennelementen sowie für Brennstabkockillen (BSK-V und BSK-H) verwendet, siehe Kapitel 3.5.4. Tabelle 3.4 enthält die relativen Inventaranteile für die drei Bereiche. Angegeben sind auch die Löslichkeitsgrenzen; Sorption wurde nicht berücksichtigt. Blei und Polonium sind nicht im eingelagerten Inventar enthalten, werden aber als Tochternuklide berücksichtigt. Es wird angenommen, dass sie unbegrenzt löslich sind.

**Tab. 3.3** Relative Freisetzungsraten in den Bereichen eines Brennelements /BUH 16/

Parameter	Metallteile	Matrix	IRF
Mobilisierungsrate [a <sup>-1</sup> ]	3,6 · 10 <sup>-3</sup>	1,0 · 10 <sup>-6</sup>	Instantan (1,0 a <sup>-1</sup> )

IRF = Instant Release Fraction (Anteil im Porenraum, der sofort freigesetzt wird)

**Tab. 3.4** Elementspezifische Inventaranteile in den einzelnen Bereichen eines LWR-Brennelementes und Löslichkeitsgrenzen /LAR 13/

Element	Metallteile	Brennstoff- matrix	IRF	Löslichkeits- grenze [mol/m <sup>3</sup> ]
C	0,418	0,524	0,058	1 · 10 <sup>10</sup>
Cl	0,515	0,436	0,048	1 · 10 <sup>10</sup>
Ca	0,325	0,675	0,000	1 · 10 <sup>10</sup>
Ni, Nb	1,000	0,000	0,000	1 · 10 <sup>10</sup>
Sr	0,000	0,990	0,010	1 · 10 <sup>10</sup>

Element	Metallteile	Brennstoffmatrix	IRF	Löslichkeitsgrenze [mol/m <sup>3</sup> ]
Zr	0,049	0,951	0,000	9,15·10 <sup>-2</sup>
Mo	0,986	0,014	0,000	1·10 <sup>10</sup>
Tc	0,001	0,998	0,001	9,92·10 <sup>-2</sup>
Pd	0,000	0,999	0,001	1·10 <sup>10</sup>
I, Cs	0,000	0,980	0,020	1·10 <sup>10</sup>
Sm	0,000	1,000	0,000	7,65
Am	0,000	1,000	0,000	7,65
Np	0,000	1,000	0,000	7,52·10 <sup>-2</sup>
Pu	0,000	1,000	0,000	2,40·10 <sup>-3</sup>
U	0,000	1,000	0,000	0,755
Th	0,000	1,000	0,000	0,233
Se, Rb, Sn, Cm, Ra, Pa, Ac	0,000	1,000	0,000	1·10 <sup>10</sup>

Ein Wert von 1·10<sup>10</sup> mol/m<sup>3</sup> bedeutet unbegrenzte Löslichkeit.

In den folgenden Tabellen 3.5 bis 3.8 sind weitere Daten zusammengestellt, die zur Modellierung der LOPOS-Rechnungen verwendet wurden. Die Permeabilität im Infrastrukturbereich (Schotter) wird mit 1·10<sup>-14</sup> m<sup>2</sup> angesetzt. Angefeuchteter Versatz ist nur in den Segmenten RU-0 und RK-0 für die Zugangsstrecken vorhanden.

**Tab. 3.5** Anzahl der Abfälle im LOPOS-Modell pro Modell-Einlagerungsfeld; Streckenlagerung; „1“ = alle Behälter sind in diesem Feld

Abfalltyp	ES-Q1a	ES-Q1b	ES-Q2	ES-Q3a	ES-Q3b	ES-Q4
HTR						1
AVR						1
CSD-B						1
CSD-C						1
CSD-V				1		
BE-MIX		810	810		500	
v-Strukt	1					

CSD-V: verglaste Abfälle; BE-MIX: POLLUX<sup>®</sup> mit Brennelementen; v-Strukt: Strukturteile

Die Angaben in Tabelle 3.5 erfolgen im Hinblick auf die Inventarangaben in Tabelle 3.13. Dort beziehen sich die Inventare jeweils auf das Gesamtinventar aller Behälter dieses Typs, mit Ausnahme der POLLUX®-Behälter oder Brennstabkokillen (BSK) mit ausgedienten Brennelementen, für die das Inventar pro Behälter angegeben ist. In Tabelle 3.5 bedeutet folglich eine 1, dass alle Abfallbehälter dieses Typs in dem Feld eingelagert sind.

**Tab. 3.6** Anzahl der Behälter/Abfälle für die in LOPOS modellierten Segmente bei Streckenlagerung

Segment	Einlagerungsfeld	Abfälle / Behälter	Anzahl
ES-Q4	1	CASTOR®-AVR/HTR	457
		POLLUX®-9; CSD-C, CSD-B	472
ES-Q3b	3 und 4	POLLUX®-10	500
ES-Q3a	2	POLLUX®-9, CSD-V	415
ES-Q2	5 bis 7	POLLUX®-10	810
ES-Q1b	8 bis 10	POLLUX®-10	810
ES-Q1a	10	Gussbehälter Typ 2; Strukturteile	2.620

Die geometrischen Daten in den Tabellen 3.7 und 3.8 ergeben sich aus der modellmäßigen Zusammenfassung bzw. Aufteilung der Einlagerungsfelder und anderen Grubenbaue gemäß Abbildung 3.2. Die in /BER 18/ angegebenen Abmessungen der Grubenbaue werden dabei berücksichtigt. Alle Segmente liegen auf dem Referenzniveau mit Ausnahme des Schachtverschlusses, dessen Mittelpunkt 51,85 m oberhalb liegt.

**Tab. 3.7** Geometrische Daten der Modell-Einlagerungsfelder in LOPOS bei Streckenlagerung

Segment	Länge [m]	Höhe [m]	Breite [m]	Volumen [m³]	Anzahl
ES-Q1a	173	3,7	12,2	7.809	1
ES-Q1b	245	3,7	153,0	138.695	1
ES-Q2	245	3,7	153,0	138.695	1
ES-Q3a	245	3,7	81,6	73.970	1
ES-Q3b	245	3,7	94,5	85.664	1
ES-Q4	245	3,7	113,0	102.435	1

**Tab. 3.8** Geometrische Daten der Modellsegmente für den Infrastrukturbereich, die Schachtverschlüsse, Zugangsstrecken, Richtstrecken und Querschläge

Segment	Länge [m]	Höhe [m]	Breite [m]	Porosität [-]	Zeitpunkt ** [a]	Abstand * [m]	Anzahl
S-V	100	7,0	6,53	0,2	0	51,85	1
INFRA-B	1000	3,7	60,7	*** 0,38	0	0	1
INFRA-RU	100	3,7	6,98	*** 0,38	0	0	1
INFRA-RK	100	3,7	7,19	*** 0,38	0	0	1
RU-V1	100	3,7	6,98	0,2	0	0	1
RU-V2	100	3,7	6,98	0,2	0	0	1
RK-V1	100	3,7	7,19	0,2	0	0	1
RK-V2	100	3,7	7,19	0,2	0	0	1
RU-0	300	3,7	6,98	0,35	0	0	1
RU-1	750	3,7	6,98	0,35	0	0	1
RU-2	750	3,7	6,98	0,35	-6	0	1
RU-3	750	3,7	6,98	0,35	-12	0	1
RU-4	100	3,7	6,98	0,35	-21	0	1
RK-0	300	3,7	7,19	0,35	0	0	1
RK-1	750	3,7	7,19	0,35	0	0	1
RK-2	750	3,7	7,19	0,35	-6	0	1
RK-3	750	3,7	7,19	0,35	-12	0	1
RK-4	100	3,7	7,19	0,35	-21	0	1
Q1	380	3,7	21,6	0,35	0	0	1
Q2	380	3,7	21,6	0,35	-6	0	1
Q3	380	3,7	21,6	0,35	-12	0	1
Q4	380	3,7	7,19	0,35	-21	0	1

\* Abstand des Segmentmittelpunkts zur Referenzteufe des Grubengebäudes

\*\* Zeitpunkt relativ zum Modell-Nullpunkt, zu dem das Segment (bzw. das Einlagerungsfeld) abgeworfen wird.

\*\*\* Die Permeabilität des Schotterversatzes im Infrastrukturbereich beträgt  $10^{-14} \text{ m}^2$ .

Für den Schachtverschluss S-V wurden folgende Parameter für die Berechnung von Austauschwirkungen (Diffusion) angenommen: effektive Länge: 250 m; effektiver Querschnitt:  $10 \text{ m}^2$ .

In den Tabellen 3.9 und 3.10 sind die verwendeten Konvergenzparameter angegeben, siehe auch die Werte für die langsame Konvergenz in Kapitel 3.5.2. Sie wurden durch Anpassung an die Porositätsverläufe für die schnelle Konvergenz aus dem VSG-Bericht /LAR 13/ ermittelt.

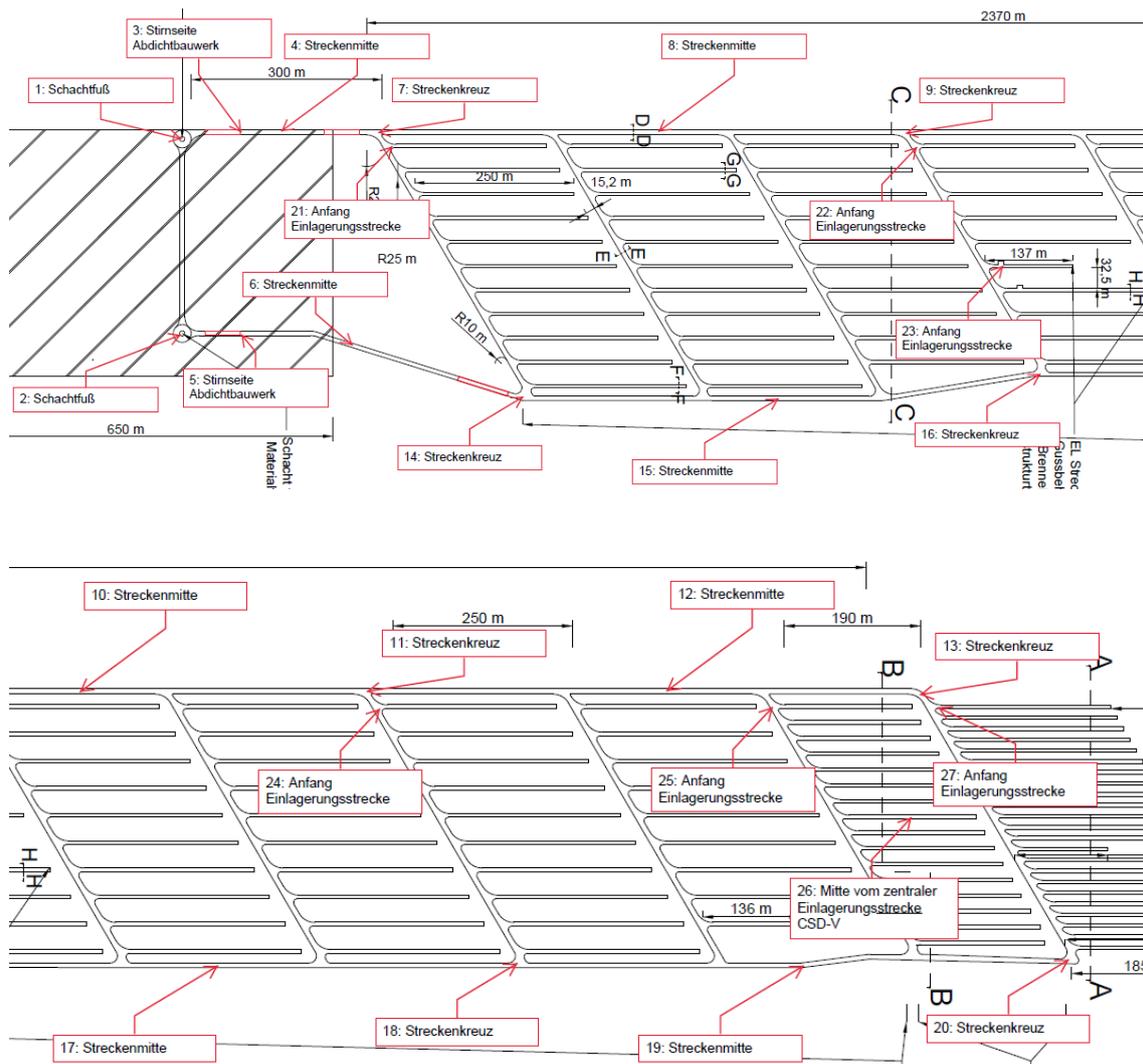
**Tab. 3.9** Globale Konvergenzparameter (schnelle Konvergenz)

Parameter	Wert	Dimension
Global: $g_1$ (Stützfunktion Versatz)	-1	-
Global: $h_1$ (Stützfunktion Versatz)	-2	-
Global: $g_2$ (feucht)	1.000	-
Global: $g_2$ (trocken)	100	-
Global: Exponent in Druckfunktion	5	-
Global: $K_0$ (Referenz-Konvergenzrate)	$1 \cdot 10^{-8}$	$a^{-1}$
Global: $K_{tr}$ (Trocken-Konvergenzrate)	0,1	$a^{-1}$
Global: Referenzporosität	0,3	-
Global: Aktivierungsenergie von Salz	6.500	K
Global: Endporosität (Parameter lambda)	$4 \cdot 10^{-6}$	-

**Tab. 3.10** Lokale Konvergenzparameter (schnelle Konvergenz)

Segment	Lokale Variation ( $f_{loc}$ )	Erhöhung der Kriechraten nach Durchfeuchtung ( $x_F$ )	Lokale Variation des Referenzdrucks ( $f_{pG}$ )	Parameter in der Zeitfunktion ( $\lambda_s$ )	Fluiddruck bei voll ausgeprägtem Feuchtekriechen ( $p_0$ ) [MPa]
Q1, Q2, Q3, Q4, ES-Q1a, RU-1, RU-2, RU-3, RU-4, RK-1, RK-2, RK-3, RK-4	0,6	4	1	0,008	0,5
RU-0, RK-0	0,2	4	1	0,2	1
ES-Q1b, ES-Q2, ES-Q3a, ES-Q3b, ES-Q4	1,0	1	1	1	0,5

Die Temperaturdaten für die Modellrechnungen wurden für jede Endlagervariante mit einem semianalytischen Code (LinSour) auf Grundlage detaillierter thermomechanischer Modelle (FLAC3D) vorlaufend berechnet /BER 18/. In Tabelle 3.11 sind die Temperaturstützstellen für die Streckenlagerung zusammengestellt (Nummern gemäß Abbildung 3.9), die für die einzelnen Modellsegmente verwendet wurden.



**Abb. 3.9** Temperaturstützstellen für die Streckenlagerung; nahe dem Infrastrukturbereich (oben) und weiter vom Schacht entfernt (unten)

**Tab. 3.11** Zuordnung der Temperaturstützstellen zu den Modellsegmenten für die Streckenlagerung

Nummer Stützstelle	Modellsegment	Nummer Stützstelle	Modellsegment
3	RK-0	18	RU-3
5	RU-0	20	RU-4
7	RK-1, Q1	21	ES-Q1b
9	RK-2, Q2	22	ES-Q2
11	RK-3, Q3	24	ES-Q3b
13	RK-4, Q4	25	ES-Q3a
14	RU-1	27	ES-Q4
16	RU-2	28	ES-Q1a

Die Halbwertszeiten der in den Rechnungen betrachteten Radionuklide sind in Tabelle 3.12 zusammengestellt. Dabei wurden die Werte für Se-79 gegenüber früheren Werten verändert.

**Tab. 3.12** Halbwertszeiten [a] der betrachteten Radionuklide /GRS 09/

Spalt- und Aktivierungsprodukte		Th- und Np-Reihe		U- und Ac-Reihe	
Nuklid	HWZ	Nuklid	HWZ	Nuklid	HWZ
C-14	$5,730 \cdot 10^3$	Cm-248	$3,400 \cdot 10^5$	Cm-246	$4,730 \cdot 10^3$
Cl-36	$3,000 \cdot 10^5$	Pu-244	$8,000 \cdot 10^7$	Pu-242	$3,750 \cdot 10^5$
Ca-41	$1,030 \cdot 10^5$	Cm-244	$1,810 \cdot 10^1$	Am-242m	$1,410 \cdot 10^2$
Ni-59	$7,500 \cdot 10^4$	Pu-240	$6,563 \cdot 10^3$	Cm-242	$4,461 \cdot 10^{-1}$
Co-60	$5,272 \cdot 10^0$	U-236	$2,342 \cdot 10^7$	Pu-238	$8,774 \cdot 10^1$
Ni-63	$1,000 \cdot 10^2$	Th-232	$1,405 \cdot 10^{10}$	U-238	$4,468 \cdot 10^9$
Se-79 *	$3,270 \cdot 10^5$	U-232	$6,890 \cdot 10^1$	Th-234	$6,600 \cdot 10^{-2}$
Rb-87	$4,800 \cdot 10^{10}$	Ra-228	$5,750 \cdot 10^0$	U-234	$2,455 \cdot 10^5$
Sr-90	$2,864 \cdot 10^1$	Th-228	$1,913 \cdot 10^0$	Th-230	$7,540 \cdot 10^4$
Zr-93	$1,500 \cdot 10^6$	Ra-224	$1,002 \cdot 10^{-2}$	Ra-226	$1,600 \cdot 10^3$
Mo-93	$3,500 \cdot 10^3$			Pb-210	$2,230 \cdot 10^1$
Nb-94	$2,000 \cdot 10^4$	Cm-245	$8,500 \cdot 10^3$	Po-210	$3,5 \cdot 10^{-1}$
Tc-99	$2,100 \cdot 10^5$	Pu-241	$1,435 \cdot 10^1$		
Pd-107	$6,500 \cdot 10^6$	Am-241	$4,322 \cdot 10^2$	Cm-247	$1,560 \cdot 10^7$
Sn-126 *	$2,345 \cdot 10^5$	Np-237	$2,144 \cdot 10^6$	Cm-243	$2,910 \cdot 10^1$
I-129	$1,570 \cdot 10^7$	Pa-233	$7,390 \cdot 10^{-2}$	Am-243	$7,370 \cdot 10^3$
Cs-135	$2,000 \cdot 10^6$	U-233	$1,592 \cdot 10^5$	Pu-239	$2,411 \cdot 10^4$
Cs-137	$3,017 \cdot 10^1$	Th-229	$7,880 \cdot 10^3$	U-235	$7,038 \cdot 10^8$
Sm-151	$9,300 \cdot 10^1$	Ra-225	$4,050 \cdot 10^{-2}$	Pa-231	$3,276 \cdot 10^4$
		Ac-225	$2,740 \cdot 10^{-2}$	Ac-227	$2,1773 \cdot 10^1$
				Th-227	$5,130 \cdot 10^{-2}$

\* Für die Halbwertszeit von Sn-126 liegen neue Messwerte vor. In den Rechnungen wurde mit dem alten, in der Tabelle angegebenen Wert gerechnet, um die Ergebnisse mit früheren Rechnungen vergleichen zu können. Die neue Halbwertszeit wäre: Sn-126:  $1,98 \cdot 10^5$  a /BIE 09/. Die Halbwertszeit von Se-79 wurde gegenüber dem früheren Wert korrigiert.

Das Inventar der Radionuklide ist aus dem Vorhaben VSG /LAR 13/ übernommen und in Tabelle 3.13 zusammengestellt. Das Inventar eines Modell-Brennelementbehälters ist in allen Rechnungen gleich und entspricht entweder dem Inventar eines POLLUX®-10-Behälters oder mehreren BSK.

**Tab. 3.13** Inventare der einzelnen Abfallarten (Zeitpunkt: 2075; Beginn der Einlagerung: 2050; Beginn der Nachverschlussphase: 2080) /LAR 13/ (Gesamtinventar; bei Brennelementen umgerechnet auf das Inventar pro Behälter)

Nuklid	Strukturteile [Bq]	DWR-/SWR-/WWER-Brennelemente [Bq pro Behälter]	CSD-V [Bq]	CSD-C [Bq]	CSD-B [Bq]	AVR [Bq]	HTR [Bq]
C-14	6,23·10 <sup>12</sup>	1,86·10 <sup>11</sup>	6,63·10 <sup>13</sup>	5,62·10 <sup>13</sup>	0	2,99·10 <sup>12</sup>	1,60·10 <sup>12</sup>
Cl-36	2,32·10 <sup>11</sup>	5,34·10 <sup>09</sup>	1,88·10 <sup>12</sup>	2,04·10 <sup>12</sup>	0	9,26·10 <sup>10</sup>	4,11·10 <sup>10</sup>
Ca-41	7,46·10 <sup>09</sup>	2,96·10 <sup>08</sup>	1,41·10 <sup>11</sup>	6,93·10 <sup>10</sup>	0	0	4,49·10 <sup>08</sup>
Ni-59	4,03·10 <sup>14</sup>	1,04·10 <sup>12</sup>	3,19·10 <sup>11</sup>	9,05·10 <sup>14</sup>	0	4,11·10 <sup>09</sup>	1,54·10 <sup>09</sup>
Ni-63	3,76·10 <sup>16</sup>	1,01·10 <sup>14</sup>	2,73·10 <sup>13</sup>	7,15·10 <sup>16</sup>	0	9,48·10 <sup>08</sup>	1,20·10 <sup>11</sup>
Se-79	8,81·10 <sup>06</sup>	1,38·10 <sup>10</sup>	8,53·10 <sup>12</sup>	7,60·10 <sup>07</sup>	0	2,75·10 <sup>10</sup>	1,99·10 <sup>11</sup>
Sr-90	3,55·10 <sup>11</sup>	5,39·10 <sup>15</sup>	2,02·10 <sup>18</sup>	3,45·10 <sup>12</sup>	4,36·10 <sup>15</sup>	4,08·10 <sup>15</sup>	6,46·10 <sup>15</sup>
Zr-93	1,51·10 <sup>12</sup>	5,67·10 <sup>11</sup>	3,41·10 <sup>14</sup>	1,78·10 <sup>13</sup>	0	7,42·10 <sup>11</sup>	8,77·10 <sup>11</sup>
Nb-94	9,66·10 <sup>13</sup>	1,66·10 <sup>12</sup>	5,71·10 <sup>10</sup>	1,04·10 <sup>15</sup>	0	2,54·10 <sup>07</sup>	2,12·10 <sup>10</sup>
Mo-93	1,75·10 <sup>12</sup>	2,30·10 <sup>10</sup>	1,77·10 <sup>11</sup>	1,33·10 <sup>13</sup>	0	8,45·10 <sup>08</sup>	9,10·10 <sup>08</sup>
Tc-99	2,27·10 <sup>11</sup>	4,23·10 <sup>12</sup>	2,64·10 <sup>15</sup>	1,61·10 <sup>12</sup>	0	4,08·10 <sup>12</sup>	5,42·10 <sup>12</sup>
Pd-107	5,31·10 <sup>06</sup>	4,33·10 <sup>10</sup>	1,97·10 <sup>13</sup>	1,61·10 <sup>08</sup>	0	6,20·10 <sup>09</sup>	4,79·10 <sup>09</sup>
Sn-126	2,27·10 <sup>07</sup>	1,81·10 <sup>11</sup>	9,60·10 <sup>13</sup>	6,15·10 <sup>08</sup>	0	1,40·10 <sup>11</sup>	1,77·10 <sup>11</sup>
I-129	9,98·10 <sup>05</sup>	8,99·10 <sup>09</sup>	4,97·10 <sup>12</sup>	2,50·10 <sup>07</sup>	0	8,01·10 <sup>09</sup>	1,14·10 <sup>10</sup>
Cs-135	2,12·10 <sup>07</sup>	1,48·10 <sup>11</sup>	8,21·10 <sup>13</sup>	2,93·10 <sup>08</sup>	0	1,43·10 <sup>11</sup>	1,34·10 <sup>11</sup>
Cs-137	8,86·10 <sup>11</sup>	9,04·10 <sup>15</sup>	3,08·10 <sup>18</sup>	1,10·10 <sup>13</sup>	1,44·10 <sup>16</sup>	4,66·10 <sup>15</sup>	6,94·10 <sup>15</sup>
Sm-151	1,83·10 <sup>10</sup>	7,49·10 <sup>13</sup>	3,49·10 <sup>16</sup>	1,97·10 <sup>11</sup>	0	2,66·10 <sup>13</sup>	6,40·10 <sup>13</sup>
Ra-226	7,34·10 <sup>01</sup>	1,89·10 <sup>06</sup>	5,33·10 <sup>08</sup>	1,34·10 <sup>03</sup>	0	1,39·10 <sup>07</sup>	4,42·10 <sup>08</sup>
Th-229	1,51·10 <sup>00</sup>	2,91·10 <sup>06</sup>	2,74·10 <sup>08</sup>	9,13·10 <sup>01</sup>	4,22·10 <sup>01</sup>	7,58·10 <sup>10</sup>	3,42·10 <sup>11</sup>
Th-230	6,87·10 <sup>03</sup>	1,65·10 <sup>08</sup>	1,56·10 <sup>10</sup>	9,96·10 <sup>04</sup>	0	1,06·10 <sup>09</sup>	1,42·10 <sup>10</sup>
Th-232	3,84·10 <sup>-03</sup>	1,07·10 <sup>05</sup>	1,09·10 <sup>08</sup>	4,29·10 <sup>-02</sup>	0	5,17·10 <sup>09</sup>	2,56·10 <sup>10</sup>
Pa-231	6,43·10 <sup>02</sup>	1,45·10 <sup>07</sup>	7,53·10 <sup>09</sup>	2,16·10 <sup>03</sup>	0	6,08·10 <sup>09</sup>	8,00·10 <sup>10</sup>
U-232	2,23·10 <sup>04</sup>	1,09·10 <sup>10</sup>	8,13·10 <sup>09</sup>	1,04·10 <sup>06</sup>	0	4,55·10 <sup>12</sup>	2,36·10 <sup>13</sup>
U-233	5,99·10 <sup>02</sup>	5,53·10 <sup>08</sup>	2,13·10 <sup>10</sup>	3,38·10 <sup>04</sup>	3,77·10 <sup>04</sup>	8,91·10 <sup>12</sup>	4,79·10 <sup>13</sup>
U-234	1,59·10 <sup>07</sup>	4,19·10 <sup>11</sup>	9,19·10 <sup>11</sup>	2,18·10 <sup>08</sup>	0	1,22·10 <sup>12</sup>	3,64·10 <sup>12</sup>
U-235	5,31·10 <sup>05</sup>	2,60·10 <sup>09</sup>	6,15·10 <sup>09</sup>	9,86·10 <sup>05</sup>	0	4,73·10 <sup>09</sup>	2,01·10 <sup>10</sup>
U-236	1,64·10 <sup>06</sup>	6,46·10 <sup>10</sup>	7,72·10 <sup>10</sup>	1,12·10 <sup>07</sup>	0	9,38·10 <sup>10</sup>	1,50·10 <sup>11</sup>
U-238	1,71·10 <sup>07</sup>	5,95·10 <sup>10</sup>	9,11·10 <sup>10</sup>	5,29·10 <sup>07</sup>	0	5,12·10 <sup>09</sup>	5,24·10 <sup>08</sup>
Np-237	4,08·10 <sup>06</sup>	1,33·10 <sup>11</sup>	6,29·10 <sup>13</sup>	1,95·10 <sup>08</sup>	4,51·10 <sup>08</sup>	8,32·10 <sup>10</sup>	8,02·10 <sup>10</sup>
Pu-238	1,00·10 <sup>10</sup>	1,29·10 <sup>15</sup>	2,04·10 <sup>15</sup>	5,90·10 <sup>11</sup>	0	3,40·10 <sup>14</sup>	2,68·10 <sup>14</sup>
Pu-239	7,36·10 <sup>10</sup>	9,65·10 <sup>13</sup>	4,09·10 <sup>14</sup>	5,34·10 <sup>11</sup>	0	6,31·10 <sup>12</sup>	1,66·10 <sup>12</sup>
Pu-240	5,16·10 <sup>10</sup>	2,13·10 <sup>14</sup>	1,14·10 <sup>15</sup>	4,00·10 <sup>11</sup>	0	1,29·10 <sup>13</sup>	4,52·10 <sup>12</sup>
Pu-242	4,13·10 <sup>07</sup>	1,29·10 <sup>12</sup>	2,13·10 <sup>12</sup>	3,82·10 <sup>09</sup>	0	8,60·10 <sup>10</sup>	1,88·10 <sup>10</sup>
Pu-244	8,99·10 <sup>01</sup>	1,49·10 <sup>08</sup>	8,45·10 <sup>09</sup>	2,39·10 <sup>05</sup>	0	2,35·10 <sup>06</sup>	2,10·10 <sup>05</sup>
Am-241	3,06·10 <sup>11</sup>	1,90·10 <sup>15</sup>	1,55·10 <sup>17</sup>	8,32·10 <sup>12</sup>	3,56·10 <sup>13</sup>	1,07·10 <sup>14</sup>	3,33·10 <sup>13</sup>

Nuklid	Struktur- teile [Bq]	DWR-/SWR- /WWER- Brenn- elemente [Bq pro Behälter]	CSD-V [Bq]	CSD-C [Bq]	CSD-B [Bq]	AVR [Bq]	HTR [Bq]
Am-242m	$2,85 \cdot 10^{08}$	$6,28 \cdot 10^{12}$	$8,42 \cdot 10^{14}$	$7,85 \cdot 10^{09}$	0	$1,42 \cdot 10^{11}$	$2,03 \cdot 10^{10}$
Am-243	$9,32 \cdot 10^{07}$	$1,68 \cdot 10^{13}$	$2,76 \cdot 10^{15}$	$4,58 \cdot 10^{10}$	0	$5,30 \cdot 10^{11}$	$7,96 \cdot 10^{10}$
Cm-245	$5,52 \cdot 10^{04}$	$7,26 \cdot 10^{11}$	$2,41 \cdot 10^{13}$	$7,11 \cdot 10^{08}$	0	$5,68 \cdot 10^{08}$	$2,01 \cdot 10^{08}$
Cm-246	$3,31 \cdot 10^{03}$	$1,19 \cdot 10^{11}$	$3,41 \cdot 10^{12}$	$1,30 \cdot 10^{08}$	0	$2,60 \cdot 10^{08}$	$2,81 \cdot 10^{07}$
Cm-247	$1,86 \cdot 10^{-03}$	$6,60 \cdot 10^{05}$	$8,89 \cdot 10^{06}$	$3,95 \cdot 10^{02}$	0	0	$3,71 \cdot 10^{01}$
Cm-248	$1,11 \cdot 10^{-03}$	$1,70 \cdot 10^{06}$	$1,70 \cdot 10^{07}$	$1,08 \cdot 10^{03}$	0	0	$4,36 \cdot 10^{01}$
<b>Gesamt</b>	<b><math>3,81 \cdot 10^{16}</math></b>	<b><math>1,82 \cdot 10^{16}</math></b>	<b><math>5,30 \cdot 10^{18}</math></b>	<b><math>7,36 \cdot 10^{16}</math></b>	<b><math>1,88 \cdot 10^{16}</math></b>	<b><math>9,26 \cdot 10^{15}</math></b>	<b><math>1,39 \cdot 10^{16}</math></b>

Eine globale Zwischenlagerzeit von 5 Jahren wurde für alle Abfälle berücksichtigt.

In Tabelle 3.14 sind alle weiteren Parameter zusammengestellt, die in den deterministischen Modellrechnungen verwendet wurden. Die Parameter beziehen sich auf die in LOPOS verwendeten Modellansätze /HIR 99/; ihre Werte wurden aus /LIU 16/ oder den Rechnungen im Vorhaben ISIBEL-II /BUH 16/ entnommen.

**Tab. 3.14** Sonstige Parameter (Nahfeld)

Parameter	Wert	Dimension
Lebensdauer eines Behälters (POLLUX®, BSK-V, BSK-H, CASTOR®, Gussbehälter)	500	a
Erdbeschleunigung	9,81	m/s <sup>2</sup>
Atmosphärendruck	0,1	MPa
geothermischer Gradient	0,03	K/m
mittlere Dichte von Steinsalz	2.200	kg/m <sup>3</sup>
mittlere Dichte der Grubenlösung	1.200	kg/m <sup>3</sup>
dynamische Viskosität der Grubenlösung	0,0015	Pa·s
Gebirgstemperatur auf Referenzteufe	304	K
hydrostatischer Druck auf Referenzteufe	8,8	MPa
Gebirgsdruck auf Referenzteufe	16,7	MPa
Exponent in Druckfunktion	4	-
Diffusionskoeffizient	$1,5 \cdot 10^{-9}$	m <sup>2</sup> /s
Aktivierungsenergie in Diffusionsterm	2.250	K
Dispersionslänge	0,01	m

Als Dispersionslänge wurden in früheren Rechnungen Werte von ca. 5 bis 10 m verwendet. In den vorliegenden Rechnungen wurde dieser Wert reduziert, weil angenommen wurde, dass zu den relevanten Zeiten, zu denen ein Transport von Radionukliden stattfindet, die Porosität nur noch sehr klein ist und die Dispersion daher von der Korngröße (bzw. dem Porendurchmesser) des Salzgruses bestimmt wird. Durch den kleinen Wert der Dispersionslänge wird auch gewährleistet, dass der Beitrag der Diffusion bei kleinen Porositäten nicht unterbewertet wird. Wegen des dominierenden diffusiven Transports spielt die Dispersion eine untergeordnete Rolle.

Als Feuchtigkeit in den Richtstreckensegmenten RK-0 und RU-0 wurde ein Wert von 0,5 Vol.-% des Porenraums angenommen. Dieser Wert wurde in eine Anfangslösungsmenge in den befeuchteten Streckensegmenten umgerechnet. Tabelle 3.15 zeigt die Werte für die Beziehung zwischen der Porosität und Permeabilität von versetzten Strecken.

**Tab. 3.15** Parameter für die Beziehung zwischen Porosität und Permeabilität

Parameter	Wert
Endwert der Porosität	0,01
Parameter (Vorfaktor)	$4,86 \cdot 10^{-10}$
Exponent	4,714

**Tab. 3.16** Parameter für Verschlussbauwerke

Parameter	Wert
Funktionsdauer Schachtverschluss	50.000 a
Funktionsdauer Streckenverschluss	50.000 a
Permeabilität eines Verschlusses während der Funktionsdauer	$1 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$
Permeabilität eines Verschlusses nach der Funktionsdauer	$1 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$
Länge eines Verschlusses	100 m

Für den Basisfall wird angenommen, dass nach Überschreiten der Funktionsdauer die Verschlussbauwerke nicht mehr ihre anfängliche Dichtwirkung haben werden. Im Modell nimmt dann die Permeabilität der Bauwerke um zwei Größenordnungen zu.

### 3.5.1.2 Biosphäre

Für die vereinfachte radiologische Langzeitaussage wird keine Strahlenexposition in der Biosphäre, sondern gemäß /KIN 18/ ein radiologischer Geringfügigkeitsindex (RGI) am Rand des ewG berechnet.

Für die Bewertung der Ergebnisse wird der Indikator RGI verwendet, siehe Kapitel 3.2. Die Berechnung des RGI erfolgt aus dem jährlichen Radionuklidstrom  $S_i$  [Bq/a] des Bereiches (Modellsegments) des Endlagers, der den Abschluss des ewG darstellt. Bei Undurchlässigkeit der geologischen Barriere im ewG sind dies die geotechnischen Verschlussbauwerke in den Schächten bzw. Strecken am Rand des ewG. Dieser Radionuklidstrom wird auf die jährlich geschöpfte Wassermenge  $W$  [m<sup>3</sup>/a] des Versorgungsbrunnens für das Kollektiv von 10 Erwachsenen verteilt.

Mit Hilfe von nuklidspezifischen Dosiskonversionsfaktoren  $DKF_i$  [Sv/a / Bq/m<sup>3</sup>] und dem Bezugswert für eine geringfügige Freisetzung  $K_{RGI}$  [Sv/a] ergibt sich daraus die Berechnungsvorschrift für den Indikator

$$RGI = \frac{10 \cdot \sum_i S_i \cdot DKF_i}{K_{RGI} \cdot W} \quad (3.2)$$

siehe /KIN 18/. Bei einem Wert für den RGI  $\leq 1$  ist die Freisetzung geringfügig.

Folgende Werte wurden zur Berechnung des RGI-Wertes verwendet:

- Die Wassermenge  $W$ , in der die Radionuklide verteilt werden, beträgt 5.000 m<sup>3</sup> pro Jahr für ein Kollektiv von 10 Erwachsenen.
- Die nuklidspezifischen Dosiskonversionsfaktoren  $DKF_i$  werden unter Verwendung der Dosisfaktoren für eine Altersgruppe  $> 17$  Jahre gemäß der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift /BMU 12/ und eines geeigneten Biosphärenmodells ermittelt.

- Der Bezugswert für eine geringfügige Freisetzung  $K_{RGI}$  beträgt 0,1 Personen-Millisievert pro Jahr /BMU 10/<sup>5</sup>.

Die verwendeten Dosiskonversionsfaktoren sind in Tabelle 3.17 angegeben.

**Tab. 3.17** Dosiskonversionsfaktoren (DKF) in [Sv/a pro Bq/m<sup>3</sup>] gemäß /PRÖ 02/, zitiert nach /BUH 16/

Spalt- und Aktivierungsprodukte		Th- und Np-Reihe		U- und Ac-Reihe	
Nuklid	DKF	Nuklid	DKF	Nuklid	DKF
C-14	$4,6 \cdot 10^{-8}$	Cm-248	$5,0 \cdot 10^{-6}$	Cm-246	$8,0 \cdot 10^{-7}$
Cl-36	$3,5 \cdot 10^{-8}$	Pu-244	$3,0 \cdot 10^{-6}$	Pu-242	$9,4 \cdot 10^{-7}$
Ca-41	$2,0 \cdot 10^{-9}$	Cm-244	$3,8 \cdot 10^{-7}$	Am-242m	$7,6 \cdot 10^{-7}$
Ni-59	$4,9 \cdot 10^{-9}$	Pu-240	$9,6 \cdot 10^{-7}$	U-238	$7,1 \cdot 10^{-7}$
Ni-63	$1,1 \cdot 10^{-9}$	U-236	$5,6 \cdot 10^{-7}$	Pu-238	$7,5 \cdot 10^{-7}$
Se-79	$3,4 \cdot 10^{-7}$	Th-232	$1,1 \cdot 10^{-4}$	U-234	$1,4 \cdot 10^{-6}$
Rb-87	$1,3 \cdot 10^{-7}$	Ra-228	$2,4 \cdot 10^{-6}$	Th-230	$3,7 \cdot 10^{-5}$
Sr-90	$1,8 \cdot 10^{-7}$	U-232	$5,4 \cdot 10^{-6}$	Ra-226	$3,0 \cdot 10^{-5}$
Zr-93	$3,7 \cdot 10^{-8}$	Th-228	$1,3 \cdot 10^{-6}$	Pb-210	$2,3 \cdot 10^{-6}$
Mo-93	$3,2 \cdot 10^{-7}$			Po-210	$4,9 \cdot 10^{-6}$
Nb-94	$3,1 \cdot 10^{-6}$				
Tc-99	$8,8 \cdot 10^{-9}$	Cm-245	$1,4 \cdot 10^{-6}$	Cm-247	$2,9 \cdot 10^{-6}$
Pd-107	$1,9 \cdot 10^{-9}$	Pu-241	$1,8 \cdot 10^{-8}$	Am-243	$2,0 \cdot 10^{-6}$
Sn-126	$1,6 \cdot 10^{-5}$	Am-241	$8,0 \cdot 10^{-7}$	Pu-239	$9,8 \cdot 10^{-7}$
I-129	$5,6 \cdot 10^{-7}$	Np-237	$4,7 \cdot 10^{-6}$	U-235	$3,3 \cdot 10^{-6}$
Cs-135	$5,7 \cdot 10^{-8}$	U-233	$3,9 \cdot 10^{-6}$	Pa-231	$4,0 \cdot 10^{-5}$
Cs-137	$9,5 \cdot 10^{-7}$	Th-229	$1,7 \cdot 10^{-5}$	Ac-227	$1,0 \cdot 10^{-5}$
Sm-151	$3,2 \cdot 10^{-10}$				

<sup>5</sup> Gemäß den Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ beträgt der Bezugswert für eine geringfügige Freisetzung 0,1 Personen-Millisievert pro Jahr für wahrscheinliche und 1 Personen-Millisievert pro Jahr für weniger wahrscheinliche Entwicklungen. Konservativ und zur besseren Vergleichbarkeit wurde für alle Rechenfälle ein Bezugswert von 0,1 mSv/a angesetzt.

### 3.5.2 Daten für die Varianten des Basisfalls und What-if-Fälle

Wie in Kapitel 3.4.4 und 3.4.5 ausgeführt, wurden für den Basisfall Varianten und What-if-Fälle betrachtet. Für diese Rechenfälle sind die wesentlichen gegenüber dem Basisfall geänderten Parameterwerte in Tabelle 3.18 aufgeführt.

**Tab. 3.18** Parameter für Varianten und What-if-Fälle der Streckenlagerung

Parameter	Wert	Dimension
Variante „geringe Diffusion“: Diffusionskoeffizient	$1,5 \cdot 10^{-10}$	m <sup>2</sup> /s
Variante „langsame Konvergenz“ (siehe Tabellen 3.19 und 3.20)	-	-
Variante „kleiner ewG“: keine Parameter geändert	-	-
Fallstudie „Diskretisierung“: Blocklänge von Segmenten	5	m
What-if-Fall „Kein Versagen der Verschlussbauwerke im Nachweiszeitraum“: Funktionsdauer der Verschlussbauwerke	$> 10^7$	a
What-if-Fall „Instantanes Versagen der Verschlussbauwerke“: Funktionsdauer der Verschlussbauwerke	0	a
What-if-Fall „Inventar ohne direkt endgelagerte Brennelemente“: Inventare BE	0	Bq

Die Konvergenzparameter für den Vergleichsfall mit langsamer Konvergenz sind in den Tabellen 3.19 und 3.20 zusammengestellt.

**Tab. 3.19** Globale Konvergenzparameter (langsame Konvergenz)

Parameter	Wert	Dimension
Global: $g_1$ (Stützfunktion Versatz)	-1	-
Global: $h_1$ (Stützfunktion Versatz)	-2	-
Global: $g_2$ (feucht)	10.000	-
Global: $g_2$ (trocken)	100	-
Global: Exponent in Druckfunktion	5	-
Global: $K_0$ (Referenz-Konvergenzrate)	0,01	$a^{-1}$
Global: $K_{tr}$ (Trocken-Konvergenzrate)	0,01	$a^{-1}$
Global: Referenzporosität	0,3	-
Global: Aktivierungsenergie von Salz	6.500	K
Global: Endporosität (Parameter lambda)	$4 \cdot 10^{-6}$	-

**Tab. 3.20** Lokale Konvergenzparameter (langsame Konvergenz)

Segment	Lokale Variation ( $f_{loc}$ )	Erhöhung der Kriechraten nach Durchfeuchtung ( $x_F$ )	Lokale Variation des Referenzdrucks ( $f_{pG}$ )	Parameter in der Zeitfunktion ( $\lambda_s$ )	Fluiddruck bei voll ausgeprägtem Feuchtekriechen ( $p_0$ ) [MPa]
Q1, Q2, Q3, Q4, ES-Q1a, RU-1, RU-2, RU-3, RU-4, RK-1, RK-2, RK-3, RK-4	0,02	1	1	0,08	0,5
RU-0, RK-0	0,28	4	1	0,3	1
ES-Q1b, ES-Q2, ES-Q3a, ES-Q3b, ES-Q4	0,0017	1	1	0,08	0,5

### 3.5.3 Probabilistische Daten

Nachfolgend werden alle für die probabilistischen Modellrechnungen erforderlichen Daten zusammengestellt, in Kapitel 3.5.3.1 für den Referenzfall und in Kapitel 3.5.3.2 für den klassischen Ansatz.

### 3.5.3.1 Probabilistische Daten für den Referenzfall

Die Parameter wurden auf der Grundlage der Erfahrungen aus früheren sicherheitsanalytischen Bewertungen, insbesondere aus probabilistischen Rechnungen im Vorhaben ISIBEL-II, ausgewählt (Tabelle 3.21). Die ausgewählten Parameter und Bandbreiten zeigen beispielhaft die Umsetzung des Referenzszenariums in einen probabilistischen Rechenlauf und dienen dem Test des neu entwickelten Instrumentariums RepoSTAR und RepoSUN. In Anlehnung an die Vorgehensweise in ISIBEL-II wurde für die Rechnungen mit einer relativ kleinen Anzahl von Parametern gearbeitet, die als gleichverteilt innerhalb ihrer „wahrscheinlichen“ Grenzen angenommen wurden. In KOSINA wurden jedoch auch logarithmische Gleichverteilungen betrachtet und zwar für die Mobilisierungsrate aus der Matrix der LWR-Brennelemente und die Permeabilität der Abdichtungen.

**Tab. 3.21** Parameter, Bandbreiten und Verteilungen für das Referenzszenarium

Parameter	Best Estimate (determ.)	Untere Grenze	Obere Grenze	Verteilung
Zeitpunkt Versagen des Schachtverschlusses S-V (TFailSV) [a]	50.000	40.000	60.000	gleich
Zeitpunkt Versagen der Streckenverschlüsse RK-V1/V2, RU-V1/V2 (TFailDriftSeal) [a]	50.000	40.000	60.000	gleich
Anfangs-Feuchtigkeit im Versatz (Zugangsstrecken RK-0, RU-0) (Humid) [Vol.-% des Porenraums]	0,5	0,4	0,6	gleich
Endwert der Porosität in versetzten Strecken (FinPor)	0,01	0,01	0,02	gleich
Trockenkonvergenzrate (ConvDry) [a <sup>-1</sup> ]	0,1*	0,09*	0,11*	gleich
Erhöhung der Konvergenz durch Feuchte (VarFacXF) (Faktor * xF)	-	0,9	1,1	gleich
Löslichkeitsgrenzen (SolLim) (Faktor)	-	0,75	1,25	gleich
Diffusionskoeffizient (DiffC) [m <sup>2</sup> /s]	1,5·10 <sup>-9</sup>	1,0·10 <sup>-9</sup>	2,0·10 <sup>-9</sup>	gleich
Vorfaktor in PPB (FacPPB) **	4,86·10 <sup>-10</sup>	1,5·10 <sup>-9</sup>	2,5·10 <sup>-9</sup>	gleich
Behälterlebensdauer POLLUX®(TLife) [a]	500	400	600	gleich
Mobilisierungsrate LWR-BE, Metall (MobRateM) [a <sup>-1</sup> ]	3,6·10 <sup>-3</sup>	3,2·10 <sup>-3</sup>	4,0·10 <sup>-3</sup>	gleich
Mobilisierungsrate LWR-BE, Brennstoffmatrix (MobRateF) [a <sup>-1</sup> ]	1,0·10 <sup>-6</sup>	8,0·10 <sup>-7</sup>	1,25·10 <sup>-6</sup>	log. gleich
Reaktionsrate Glas (ReacG) [kg/m <sup>2</sup> /a]	0,365	0,35	0,38	gleich
Länge der Abdichtungen S-V, RU-V, RK-V (LengSeal) [m]	100	90	110	gleich

Parameter		Best Estimate (determ.)	Untere Grenze	Obere Grenze	Verteilung
Permeabilität Abdichtungen (PermSeal)	[m <sup>2</sup> ]	1·10 <sup>-17</sup>	5·10 <sup>-18</sup>	2·10 <sup>-17</sup>	log. gleich

<sup>\*)</sup> Werte für schnelle Konvergenz. Gemäß IfG werden – abweichend von ISIBEL/VSG – diese Parameter für den Referenzfall in KOSINA verwendet /KNA 17/.

<sup>\*\*)</sup> In den deterministischen Rechnungen wurde ein anderer Wert verwendet, als dem Mittelwert der Verteilungsfunktion entspricht. Da kein advektiver Transport auftritt, ist diese Abweichung ohne Relevanz.

Von den in der Tabelle angeführten unabhängigen Parametern hängen weitere Modellparameter ab. Zum Beispiel gilt die Endporosität im Versatz der Strecken für alle Bereiche aller Strecken, und die Permeabilität der Abdichtungen gilt für alle Abdichtungen, auch den Schachtverschluss. Es wird angenommen, dass die Modellparameter an allen Stellen des Modellgebiets (z. B. in allen Segmenten) immer den gleichen Wert haben (strenge Korrelation). Eine Ausnahme ist der Zeitpunkt des Versagens der Abdichtungen. Hier werden zwei unabhängige Größen verwendet: zum einen für den Schachtverschluss, zum anderen für die vier Abdichtungen in den Richtstrecken. Korrelationen zwischen unabhängigen Variablen werden nicht betrachtet.

Zur Beschreibung des Konvergenzprozesses werden gemäß Tabelle 3.21 zwei Parameter unabhängig variiert, die Trockenkonvergenzrate und der Faktor für das Feuchtekriechen. Mit dieser Vorgehensweise wird nicht die Parameterbandbreite, die sich aus der Ungewissheit der Kriechklasse, bzw. aus den gebirgsmechanischen Rechnungen ergibt, abgebildet. Es werden lediglich die Parameter der Konvergenzvariante „schnelle Konvergenz“ in einer geringen statistischen Bandbreite variiert. Hiermit soll untersucht werden, ob der Konvergenzprozess einen relevanten Einfluss auf die Konsequenzen hat oder nicht.

### 3.5.3.2 Probabilistische Daten für den Klassischen Ansatz

Zusätzlich zu dem probabilistischen Referenzfall wurde der Rechenfall „klassischer Ansatz“ untersucht. Mit diesem Ansatz ist das in früheren Konsequenzenanalysen übliche Vorgehen gemeint, alle unabhängigen Variablen gleichzeitig in der Bandbreite der wahrscheinlichen Werte zu variieren. Im Referenzfall wird dagegen nur eine enge Bandbreite der unabhängigen Variablen betrachtet, siehe die Beschreibung in /BUH 16/. Der Vergleich der Ergebnisse soll veranschaulichen, welche globale Bandbreite der Konsequenzen theoretisch möglich ist und welche Unterschiede zwischen dem Referenzfall und dem klassischen Ansatz bestehen. In Tabelle 3.22 sind die an-

genommenen Bandbreiten der Parameterwerte und die zugehörigen Verteilungsfunktionen angegeben. Gegenüber dem Rechenfall des Referenzszenariums (Tabelle 3.21) sind die Bandbreiten größer und es werden auch Dreiecks-, Normal- und weitere logarithmische Verteilungen verwendet. Die Ergebnisse mit dem klassischen Ansatz sollen Einschätzungen ermöglichen, wie zuverlässig die mit den deterministischen Variantenrechnungen und dem probabilistischen Referenzfall erzielten Ergebnisse sind.

**Tab. 3.22** Parameterverteilungen für den klassischen Ansatz mit gleichzeitiger Variation aller unabhängigen Variablen

Parameter	Untere Grenze	Obere Grenze	Verteilung
Zeitpunkt Versagen des Schachtverschlusses [a] (TFailSV)	0	60.000 * 50.000	Dreieck
Zeitpunkt Versagen der Streckenverschlüsse [a] (TFailDriftSeal)	0	60.000 * 50.000	Dreieck
Anfangs-Feuchtigkeit in Versatz (Zugangsstrecken) (Humid) [%]	0,3	0,7	gleich
Endwert der Porosität in versetzten Strecken (FinPor)	0,007	0,03	gleich
Trockenkonvergenzrate (ConvDry) [a <sup>-1</sup> ]	0,002	0,2	log. gleich
Erhöhung der Konvergenz durch Feuchte (VarFacXF) (Faktor * xF)	0,7	1,3	gleich
Löslichkeitsgrenzen (SolLim) (Faktor)	0,5	2,0	gleich
Diffusionskoeffizient (DiffC) [m <sup>2</sup> /s]	2·10 <sup>-10</sup>	5·10 <sup>-9</sup>	log. normal
Vorfaktor in PPB (FacPPB)	1·10 <sup>-9</sup>	3·10 <sup>-9</sup>	gleich
Behälterlebensdauer POLLUX® (TLife) [a]	250	600	gleich
Mobilisierungsrate LWR-BE, Metall (MobRateM) [a <sup>-1</sup> ]	2,5·10 <sup>-3</sup>	4,7·10 <sup>-3</sup>	gleich
Mobilisierungsrate LWR-BE, Brennstoffmatrix (MobRateF) [a <sup>-1</sup> ]	1·10 <sup>-7</sup>	1·10 <sup>-5</sup>	log. gleich
Reaktionsrate Glas (ReacG) [kg/m <sup>2</sup> /a]	0,3	0,43	gleich
Länge der Abdichtungen (LengSeal) [m]	80	120	gleich
Permeabilität Abdichtungen (PermSeal) [m <sup>2</sup> ]	2·10 <sup>-18</sup>	5·10 <sup>-17</sup>	log. gleich

\* Spitze der Dreiecksverteilung

### 3.5.4 Daten für die Endlagervarianten

Für die Endlagervarianten „horizontale Bohrlochlagerung“ und „vertikale Bohrlochlagerung“ wurden deterministische Modellrechnungen durchgeführt. Die Eingangsdaten sind generell die gleichen wie für den Basisfall der Streckenlagerung, siehe Kapitel

3.5.1. Abweichungen sind im Folgenden angegeben. Die Varianten wurden nicht probabilistisch berechnet.

**Tab. 3.23** Anzahl der Abfälle im LOPOS-Modell pro Modell-Einlagerungsfeld; horizontale und vertikale Bohrlochlagerung; „1“ = alle Behälter sind in diesem Feld

Abfalltyp	ES-Q1a	ES-Q1b	ES-Q2	ES-Q3a	ES-Q3b	ES-Q4
HTR						1
AVR						1
CSD-B						1
CSD-C						1
CSD-V				1		
BE-MIX-BSK		860	720		540	
v-Strukt	1					

CSD-V: verglaste Abfälle; BE-MIX-BSK: BSK-H/V mit Brennelementen; v-Strukt: Strukturteile.

Damit die Inventarangaben gegenüber dem Referenzszenarium nicht geändert werden müssen, wurde beim Abfalltyp „BE-MIX-BSK“ die gleiche Anzahl von Behältern wie bei den Pollux®-Behältern der Streckenlagerung verwendet. Die „realen“ BSK-H/V wurden dadurch rechentechnisch zu größeren Einheiten zusammengefasst.

**Tab. 3.24** Anzahl der Behälter pro Abfallart für die in LOPOS modellierten Einlagerungsfelder bei horizontaler und vertikaler Bohrlochlagerung

Segment	Einlagerungsfeld *	Abfall	Anzahl
ES-Q4	1	AVR/HTR-BE	457
	2	CSD-C, CSD-B	1.415
ES-Q3a	3 bis 4	CSD-V	1.244
ES-Q3b	5 bis 10	LWR-BE	7.068
ES-Q2	11 bis 18		
ES-Q1b	19 bis 27		
ES-Q1a	27	Strukturteile	874

Die Endlagerbehälter sind immer BSK-H oder BSK-V.

Die Castor®-Behälter MTR2 für die Brennelemente der Forschungsreaktoren wurden nicht berücksichtigt.

\* Bei der vertikalen Bohrlochlagerung gibt es keine Einteilung in Einlagerungsfelder, bzw. es gibt nur für jede Abfallart ein Feld, siehe Abbildung 3.7.

Weitere Daten für die Behälter der Endlagervarianten sind in Tabelle 3.25 zusammengestellt. Für die Variante der direkten Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern sind die Behälterdaten angegeben, es wurden aber keine Modellrechnungen durchgeführt.

**Tab. 3.25** Daten für die Behälter der Endlagervarianten /BER 15/

Typ	Volumen [m <sup>3</sup> ]	Anzahl	Masse [kg]
BSK-H <sup>a)</sup>	0,94	11.130 <sup>a)</sup>	5,3
BSK-V <sup>b)</sup>	0,94	11.130 <sup>b)</sup>	5,3
CASTOR® THTR/AVR, KNK	4,16	461 <sup>c)</sup>	26
CASTOR® MTR 2	2,62	69 <sup>c)</sup>	16
CASTOR® V/19	27,8	736 <sup>c)</sup>	126
CASTOR® V/52	25,9	300 <sup>c)</sup>	124
CASTOR® 440/84	22,7	61 <sup>c)</sup>	116
CASTOR® HAW 20/28 CG	29,5	286 <sup>c)</sup>	112
TS 28 V	29,9		112
CASTOR® HAW 28M	28,4		115
TN 85	29,9		110

a) Horizontale Bohrlochlagerung; Annahme: BSK-H hat gleiche Abmessungen wie BSK-V

b) Vertikale Bohrlochlagerung

c) Direkte Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern

Im Referenzszenarium der beiden Endlagervarianten wird angenommen, dass die Verrohrungen und Bohrlochverschlüsse über den gesamten Nachweiszeitraum dicht sind. Dies wird im Modell dadurch umgesetzt, dass die Einlagerungssegmente in diesem Zeitraum nicht an der Berechnung teilnehmen.

Im Versagensszenarium wird angenommen, dass die Bohrlochverschlüsse anfangs dicht sind und nach 50.000 Jahren versagen. Im Modell wird dies über zwei Modellvarianten umgesetzt: In Variante 1 werden die entsprechenden Segmente nach 50.000 Jahren für die Berechnung zugeschaltet und ein Zutritt von Lösungen ermöglicht; die Bohrlöcher werden als nicht konvergierend angenommen. In Variante 2 werden die Bohrlochverschlüsse als separate Segmente mit einer Anfangspermeabilität von  $10^{-22}$  m<sup>2</sup> angesetzt. Im Versagensszenarium wird die Permeabilität nach 50.000 Jahren auf  $10^{-15}$  m<sup>2</sup> erhöht. Ab dem Zeitpunkt des Verschlussversagens wird eine Konvergenz der Bohrlöcher berücksichtigt, bzw. in einer Vergleichsrechnung die Konvergenz komplett nicht berücksichtigt. Die Annahme einer Konvergenz ist konservativ und setzt voraus, dass zum Versagenszeitpunkt auch die Bohrlochliner vollständig korrodiert sind.

Für die Endlagervariante „Salzkissen – vertikale Bohrlochlagerung“ wurden zusätzlich zu den beiden Varianten zwei What-if-Rechenfälle betrachtet:

- Beschleunigtes Versagen der Behälter. Analog zu Annahmen in früheren Vorhaben (/BUH 08b/, /BUH 10/) wurde für Kokillen in vertikalen Bohrlöchern (BSK-V) eine Lebensdauer von 50 Jahren unterstellt (Basisfall: 500 Jahre).
- Beschleunigte Mobilisierung aus den Behältern. Die Mobilisierungsrate aus der Brennelementmatrix wurde gegenüber dem Basisfall global um den Faktor 100 auf  $10^{-4} \text{ a}^{-1}$  erhöht.



## **4 Ergebnisse der Modellrechnungen**

Für die Modellrechnungen wurden deterministische und probabilistische Verfahren eingesetzt. Mit den deterministischen Rechnungen lässt sich das Systemverhalten im Detail analysieren, mit den probabilistischen Rechnungen wird stets das Gesamtsystem im Hinblick auf eine Zielgröße, zum Beispiel den RGI, analysiert. In KOSINA wurden probabilistische Rechnungen nur für das Referenzsystem „flache Lagerung – Streckenlagerung“ durchgeführt.

Die Rechnungen wurden in einem Umfang und Detaillierungsgrad entsprechend den Anforderungen des Vorhabens durchgeführt. Die Rechnungen ermöglichen die Überprüfung der Ausweisbarkeit eines ewG bei flacher Lagerung, die Bewertung der verfügbaren rechentechnischen Werkzeuge für die Konsequenzenanalyse und die Schaffung einer Ausgangsbasis für die sicherheitstechnische Bewertung von Endlagern in unterschiedlichen geologischen Formationen.

Bei allen Rechnungen wurde als Rand des ewG der obere Rand des Schachtverschlusses angenommen, mit Ausnahme der Rechnungen, wo der Einfluss der Lage des Randes des ewG explizit untersucht wurde.

Das Endlagersystem „Salzkissen – Direkte Endlagerung“ wurde nicht analysiert, weil davon auszugehen ist, dass sich keine neuen Erkenntnisse gegenüber denjenigen für die Endlagersysteme „flache Lagerung – Streckenlagerung“ bzw. „flache Lagerung – horizontale Bohrlochlagerung“ ergeben, siehe die Erläuterungen in Kapitel 3.3.4.

### **4.1 Referenzsystem „Flache Lagerung – Streckenlagerung“**

#### **4.1.1 Vorlaufende Fallstudien**

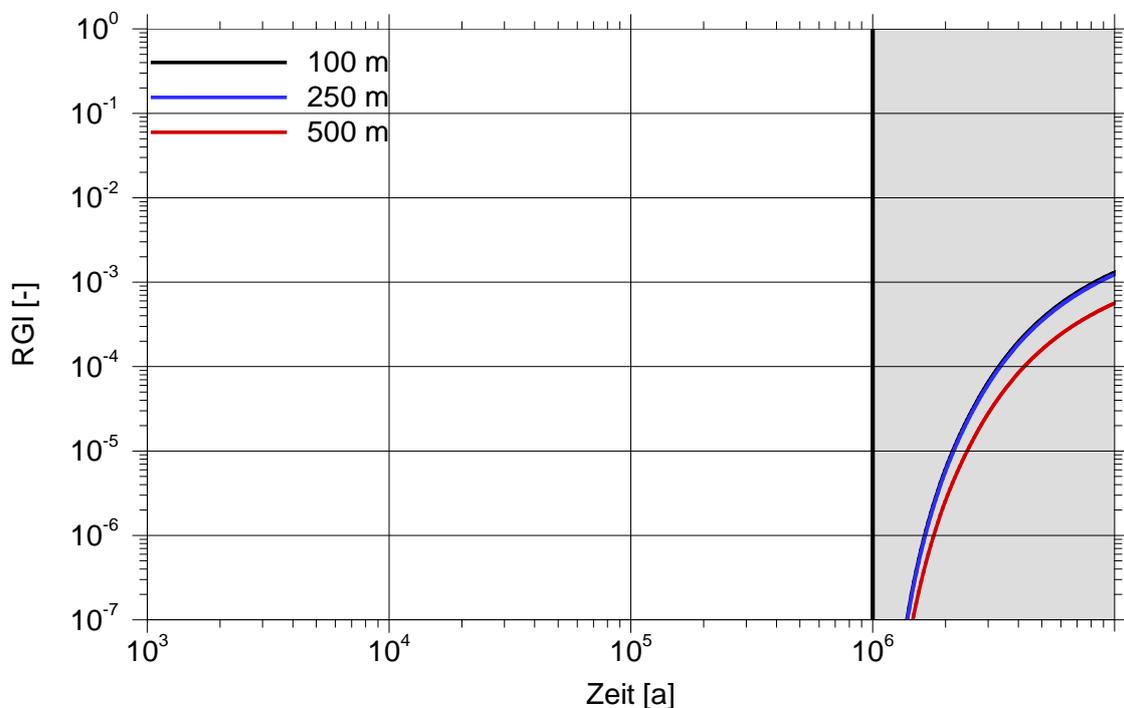
Zum Beginn des Vorhabens wurden anhand vorlaufender Planungen des Grubengebäude-Layouts Fallstudien durchgeführt, um die konkreten Planungen ggf. noch beeinflussen zu können. Die Ergebnisse werden im Folgenden vorgestellt. Als Ergebnis der Fallstudien wurde zum Beispiel der Abstand der Einlagerungsbereiche zum Infrastrukturbereich vergrößert, um die Anordnung der Dichtelemente in den Zugangsstrecken zu optimieren.

#### 4.1.1.1 Schachtverschluss

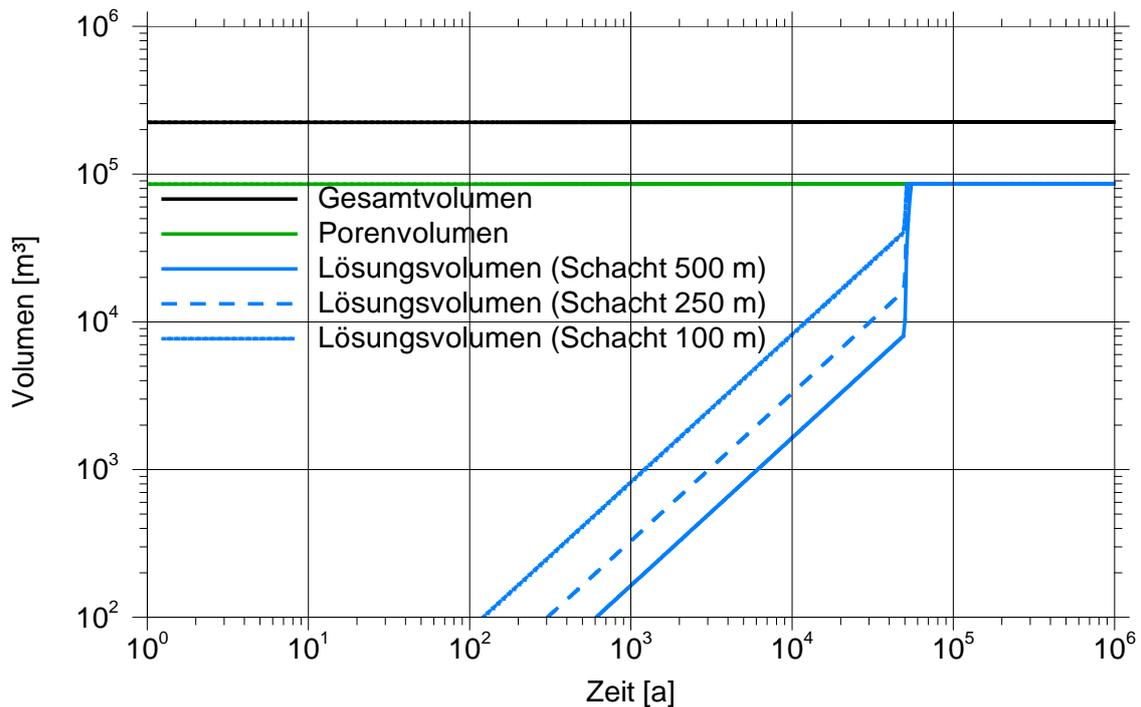
Für den Schachtverschluss wurde untersucht, ob die Länge der Dichtelemente einen Einfluss auf die Freisetzung aus dem ewG hat. Hierzu wurden Längen zwischen 100 m und 500 m untersucht, siehe Kapitel 3.4.2.1. Da die Schächte vertikal in den Schichten der flachen Lagerung liegen, ist die Länge ausschlaggebend dafür, in welchen Schichten die Schachtverschlüsse angeordnet sind. Bei einem kurzen Dichtelement kann der Verschluss ggf. vollständig im Salzhorizont liegen.

Die Darstellung der Summe des RGI in Abbildung 4.1 zeigt, dass die Länge des Schachtverschlusses einen Einfluss auf die radiologischen Konsequenzen hat: je länger der Verschluss, desto geringer die Konsequenzen. Allerdings treten die Konsequenzen erst zu sehr späten Zeiten (außerhalb des Nachweiszeitraums) auf, sodass bereits eine Länge von 100 m für die Auslegung des Grubengebäudes ausreicht.

Abbildung 4.2 zeigt, dass die Länge des Schachtverschlusses die zeitliche Entwicklung der Lösungsvolumina im Grubengebäude beeinflusst. Allerdings verschwinden diese Unterschiede ab dem Zeitpunkt 50.000 Jahre, an dem die Schachtverschlüsse ihre zu Beginn angenommene Permeabilität verlieren und der Infrastrukturbereich schneller mit Lösung vollläuft.



**Abb. 4.1** Summe des RGI als Funktion der Länge des Schachtverschlusses

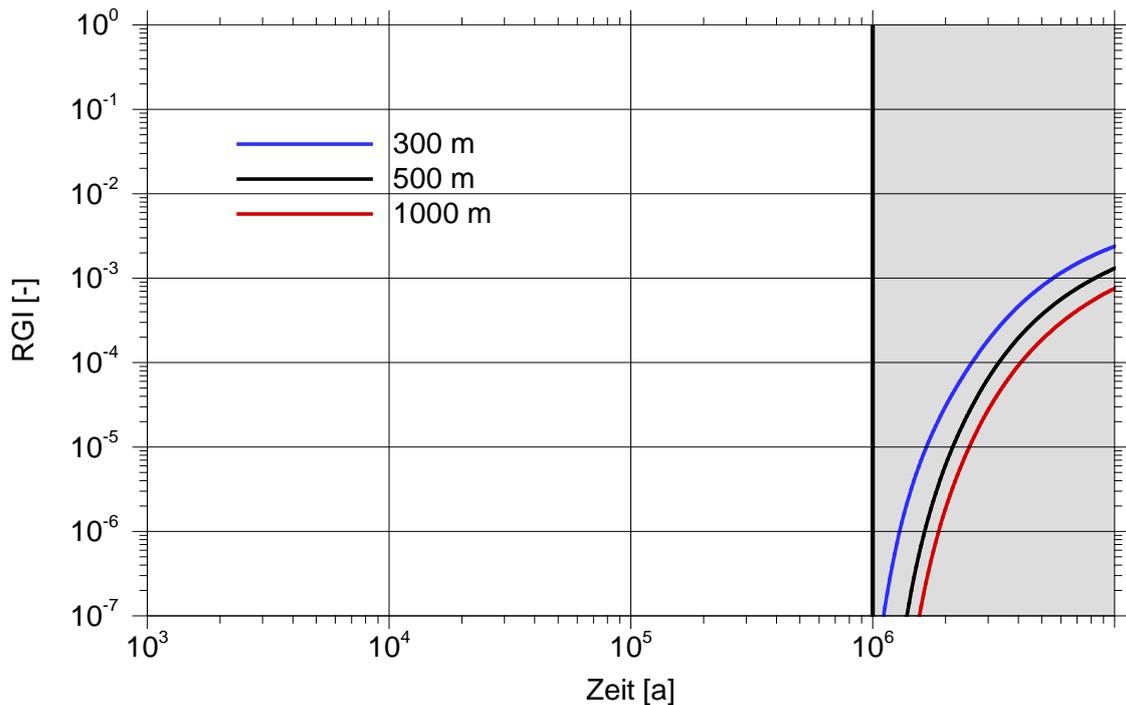


**Abb. 4.2** Zufließende Lösungsvolumina im Infrastrukturbereich als Funktion der Länge des Schachtverschlusses

#### 4.1.1.2 Zugangsstrecken

Für die Zugangsstrecken wurde untersucht, ob die Länge der Strecken einen Einfluss auf die Freisetzung aus dem ewG hat. Teile dieser Zugangsstrecken werden mit feuchtem Salzversatz verfüllt (siehe auch die Ergebnisse zur Versatzfeuchte in Kapitel 4.1.1.3), die nach Kompaktion des Salzversatzes eine Dichtwirkung zwischen dem Einlagerungsbereich und dem Infrastrukturbereich herstellen. Es wurden Längen zwischen 300 m und 1000 m untersucht, siehe Kapitel 3.4.2.2.

Die Darstellung der Summe des RGI in Abbildung 4.3 zeigt, dass die Länge der Strecken einen Einfluss auf die radiologischen Konsequenzen hat: je länger die Strecken, desto geringer die Konsequenzen. Allerdings treten die Konsequenzen erst zu sehr späten Zeiten (außerhalb des Nachweiszeitraums) auf. Im Basisfall wird eine Länge von 500 m für die Auslegung des Grubengebäudes verwendet.

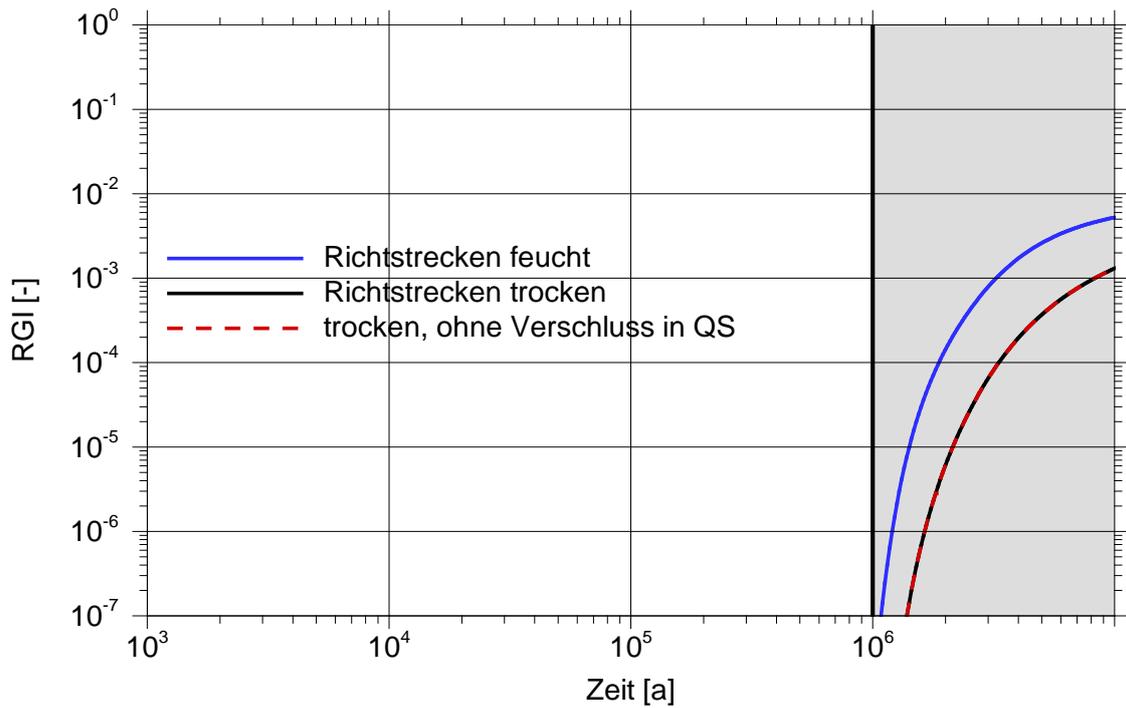


**Abb. 4.3** Summe des RGI als Funktion der Länge der Verschlüsse in den Zugangsstrecken

#### 4.1.1.3 Versatzfeuchte

Beim Einbringen des Versatzes in die Zugangsstrecken zum Einlagerungsbereich wird im Basisfall der Versatz angefeuchtet, siehe Kapitel 3.4.2.3. Der Versatz in den Richtstrecken ist trocken. Es wird untersucht, wie sich stattdessen ein feuchter Versatz in allen Richtstrecken auf den RGI auswirkt. Bei einem trockenen Versatz ist anfangs kein Lösungsvolumen in den Strecken vorhanden, bei Anfeuchtung ist ein bestimmter Prozentsatz des Volumens mit Lösung gefüllt. In diesem Rechenfall wird angenommen, dass es in allen Querschlägen Verschlüsse zu den Richtstrecken gibt, die den Weitertransport der Lösungen behindern. Bei der Variante „ohne Verschluss im Querschlag“ wird untersucht, ob dieser Verschluss den Weitertransport der Lösung aus den Zugangsstrecken in die Querschläge signifikant beeinflusst.

In Abbildung 4.4 ist zu erkennen, dass die Anfeuchtung des Versatzes in allen Richtstrecken zu einer Radionuklidfreisetzung aus dem Grubengebäude führt, die ca. eine Größenordnung über derjenigen liegt, die sich bei trockenen Richtstrecken ergeben würde. Im Basisfall wird daher für die technische Endlagerplanung auf ein Anfeuchten des Versatzes in den Richtstrecken verzichtet.

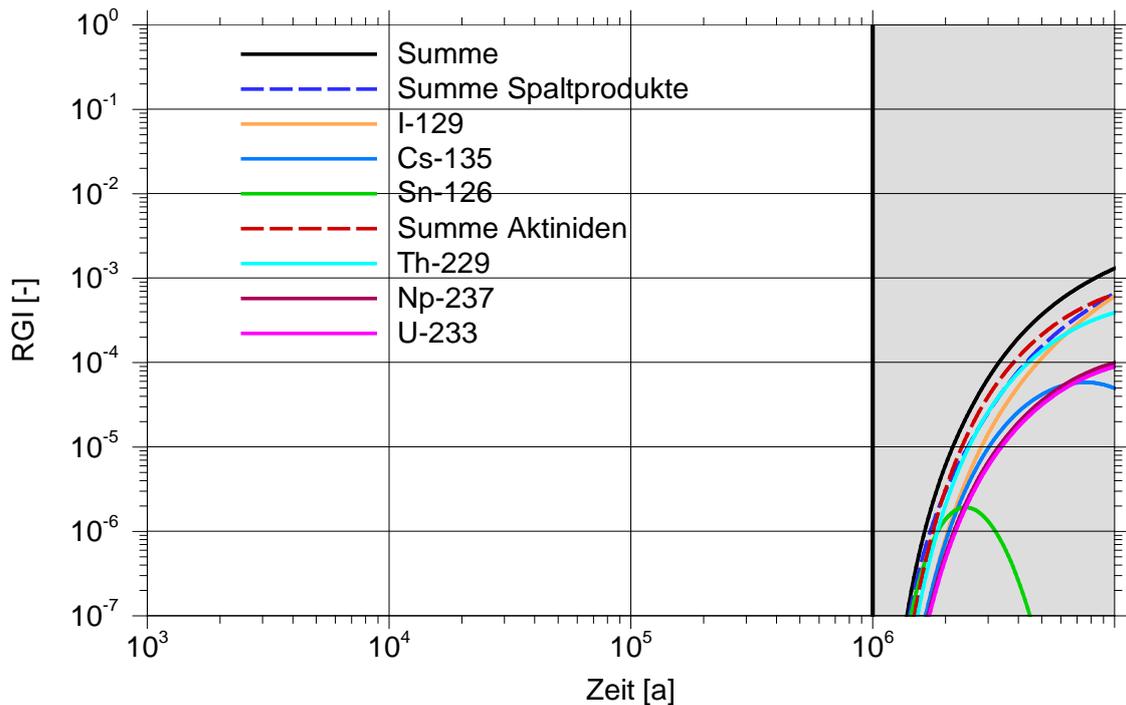


**Abb. 4.4** RGI als Funktion der Versatzfeuchte in den Zugangsstrecken

#### 4.1.2 Basisfall

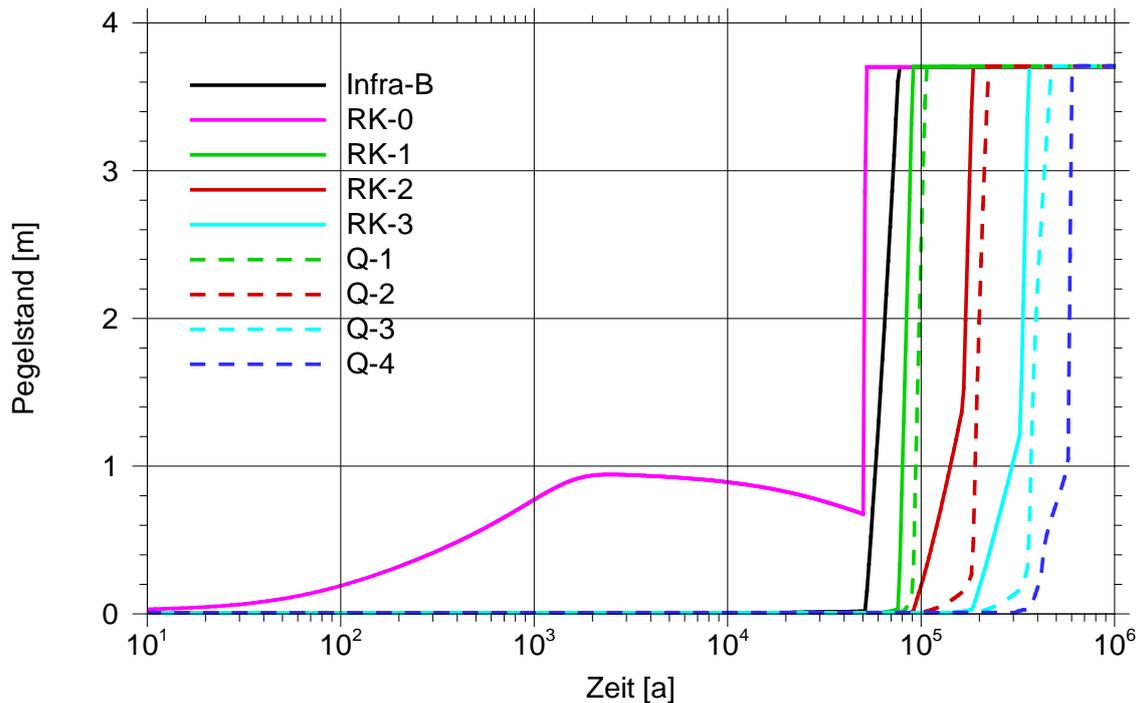
Der Basisfall repräsentiert das Referenzszenarium für das Referenzsystem „Flache Lagerung“ und die Einlagerungsvariante der Streckenlagerung. Er wird mit den in Kapitel 3.5.1 zusammengestellten Eingangsparametern gerechnet.

In Abbildung 4.5 ist zu erkennen, dass die Radionuklidfreisetzung im Basisfall zu einem RGI führt, der erst nach dem Nachweiszeitraum (1 Million Jahre) eine nennenswerte Größe erreicht. Bei den Spaltprodukten ist wegen der langen Transportzeit das langlebige I-129 relevant, bei den Aktiniden Th-229.



**Abb. 4.5** Basisfall: RGI, Summe und dosisbestimmende Radionuklide

In Abbildung 4.6 lässt sich das langsame Volllaufen des Grubengebäudes anhand der Lösungspegel in den Grubenbereichen erkennen. In der Zugangsstrecke RK-0, als Teil der Richtstrecke, der dem Infrastrukturbereich am nächsten liegt, wird der Versatz bei der Einbringung angefeuchtet. Diese Feuchte führt durch die Konvergenz und die dadurch verursachte Verringerung des Porenvolumens zu einem Anstieg des Pegels bis auf etwa einen Meter. Nach ca. 2000 Jahren nimmt der Pegel ab durch einen Weitertransport in angrenzende Grubenbaue, der schneller ist als die Volumenabnahme durch Konvergenz. Nach 50.000 Jahren ist der angenommene Zeitpunkt für das Versagen der Schacht- und Streckenverschlüsse erreicht und es kommt zu einem starken Lösungszutritt von außen in den Infrastrukturbereich und von dort in die Zugangs- und Richtstrecken. Die Richtstrecken und die jeweiligen Querschläge werden sukzessiv mit Lösung aufgefüllt.

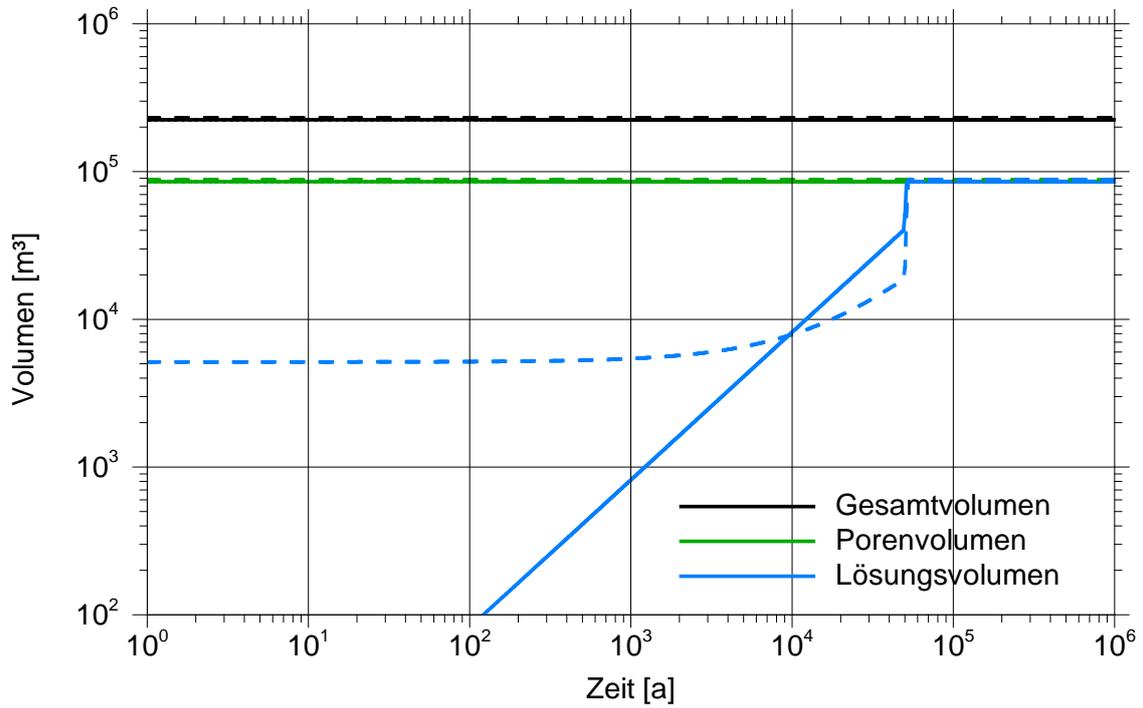


**Abb. 4.6** Basisfall: zeitliche Entwicklung der Lösungspegel im Grubengebäude

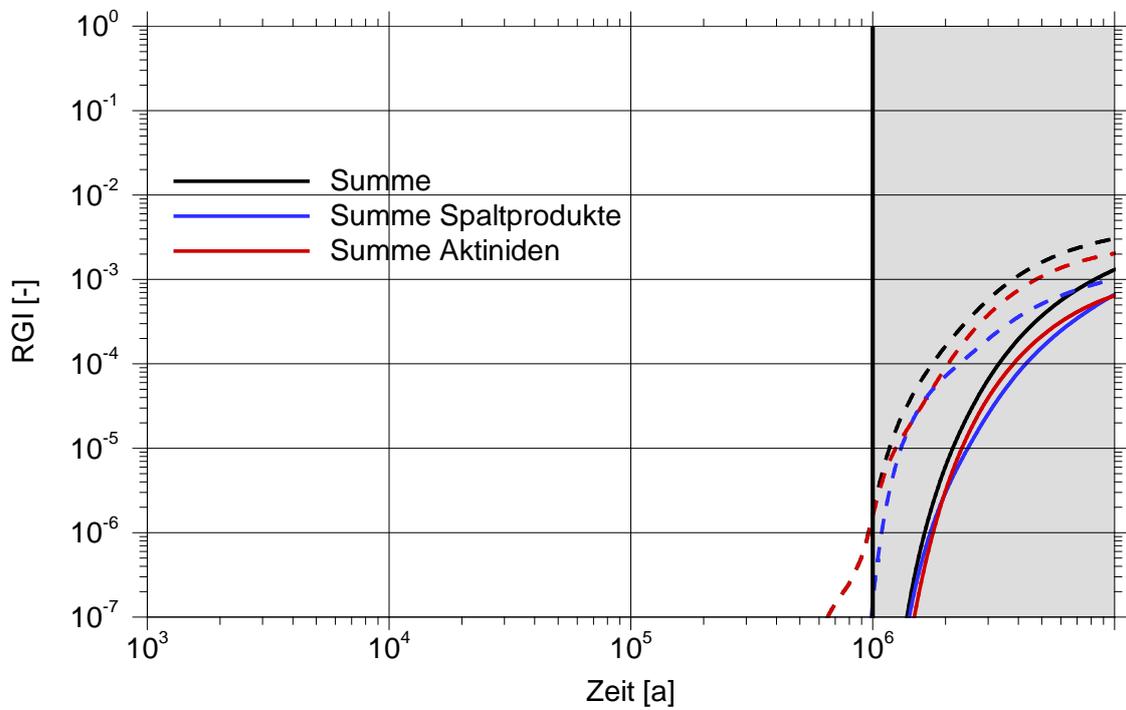
Die zeitliche Entwicklung der Lösungsvolumina im Grubengebäude ist ähnlich zu den Ergebnissen aus den früheren Vorhaben ISIBEL-II und VSG mit Ausnahme des Infrastrukturbereichs. In Abbildung 4.7 wird der Lösungszutritt in den Infrastrukturbereich mit Ergebnissen aus dem Vorhaben ISIBEL-II verglichen. In ISIBEL-II wird wegen der steilen Lagerung der Salzstruktur (Salzstock) angenommen, dass es wasserführende Schichten mit Verbindung zum Infrastrukturbereich gibt, die dazu führen, dass Lösung zu Beginn der Rechnung instantan in den Infrastrukturbereich zufließt. Daher beginnt das Lösungsvolumen mit einem Wert von 5000 m<sup>3</sup>. Auch mit diesem zusätzlich vorhandenen Lösungsvolumen wird der Infrastrukturbereich erst vollständig mit Lösung gefüllt, wenn nach 50.000 Jahren der Zeitpunkt des angenommenen Verschlussversagens erreicht wird.

Insgesamt unterscheiden sich die langzeitigen Lösungsbewegungen und damit die Radionuklidtransporte in den beiden Vorhaben, siehe Abbildung 4.8. In ISIBEL-II treten die radiologischen Konsequenzen (RGI) früher auf und die Maximalwerte sind höher. Dies liegt daran, dass durch die anfängliche Lösungsmenge im Infrastrukturbereich Lösung frühzeitig in die Zugangs- und Richtstrecken migriert und die Porenräume im gesamten Grubengebäude stärker auffüllt als im Basisfall. Dadurch steht für die Diffusionsprozesse ein größeres Lösungsvolumen zur Verfügung. Außerdem unter-

scheiden sich die Längen der Richtstrecken, welche in ISIBEL-II deutlich kürzer sind als in KOSINA.



**Abb. 4.7** Basisfall: Lösungsvolumina im Grubengebäude im Vergleich zu Ergebnissen aus ISIBEL-II, bzw. VSG (gestrichelt)



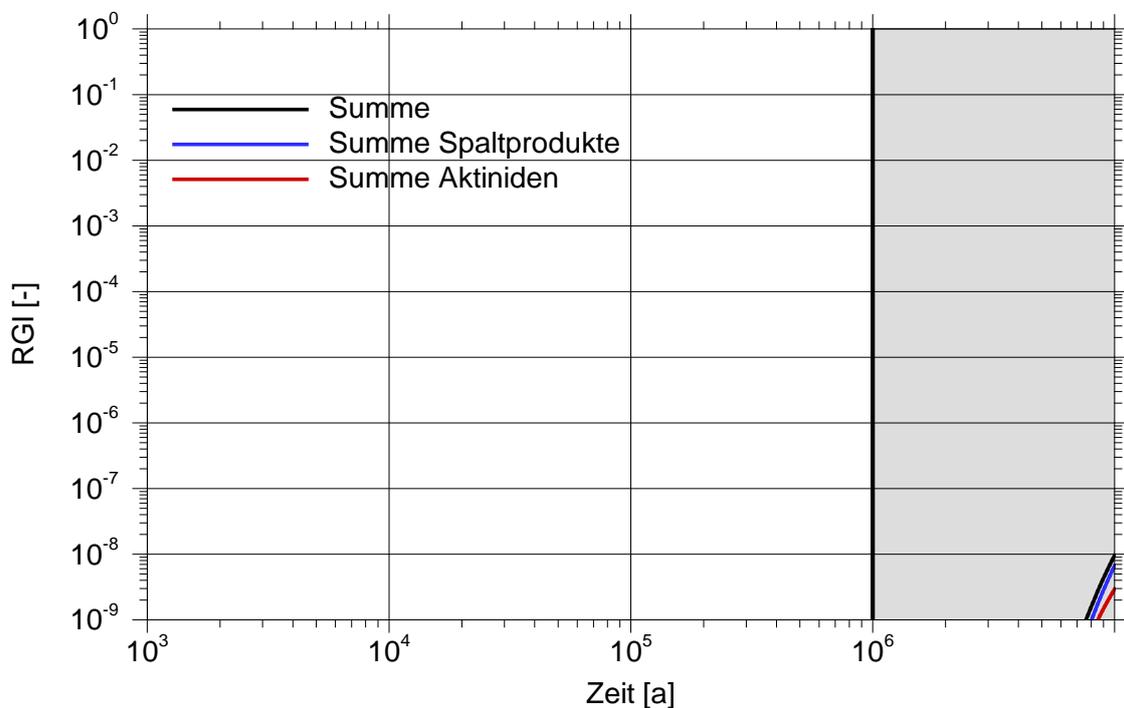
**Abb. 4.8** Basisfall (durchgezogen): Vergleich mit ISIBEL-II, bzw. VSG (gestrichelt)

### 4.1.3 Varianten des Basisfalls

Zur detaillierteren Untersuchung des Systemverhaltens im Basisfall wurden Varianten betrachtet.

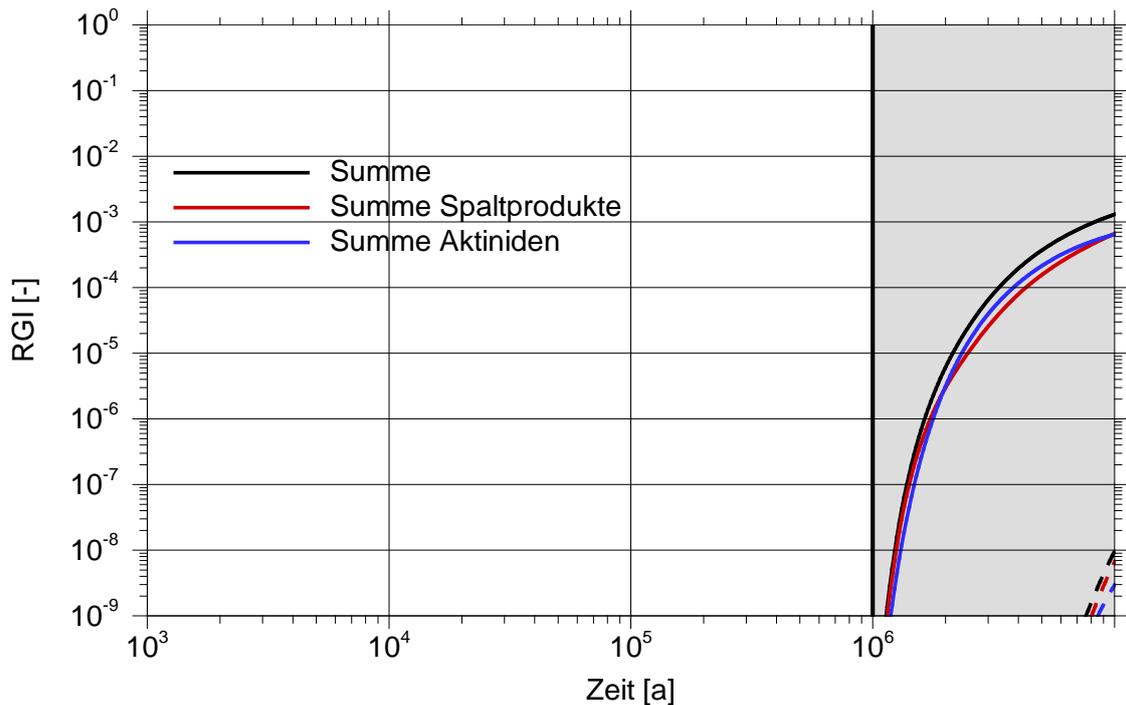
#### 4.1.3.1 Variante: „geringe Diffusion“

Im Basisfall wird für die Diffusion ein effektiver Koeffizient von  $1,5 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$  verwendet. Es ist davon auszugehen, dass dieser Wert in dem stark kompaktierten Salzgrus geringer ist. Daher wurde die Variante mit  $1,5 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$  gerechnet. Abbildung 4.9 zeigt, dass der RGI in diesem Fall zu viel späteren Zeiten auftritt als im Basisfall.



**Abb. 4.9** Variante des Basisfalls: RGI bei geringer Diffusion (Skala der y-Achse bis  $1 \cdot 10^{-9}$  erweitert)

Ein Vergleich des RGI mit dem Basisfall (Abbildung 4.10) zeigt, dass der berechnete RGI in der Variante um mehrere Größenordnungen kleiner ist als im Basisfall. Dies unterstreicht die große Bedeutung des Parameters Diffusionskonstante, da der gesamte Transport diffusionskontrolliert ist und es im Basisfall keine advektiven Anteile gibt. Der im Basisfall angenommene Wert für den Diffusionskoeffizienten ist konservativ und führt daher in allen Rechnungen zu einer starken Überschätzung der radiologischen Konsequenzen.

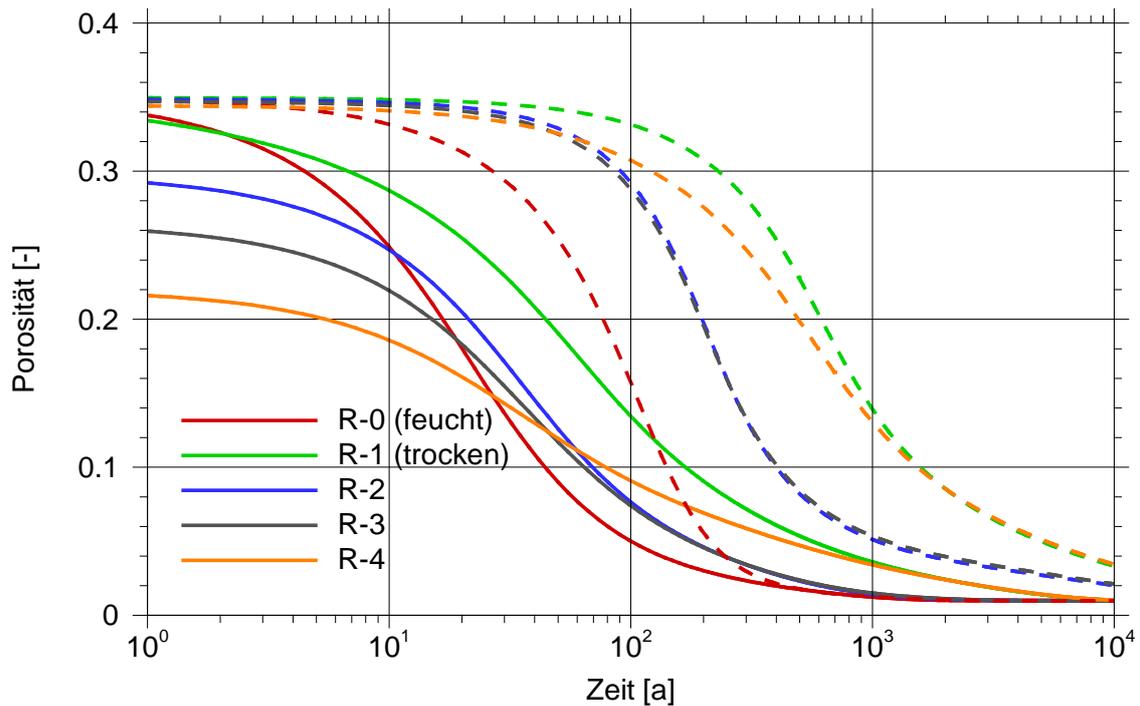


**Abb. 4.10** Vergleich des Basisfalls mit der Variante mit geringer Diffusion (gestrichelt; Skala der y-Achse bis  $1 \cdot 10^{-9}$  erweitert)

#### 4.1.3.2 Variante: „langsame Konvergenz“

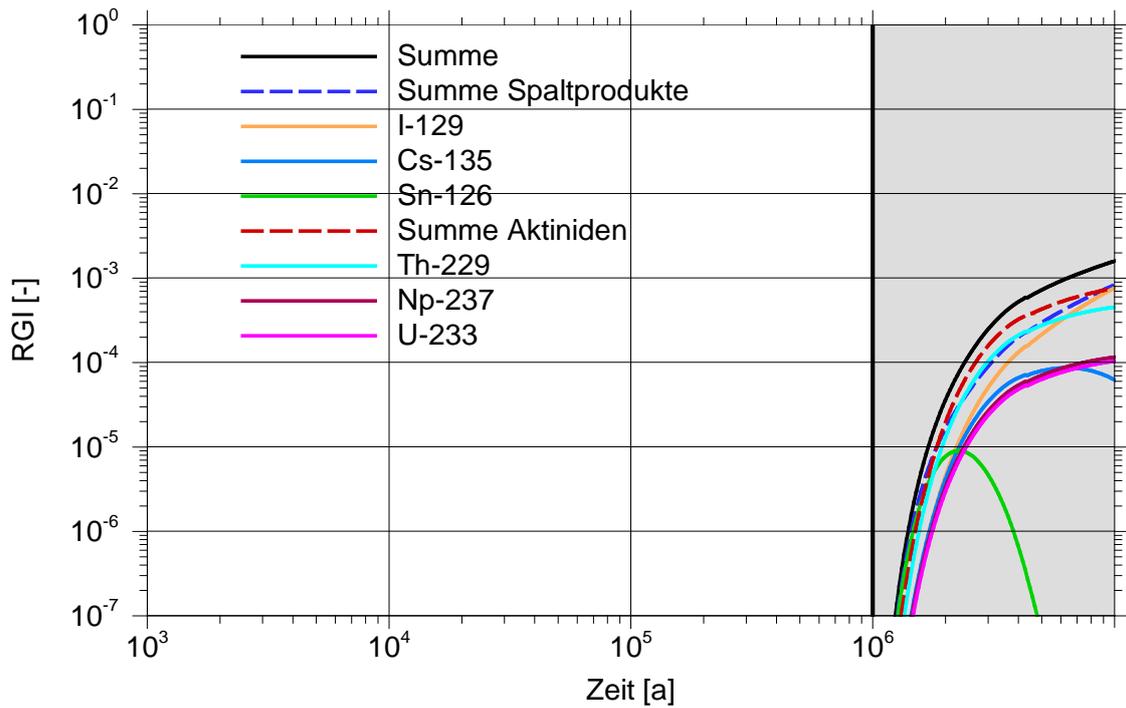
Die Kompaktion von Salzgrus hängt bei gebirgsmechanischen Modellrechnungen von der Kriechklasse des umgebenden Salzgesteins ab. Für die hier präsentierten integrierten Modellrechnungen werden die Ergebnisse der gebirgsmechanischen Modellrechnungen geeignet parametrisiert. Im Basisfall wurden die Ergebnisse verwendet, die zu einer relativ schnellen Kompaktion von Salzgrus führen. In der Variante wird untersucht, welche Auswirkungen auf die radiologischen Konsequenzen zu erwarten sind, wenn die Parametrisierung einer langsamen Kompaktion entspricht. In Kapitel 3.5.2 sind die im Vergleichsfall verwendeten, geänderten Parameter zusammengestellt.

Durch die langsame Konvergenz nimmt die Porosität in allen Grubenbauen langsamer ab als im Basisfall, siehe Abbildung 4.11. Während im Basisfall eine Restporosität von ca. 1 % nach 1000 oder 10.000 Jahren erreicht wird, gibt es bei langsamer Konvergenz kältere Bereiche, die nach 10.000 Jahren noch 2 % oder mehr als 3 % Restporosität aufweisen.

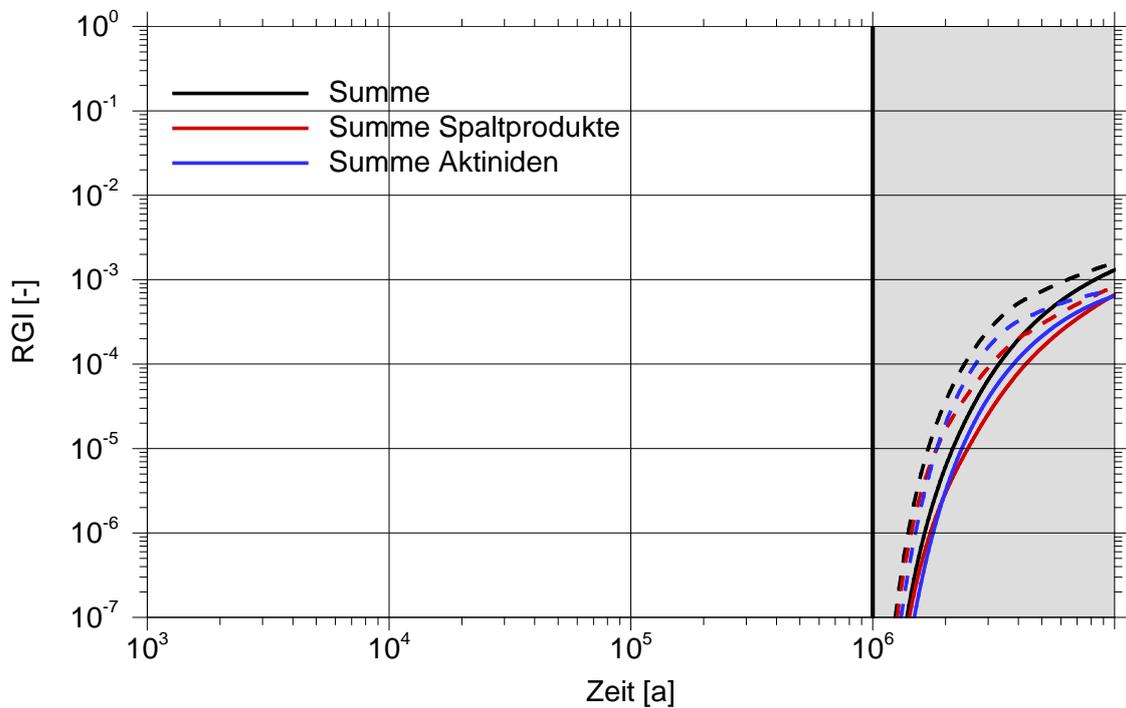


**Abb. 4.11** Vergleichsfall „langsame Konvergenz“ (gestrichelt): zeitlicher Verlauf der Porosität in den Zugangs- und Richtstrecken bei unterschiedlicher Feuchte und Temperatur. Basisfall: durchgezogene Linien  
 R-0, R-1 und R-4 geringe Temperatur; R-2 und R-3 hohe Temperatur

In Abbildung 4.12 sind die berechneten radiologischen Konsequenzen (RGI) für die Variante mit langsamer Konvergenz dargestellt. Qualitativ sind die Kurvenverläufe ähnlich zum Basisfall. In Abbildung 4.13 sind die Ergebnisse für den Basisfall und die Variante gegenübergestellt. Bei langsamer Konvergenz beginnt die Freisetzung der Radionuklide aus dem ewG etwas früher und die Lösungsmengen im Grubengebäude sind für lange Zeiten höher als im Basisfall. Dadurch werden mehr Radionuklide durch Diffusion freigesetzt, das Maximum nach  $1 \cdot 10^7$  Jahren ist jedoch ähnlich groß. Die relativ schnelle Konvergenz im Basisfall ist damit bezüglich der radiologischen Konsequenzen nicht konservativ. Daraus ist zu schließen, dass auch in Endlagersystemen, bei denen der Radionuklidtransport hauptsächlich diffusiv erfolgt, die Forderung nach schnellem Verschließen sinnvoll ist, weil die Auswirkungen geringer sind als bei langsamem Verschließen.

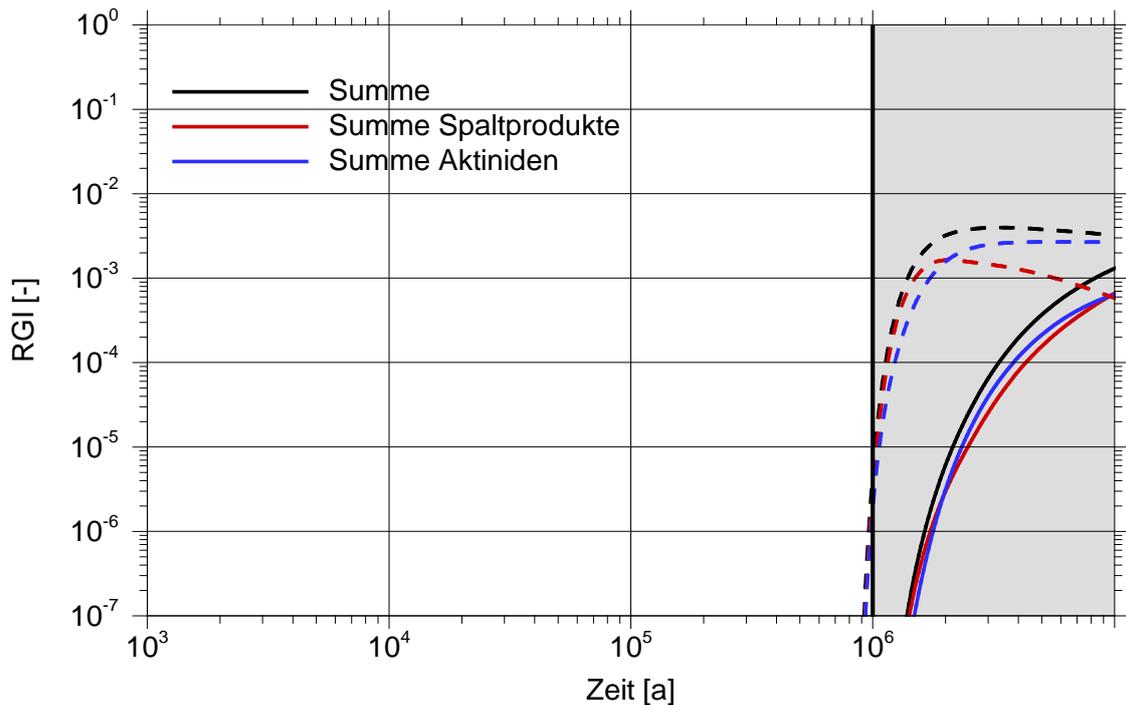


**Abb. 4.12** Variante des Basisfalls: RGI bei langsamer Konvergenz



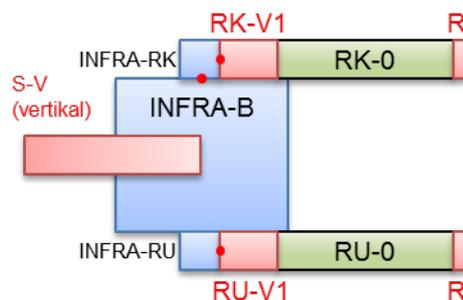
**Abb. 4.13** Vergleich des Basisfalls (durchgezogen) mit der Variante mit langsamer Konvergenz (gestrichelt)



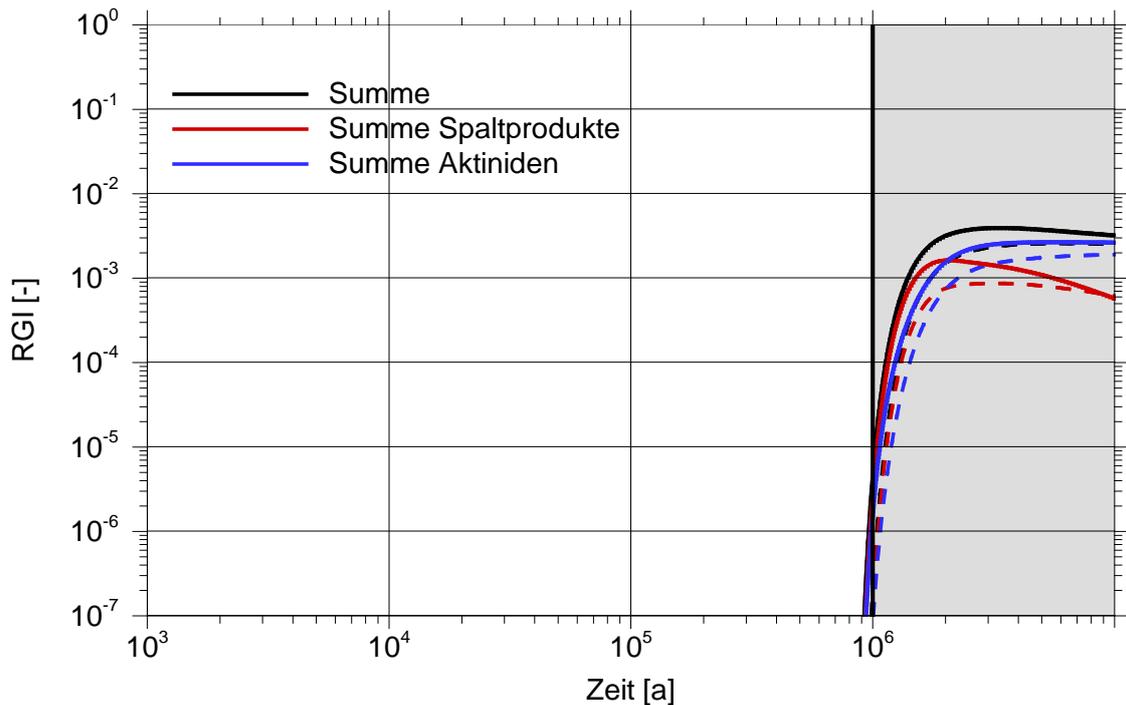


**Abb. 4.15** Vergleich des Basisfalls (durchgezogen) mit der Variante mit kleinem ewG (gestrichelt)

Der Einlagerungsbereich geht an verschiedenen Stellen in den Infrastrukturbereich über, siehe Abbildung 4.16. Die Entfernungen der Einlagerungsfelder zu den Verschlüssen RK-V1 und RU-V1 sowie zum Segment INFRA-RK sind unterschiedlich, so dass die berechneten radiologischen Konsequenzen für diese Orte zum Teil unterschiedlich sind, siehe Abbildung 4.17. Ist der Rand des ewG am Übergang des Segments INFRA-RK zu INFRA-B, ist das kleine Volumen dieses Segments verdünnungswirksam gegenüber den Konzentrationen am Verschluss RK-V1. Dieser Verdünnungseffekt ist in Abbildung 4.17 zu erkennen; die Werte für die Verschlüsse RK-V1 und RU-V1 liegen dagegen übereinander.



**Abb. 4.16** Beobachtungspunkte für die ewG-Varianten (Ausschnitt aus Abbildung 3.3)

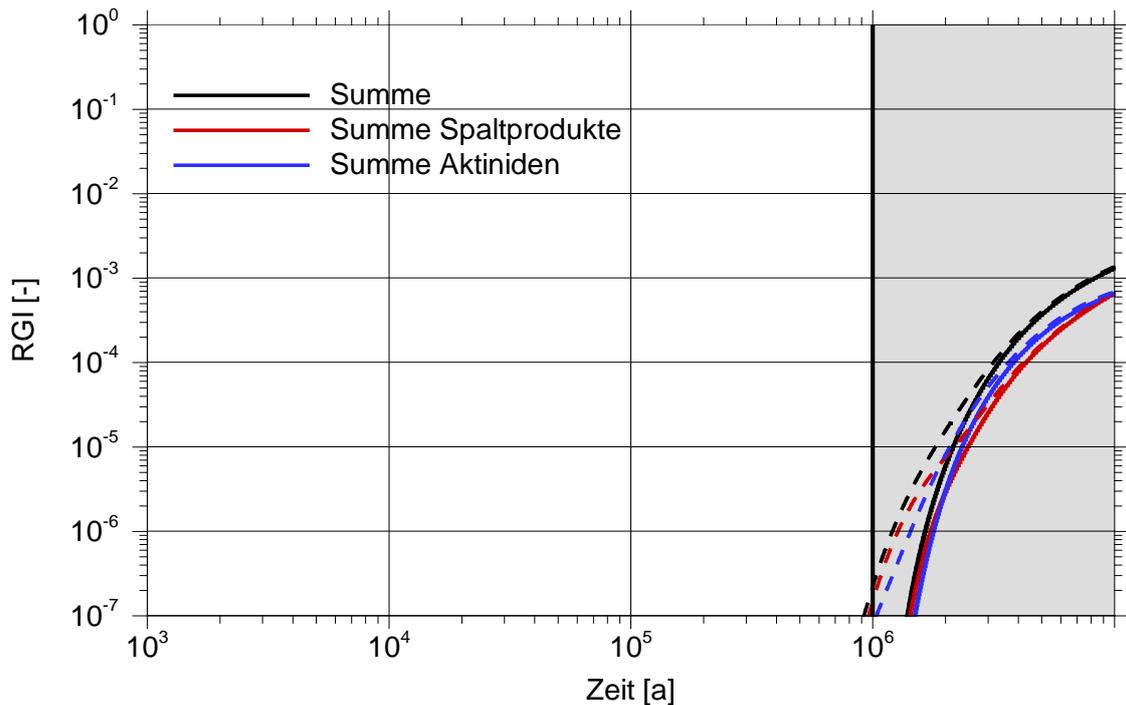


**Abb. 4.17** Rechenfälle für die Variante mit kleinem ewG: Rand des ewG an RK-V1 (durchgezogen), RU-V1 (gepunktet), bzw. INFRA-RK (gestrichelt)

#### 4.1.3.4 Fallstudie zur Diskretisierung

Das Grubengebäude ist durch die in Abbildung 3.3 dargestellte Modellstruktur räumlich grob diskretisiert. In der Fallstudie wird der Einfluss der räumlichen Diskretisierung für folgende Fälle untersucht: die Segmente der Modellstruktur werden nicht weiter intern diskretisiert (1), die Segmente werden intern in 5 m lange Blöcke geteilt (2) und die Segmente werden intern in 20 m lange Blöcke geteilt (3). Der Fall (3) ist im Basisfall realisiert.

Abbildung 4.18 zeigt die Ergebnisse der Fallstudie anhand des RGI: Bei einer internen Diskretisierung in 5 m oder 20 m lange Blöcke ergeben sich keine Unterschiede; wird jedoch auf die interne Diskretisierung ganz verzichtet, sind die Konsequenzen etwas höher und früher. Daraus folgt, dass generell eine interne Diskretisierung sinnvoll ist, um die radiologischen Konsequenzen nicht zu überschätzen, und dass eine sehr feine Diskretisierung nicht sinnvoll ist, weil sich die Ergebnisse kaum noch unterscheiden, aber die Rechenzeit stark ansteigt.



**Abb. 4.18** RGI bei Variation der räumlichen Diskretisierung. Durchgezogen: Basisfall (Blocklänge 20 m); gestrichelt: keine räumliche Diskretisierung; gepunktet: feinere räumliche Diskretisierung (5 m Blocklänge)

Die gepunkteten Linien sind identisch mit den durchgezogenen Linien

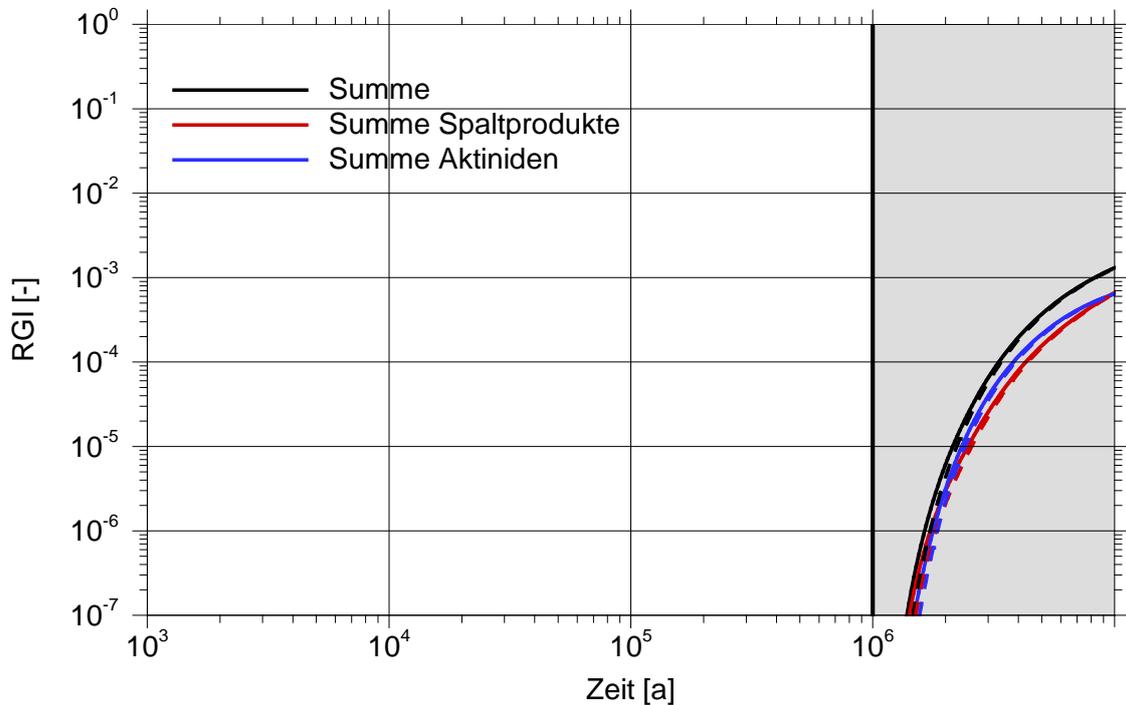
#### 4.1.4 What-if-Rechenfälle für das Referenzsystem

Mit What-if-Rechenfällen werden unwahrscheinliche Entwicklungen des Endlagersystems betrachtet oder Parameterkonstellationen untersucht, die gemäß der Planung nicht auftreten können. Durch solche Rechenfälle lässt sich das Systemverhalten noch detaillierter analysieren als mit Varianten.

##### 4.1.4.1 Kein Versagen der Verschlussbauwerke im Nachweiszeitraum

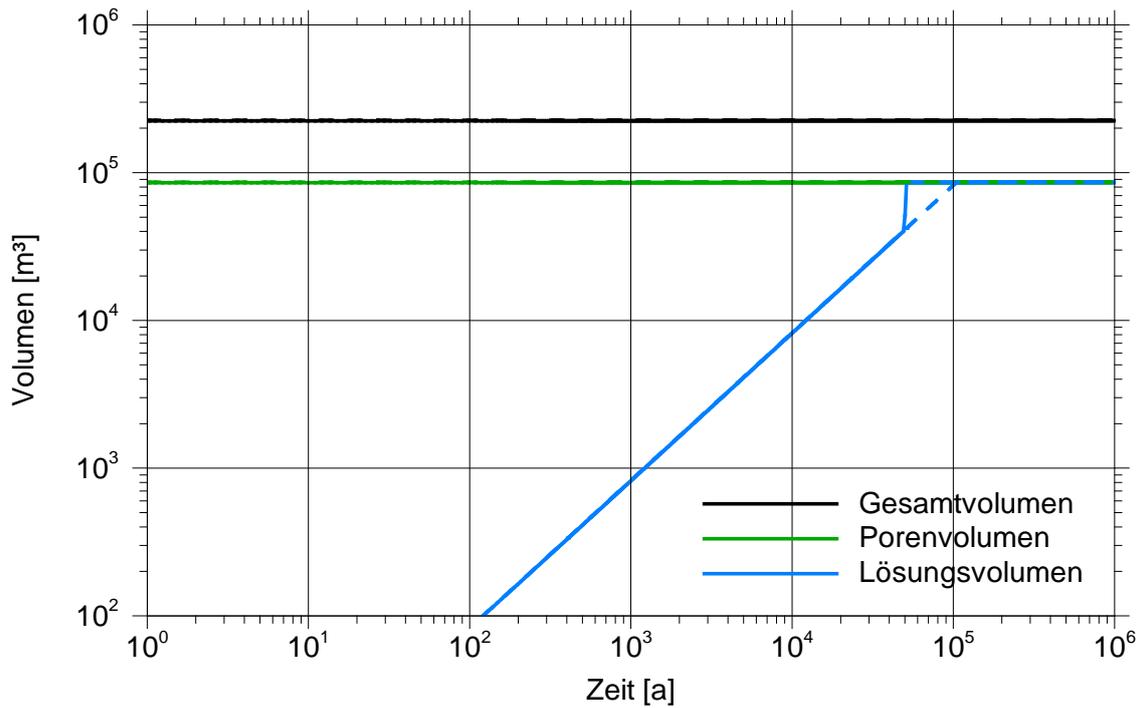
Im Basisfall wird angenommen, dass alle Verschlussbauwerke nach 50.000 Jahren versagen, weil aus geotechnischen Kenntnissen und Erfahrungen davon auszugehen ist, dass die auslegungsgemäße Funktion der technischen Verschlusskomponenten bis zu diesem Zeitpunkt gewährleistet werden kann. Im vorliegenden What-if-Rechenfall wird untersucht, ob es einen großen Unterschied macht, wenn angenommen würde, dass Verschlussbauwerke unbegrenzt halten. In Abbildung 4.19 sind die Ergebnisse des Rechenfalls mit denjenigen des Basisfalls verglichen. Bei einer unbegrenzten Funktionsdauer beginnen die radiologischen Konsequenzen (RGI) etwas später, errei-

chen aber die gleichen Maximalwerte wie mit begrenzter Funktionsdauer. Die geforderten 50.000 Jahre Funktionsdauer sind daher für den Nachweis der Langzeitsicherheit ausreichend.

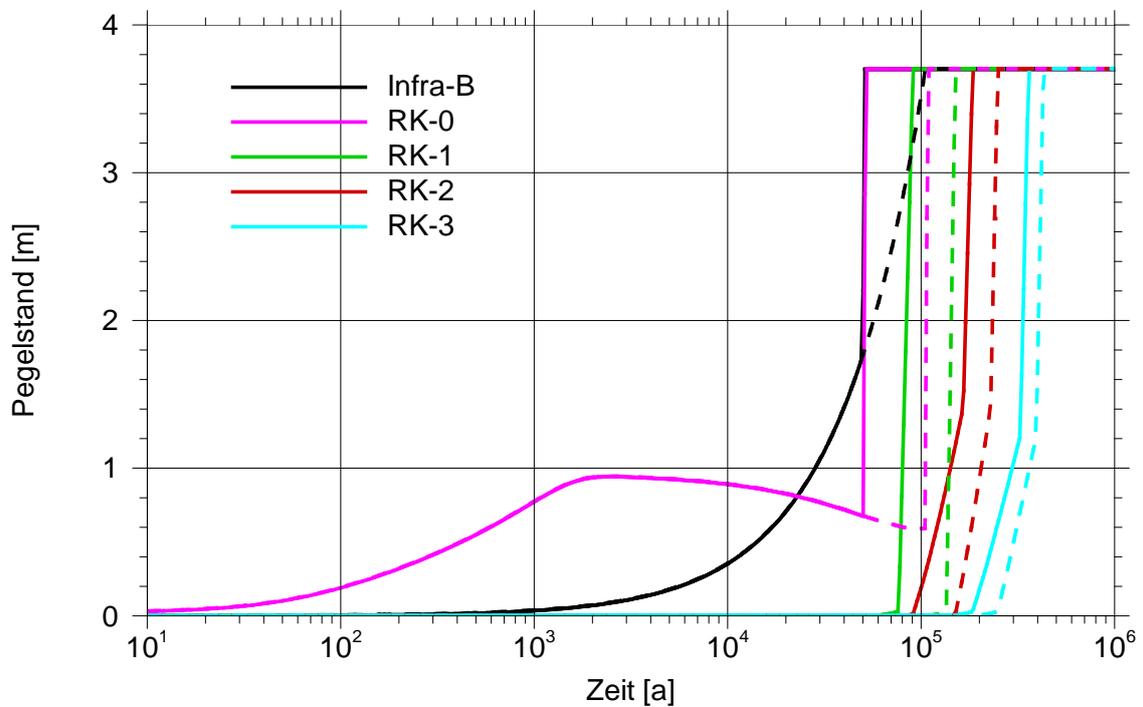


**Abb. 4.19** RGI im What-if-Rechenfall ohne Versagen der Verschlüsse (gestrichelt) im Vergleich zum Basisfall

Die geringen Unterschiede in den berechneten RGI-Werten lassen sich durch Analyse der Lösungsvolumina im Infrastrukturbereich und in den Zugangs- und Richtstrecken erklären, siehe Abbildungen 4.20 und 4.21. Während es im Basisfall einen sprunghaften Anstieg der Lösungsmenge im Infrastrukturbereich nach 50.000 Jahren gibt, steigt die Lösungsmenge im What-if-Rechenfall auch nach diesem Zeitpunkt linear an. Die Verdoppelung der Zeit, bis der Infrastrukturbereich vollgelaufen ist, und die zeitliche Verzögerung der Auffüllung aller Segmente der Zugangsstrecken führen zu der in Abbildung 4.19 zu erkennenden zeitlichen Verzögerung der Radionuklidfreisetzung im What-if-Rechenfall, aber zu keiner wesentlichen Änderung der Gesamtmenge freigesetzter Radionuklide.



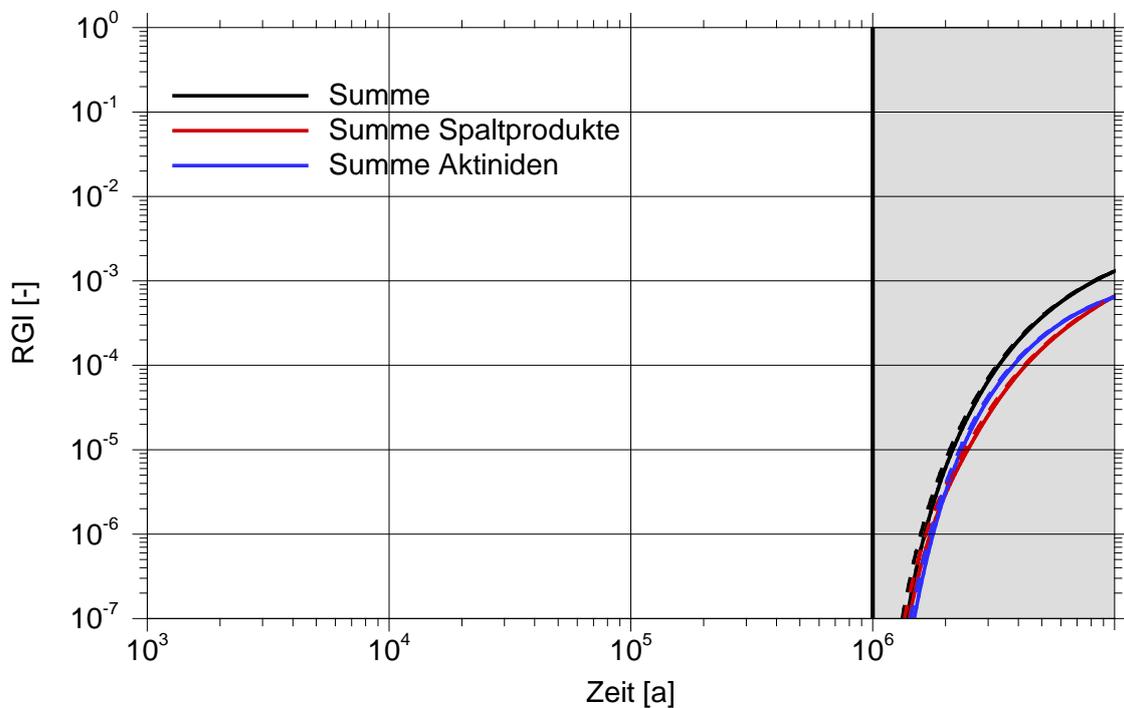
**Abb. 4.20** Volumina im Infrastrukturbereich im What-if-Rechenfall ohne Versagen der Verschlüsse (gestrichelt) im Vergleich zum Basisfall



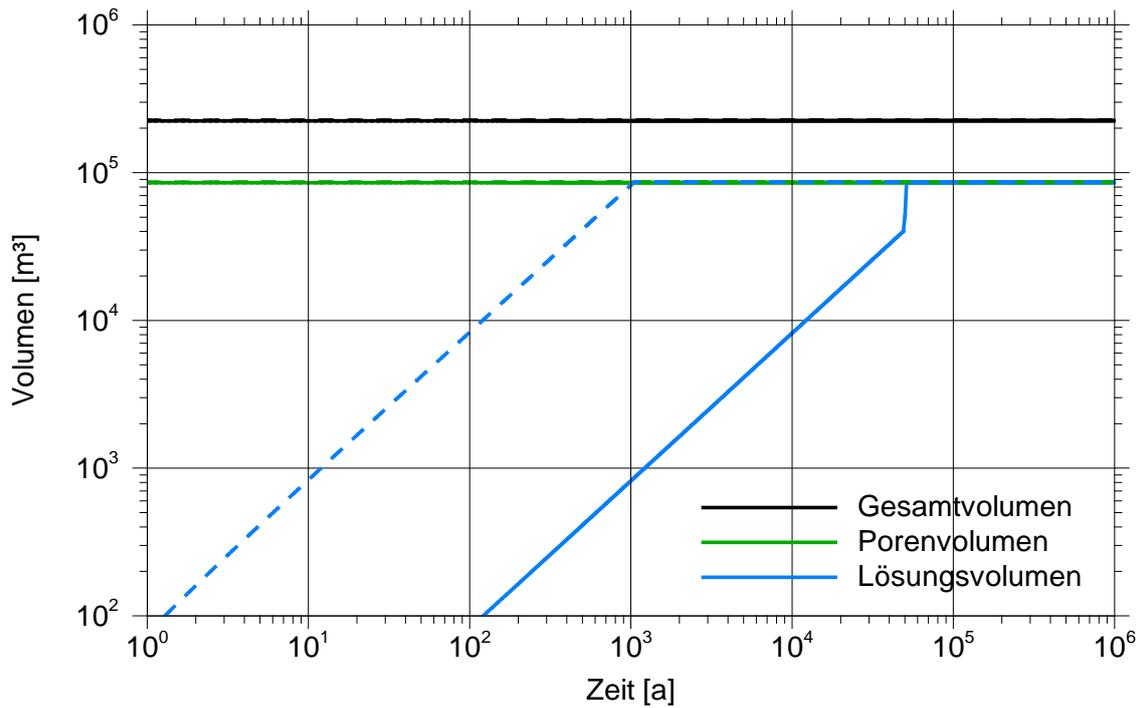
**Abb. 4.21** Lösungspegel im What-if-Rechenfall ohne Versagen der Verschlüsse (gestrichelt) im Vergleich zum Basisfall

#### 4.1.4.2 Instantanes Versagen der Verschlussbauwerke

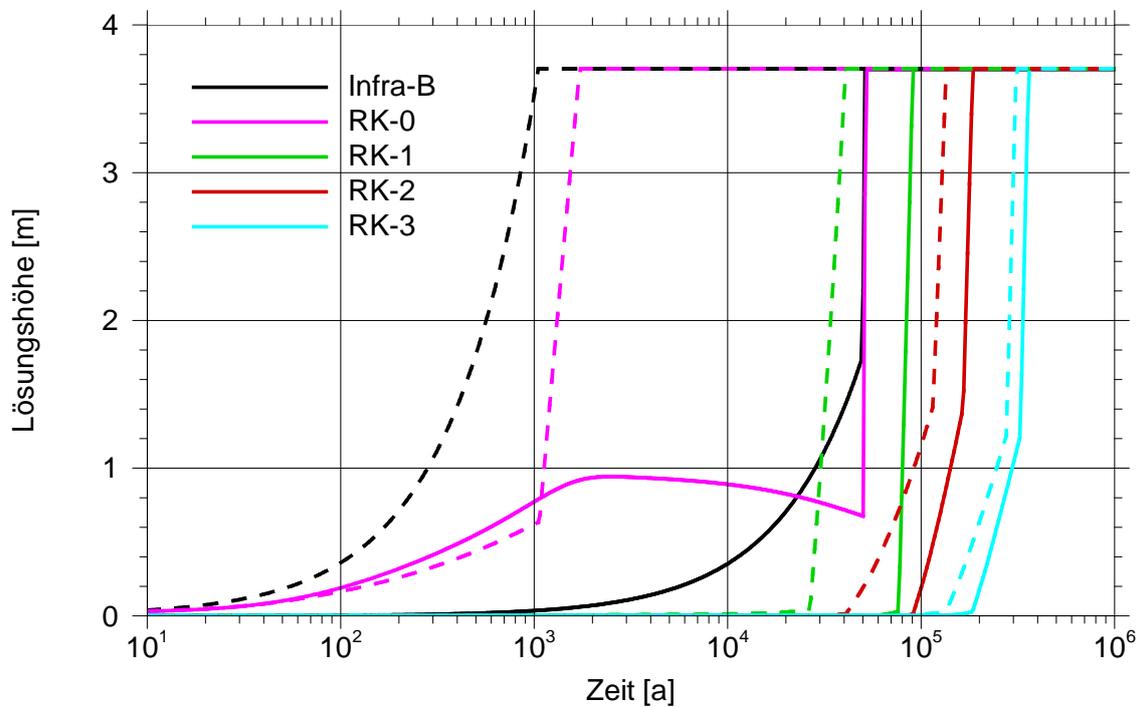
Der zur unbegrenzten Funktionsdauer der Verschlussbauwerke (Kapitel 4.1.4.1) entgegengesetzte What-if-Rechenfall betrachtet ein instantanes Versagen. Die radiologischen Auswirkungen (RGI) sind im Vergleich zum Basisfall gering verändert, siehe Abbildung 4.22. Durch das frühe Versagen der Verschlussbauwerke dringen Lösungen früher in den Einlagerungsbereich ein und es dauert nur ca. 1000 Jahre, bis der Infrastrukturbereich mit Lösung gefüllt ist, siehe Abbildung 4.23. Trotzdem ist die Zeit, bis das gesamte Grubengebäude mit Lösung aufgefüllt ist, ähnlich wie im Basisfall, siehe Abbildung 4.24. Dies liegt daran, dass die Zugangs- und Richtstrecken nach 1000 Jahren bereits eine sehr geringe Restporosität haben (siehe Abbildung 4.11) und den weiteren Zufluss von Lösungen ähnlich stark behindern wie im Basisfall.



**Abb. 4.22** RGI im What-if-Rechenfall mit instantanem Versagen der Verschlüsse (gestrichelt) im Vergleich zum Basisfall



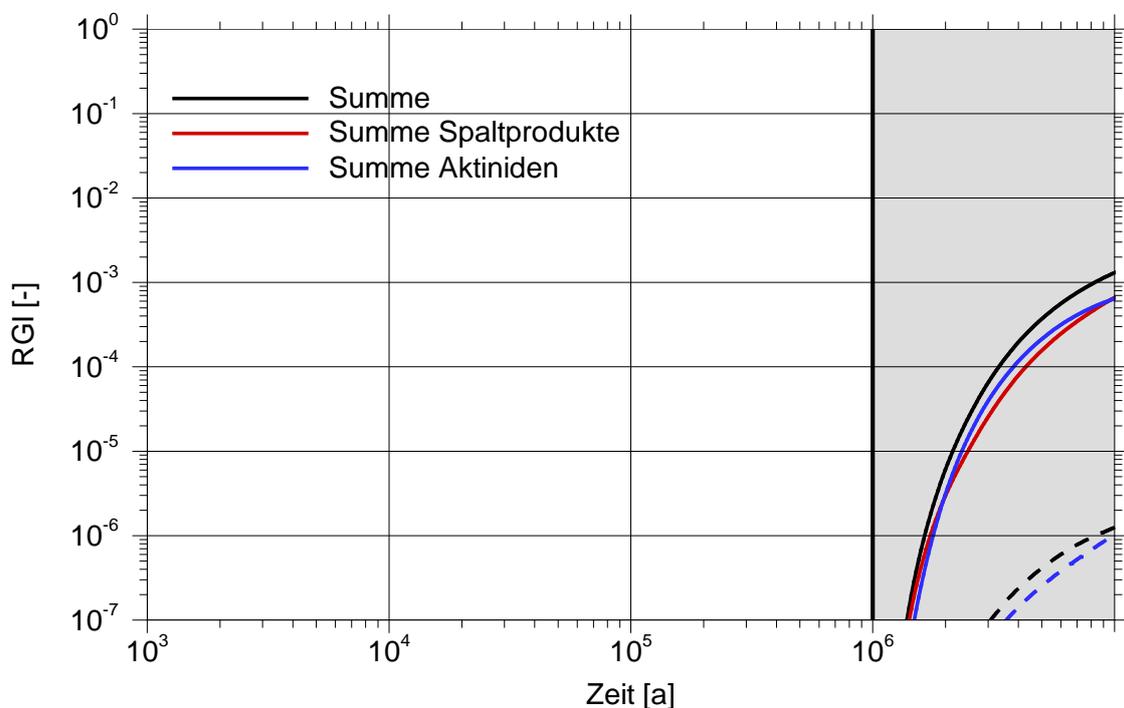
**Abb. 4.23** Volumina im Infrastrukturbereich im What-if-Rechenfall mit instantanem Versagen der Verschlüsse (gestrichelt) im Vergleich zum Basisfall



**Abb. 4.24** Lösungspegel im What-if-Rechenfall mit instantanem Versagen der Verschlüsse (gestrichelt) im Vergleich zum Basisfall

#### 4.1.4.3 Inventar ohne direkt endgelagerte Brennelemente

In diesem What-if-Rechenfall wird der Beitrag der direkt endgelagerten Brennelemente aus Leistungsreaktoren zu den radiologischen Konsequenzen untersucht. Zu diesem Zweck werden vom Grubengebäude des Basisfalls die Einlagerungsfelder mit den POLLUX®-Behältern für Brennelemente weggelassen. In Abbildung 4.25 sind die berechneten Konsequenzen (RGI) mit denjenigen des Basisfalls verglichen. Es ist deutlich zu erkennen, dass ohne die Inventare der Brennelemente aus Leistungsreaktoren der RGI um mehrere Größenordnungen reduziert ist. Im Umkehrschluss ist daraus zu schließen, dass die Radionuklide aus den direkt endgelagerten Brennelementen den RGI dominieren.



**Abb. 4.25** RGI im What-if-Rechenfall ohne Berücksichtigung der Brennelemente der Leistungsreaktoren (gestrichelt) im Vergleich zum Basisfall

#### 4.1.5 Probabilistische Analysen

Für das Referenzsystem „Flache Lagerung – Streckenlagerung“ wurden probabilistische Ungewissheits- und Sensitivitätsanalysen durchgeführt. Dabei wurden zwei Fälle untersucht: Ein Referenzfall mit realitätsnahen Werten innerhalb der wahrscheinlichen Entwicklungen des Endlagersystems und ein „klassischer Ansatz“ mit den möglichen Ausprägungen aller unabhängigen Parameter, der zur Umsetzung einer möglichst großen Gesamtheit an wahrscheinlichen und weniger wahrscheinlichen Entwicklungen

dient. Es wurden 1000 Realisationen für den Referenzfall und 2000 Realisationen für den klassischen Ansatz erzeugt und gerechnet. Eine höhere Anzahl von Realisationen für den klassischen Ansatz wurde gewählt, damit die Auswertung für die Sensitivitätsanalyse robuster wird. Die probabilistischen Berechnungen wurden mit den Codes RepoSTAR /BEC 16/ und RepoSUN des Programmpakets RepoTREND /REI 16/ durchgeführt.

#### **4.1.5.1 Ungewissheitsanalysen**

Für die beiden probabilistischen Rechenfälle (Referenzfall und klassischer Ansatz) wurden Ungewissheitsanalysen mit zwei statistischen Auswertungsverfahren durchgeführt:

- Zeitlicher Verlauf der statistischen Kenngrößen (Mittelwert, Median, Quantile, Maximum und Minimum)
- Histogramm der relativen Häufigkeit des RGI

Da aufgrund diffusiver Freisetzung in beiden Rechenfällen das absolute Maximum der Strahlenexposition erst nach Ende des Nachweiszeitraumes auftritt, wurde zum besseren Verständnis der Systementwicklung der Darstellungszeitraum in den Abbildungen auf  $10^7$  Jahre verlängert. Wird das absolute Maximum auch nicht in  $10^7$  Jahren erreicht, wird der bis dahin erreichte Maximalwert angegeben und statistisch ausgewertet. Dieser Maximalwert liegt dann am Rand des Zeitintervalls bei 10 Millionen Jahren.

#### **Zeitlicher Verlauf der statistischen Kenngrößen**

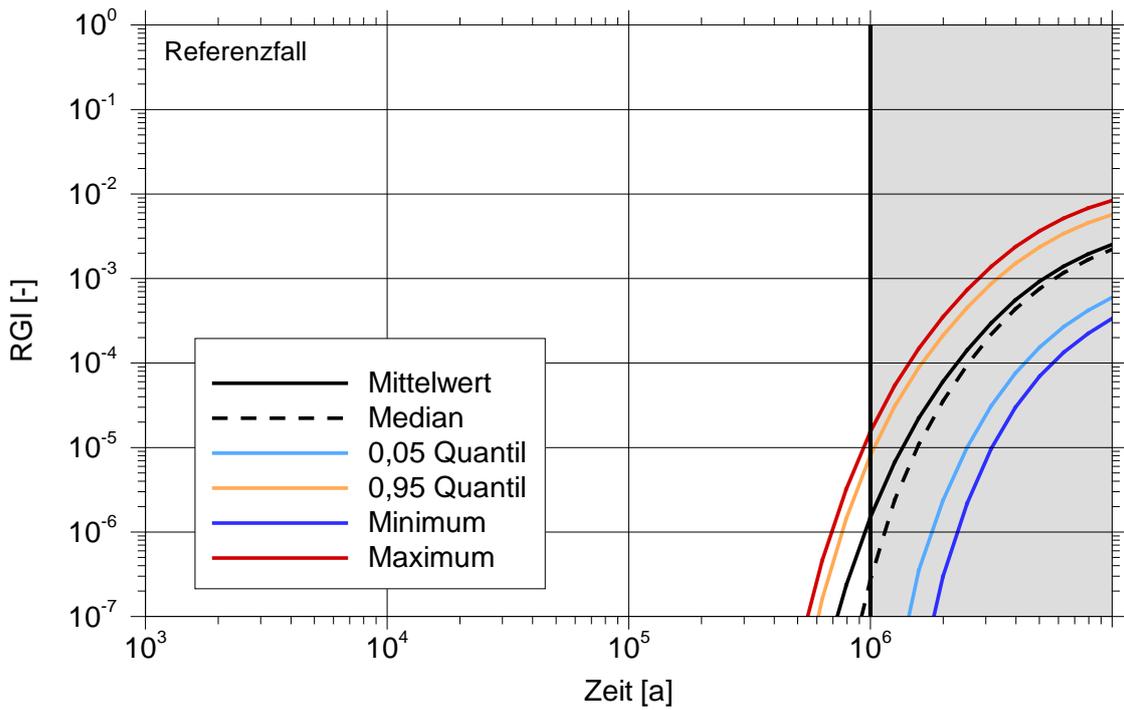
Die Abbildungen 4.26 und 4.27 zeigen die zeitlichen Verläufe der statistischen Kenngrößen des Referenzfalls und des klassischen Ansatzes über einen Simulationszeitraum von 10 Millionen Jahren. Auf Grund des langsamen diffusiven Transports steigen die Kurven bis zum Ende des dargestellten Zeitraumes an. Es wird für beide Rechenfälle erwartet, dass die Maximalwerte aller berechneten Maxima des RGI nach einigen zehn Millionen Jahren erreicht und geringfügig über 0,1 liegen werden. Die höchsten Maximalwerte des RGI treten erwartungsgemäß beim klassischen Ansatz auf. Die Bandbreite zwischen minimalen und maximalen RGI-Werten ist entsprechend der großen Bandbreite der Parameterwerte für den klassischen Ansatz viel größer als für den Referenzfall. Charakteristisch für den Größenunterschied zwischen den minimalen und maximalen Werten des Referenzfalls ist ein Faktor von ca. 25 und für den klassischen

Ansatz von über 5 Größenordnungen (siehe auch Abbildungen 4.28 und 4.29). Beim klassischen Ansatz beginnen die Maximalwerte ( $>10^{-7}$ ) schon bei etwa  $1,5 \cdot 10^5$  Jahren, beim Referenzfall ca.  $4 \cdot 10^5$  Jahre später. Dies ist auf die unterschiedlichen verwendeten Verteilungsfunktionen und Bandbreiten im Referenzfall und klassischen Ansatz zurückzuführen, die bewirken, dass entweder Einzelergebnisse mit geringerer oder mit größerer Bandbreite des RGI erzeugt werden.

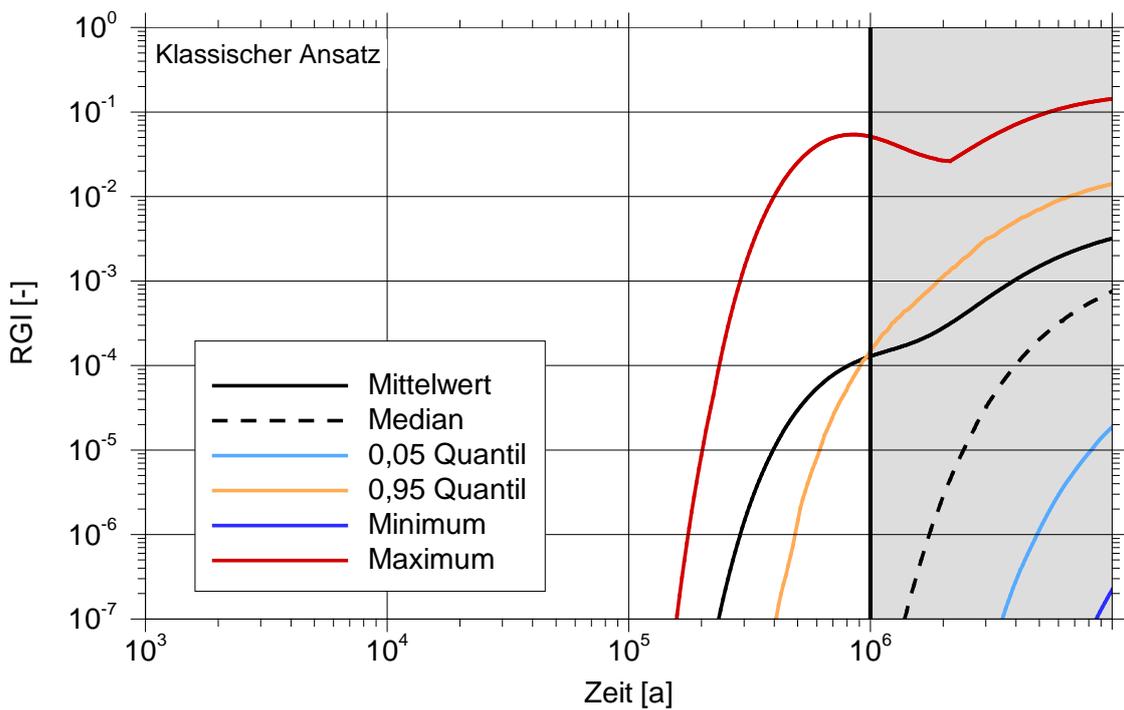
Der Maximalwert des Medians für den Referenzfall beträgt etwa ein Drittel bis zur Hälfte des maximalen RGI. Für den klassischen Ansatz sind die Medianwerte etwa in der Größenordnung des 0,05-Quantil-Werts des Referenzfalls und beginnen ca.  $4 \cdot 10^5$  Jahre später als die Medianwerte des Referenzfalls. Dagegen beginnt auf der dargestellten Skala der Mittelwert der berechneten Maximalwerte des RGI etwa  $4,5 \cdot 10^5$  Jahre früher als der Mittelwert im Referenzfall und ist nach  $10^7$  Jahren etwas höher als im Referenzfall.

Der klassische Ansatz erlaubt die Untersuchung des nicht eindeutig definierbaren Übergangsbereichs zwischen weniger wahrscheinlichen und unwahrscheinlichen Entwicklungen des Endlagersystems. In diesem Rechenfall sind viele Entwicklungen berücksichtigt, die gemäß den Sicherheitsanforderungen /BMU 10/ nicht bewertet werden müssen.

Da die berechneten RGI-Werte aller statistischen Kenngrößen des Referenzfalls und des klassischen Ansatzes bei 1000 bzw. 2000 Berechnungsfällen für alle Zeiten kleiner als 1 sind, ist der Nachweis unter den angenommenen Bedingungen über eine vereinfachte radiologische Langzeitaussage in diesen beiden Fällen erbracht. Demzufolge zeigen die Ergebnisse, dass die Kriterien für den sicheren Einschluss trotz der großen und teilweise "unrealistischen" Bandbreite der Parameterwerte auch im klassischen Ansatz immer erfüllt sind.



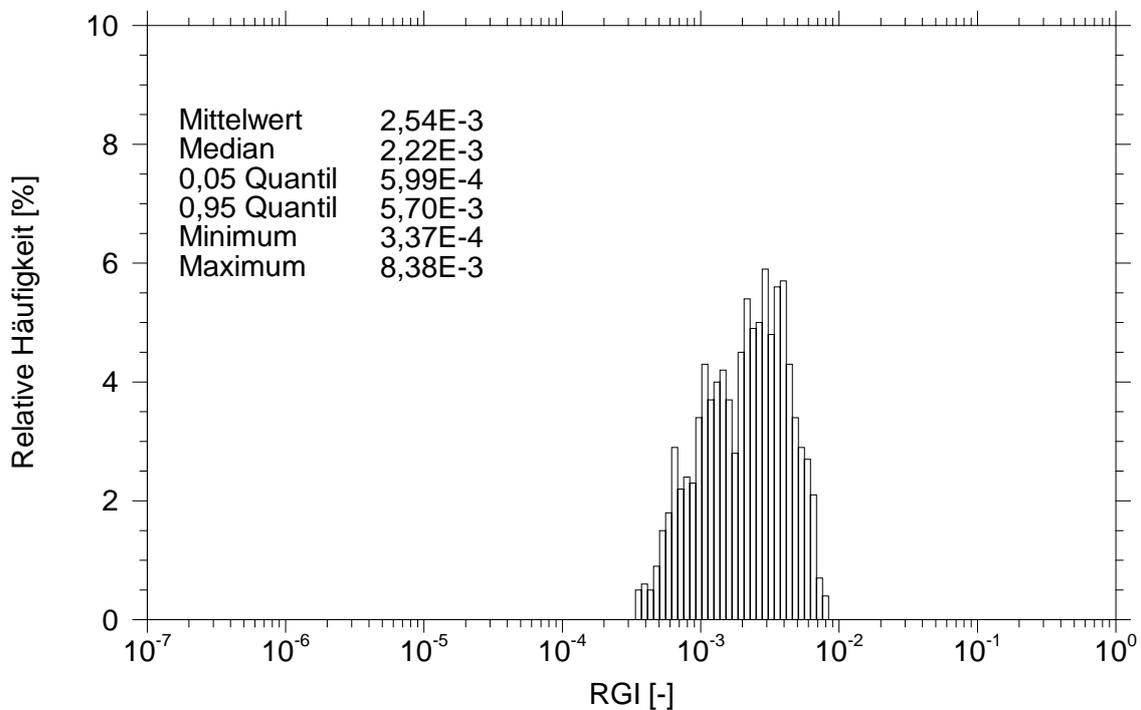
**Abb. 4.26** Zeitlicher Verlauf der statistischen Kenngrößen des RGIs im Referenzfall



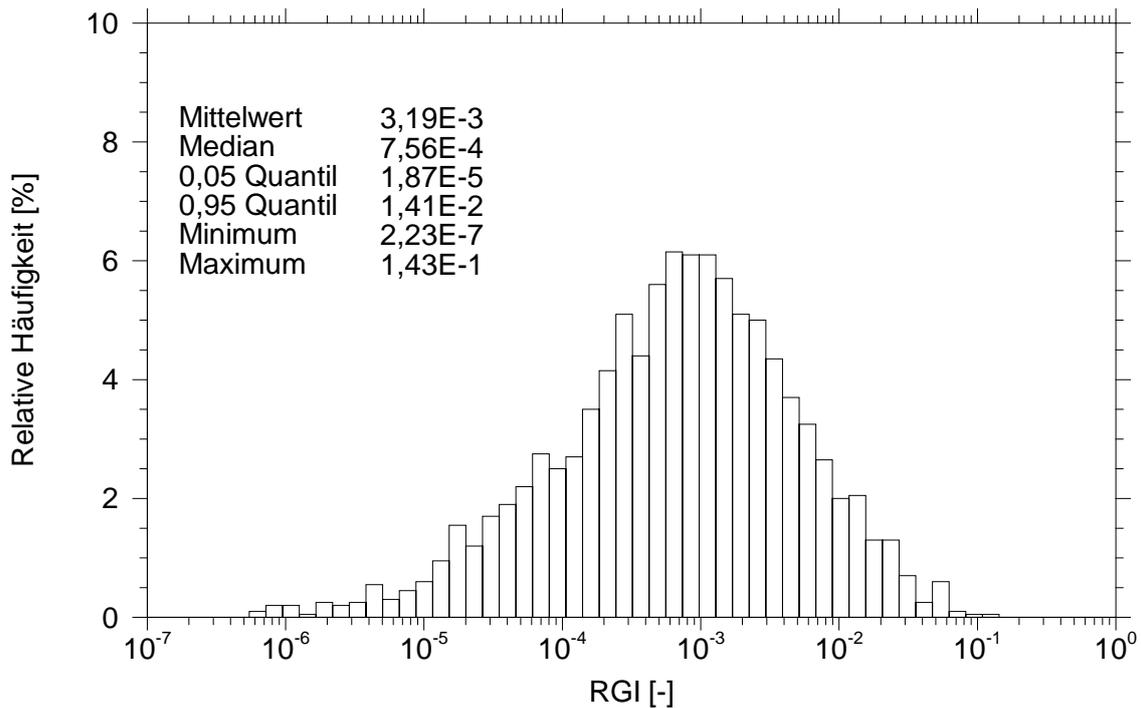
**Abb. 4.27** Zeitlicher Verlauf der statistischen Kenngrößen des RGIs im klassischen Ansatz

## Histogramm der relativen Häufigkeit des RGI

Das Histogramm für die Stichprobe der Maximalwerte des RGI ist für den Referenzfall in Abbildung 4.28 dargestellt. Die Werte liegen in einem schmalen Bereich von ca.  $3,4 \cdot 10^{-4}$  bis  $8,4 \cdot 10^{-3}$ . Dieser Bereich stimmt mit den in der Abbildung angegebenen Werten der statistischen Kenngrößen für diese Stichprobe überein. Die radiologischen Konsequenzen im klassischen Ansatz bewegen sich in einem viel größeren Rahmen als die des Referenzfalls. Dies ist an der breiten Form der Histogrammverteilung in Abbildung 4.29 zu erkennen. Im klassischen Ansatz hat die Diffusion eine ca. 25-fach größere Bandbreite und eine andere Verteilungsfunktion (lognormal), was zu den deutlich abweichenden Ergebnissen führt, da die Freisetzung der Radionuklide diffusionskontrolliert ist.



**Abb. 4.28** Häufigkeitsdichte der Maximalwerte des RGI im Referenzfall



**Abb. 4.29** Häufigkeitsdichte der Maximalwerte des RGI im klassischen Ansatz

#### 4.1.5.2 Sensitivitätsanalyse

Für die in Kapitel 4.1.5.1 diskutierten Fälle (Referenzfall und klassischer Ansatz) wurden Sensitivitätsanalysen durchgeführt, um jeweils die relevanten Parameter zu ermitteln. Dabei wurden drei Methoden angewandt:

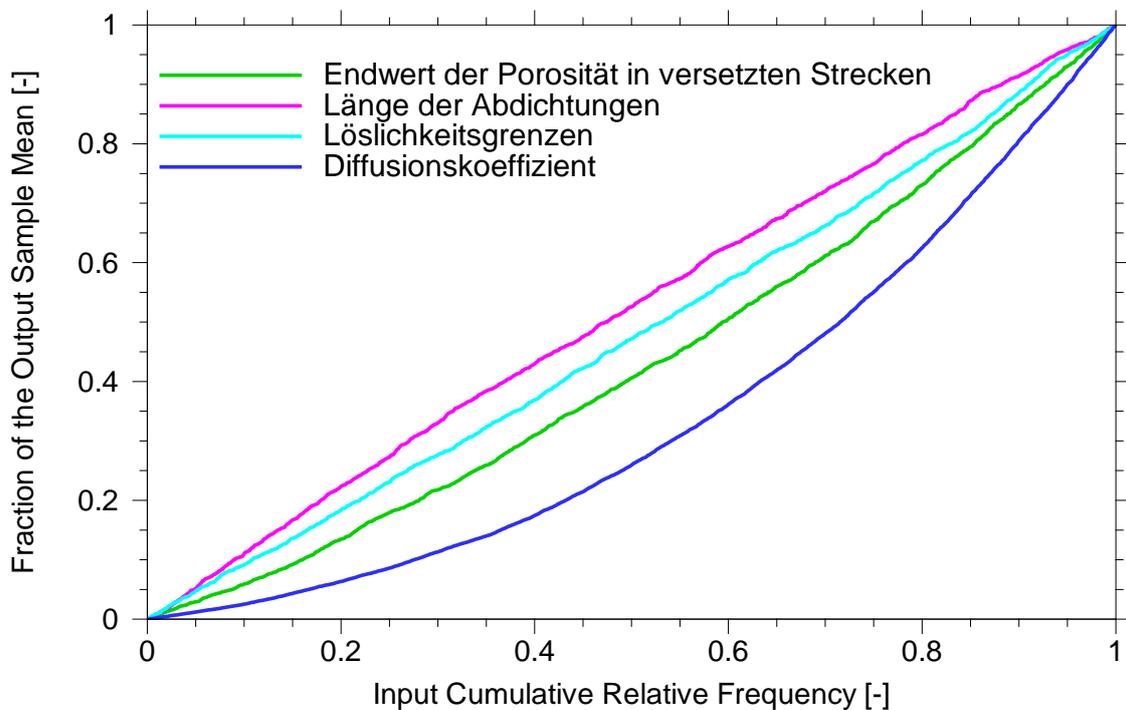
- CSM-plot (contribution to sample mean),
- SRRC (standardisierte Rang-Regressions-Koeffizienten) und
- Scatterplot.

Die Zielgröße für die Auswertung war jeweils der Maximalwert des RGI.

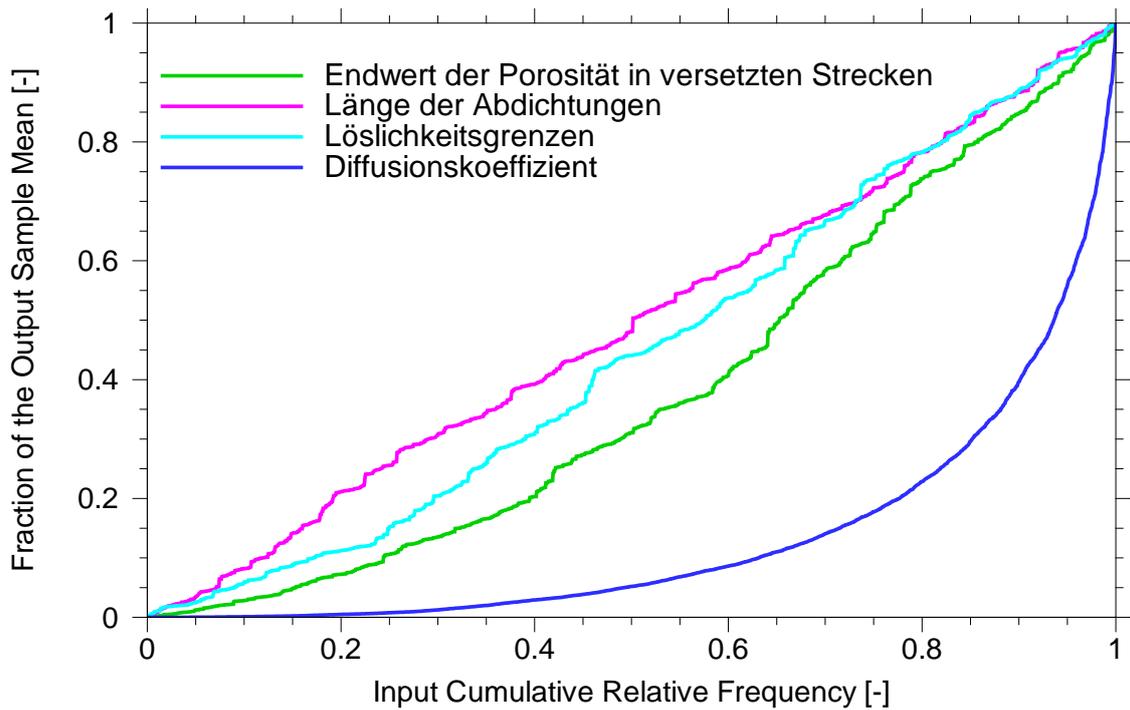
Der CSM-plot präsentiert für die unabhängigen Parameter den Verlauf des anteiligen Beitrags der nach Größe geordneten Werte zum Stichproben-Mittelwert. Aus der Stärke der Abweichungen der Kurven vom linearen Verlauf lässt sich ableiten, welche Relevanz die einzelnen Parameter des betrachteten Systems haben /BOL 09/. Der SRRC-Test weist auf Basis der Größe des berechneten Koeffizienten auf die Wichtigkeit der Parameter hin. Die Signifikanz eines Parameters kann man auch mit Hilfe eines Scatterplots erkennen, wenn ein graphischer Trend und/oder ein Muster zwischen den Werten eines Parameters und den Ausgabewerten des Modells ersichtlich ist.

### Contribution to sample mean (CSM)

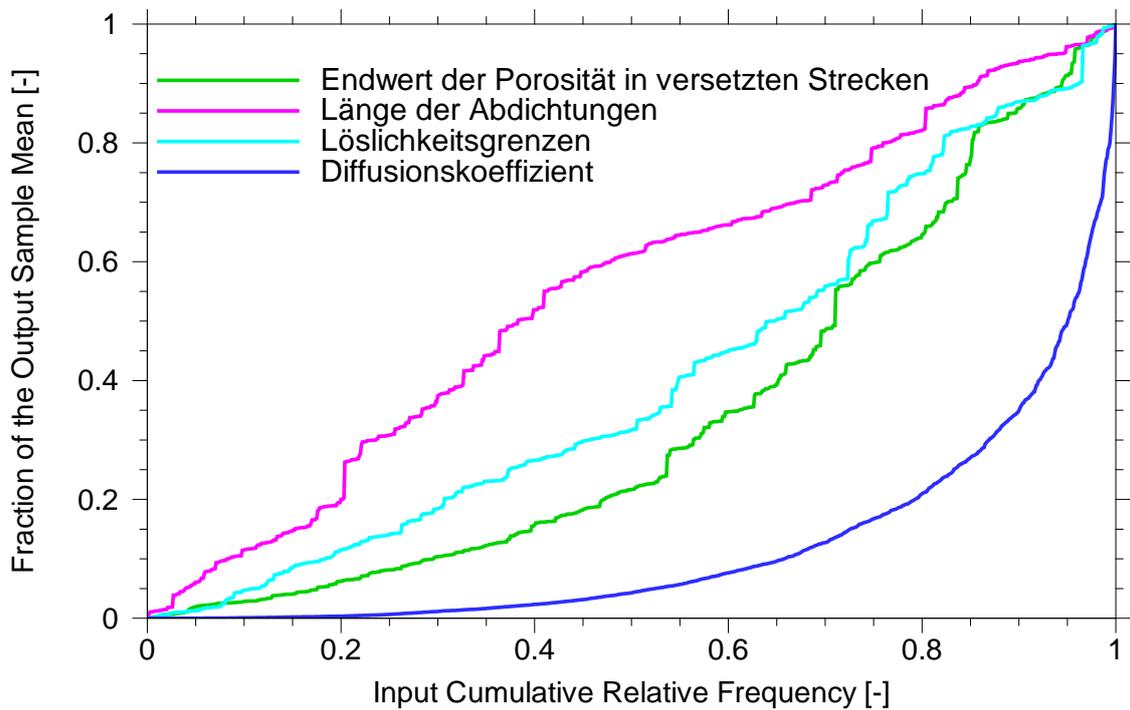
Aus den großen Abweichungen der CSM-Kurven in den Abbildungen 4.30 bis 4.32 vom linearen Verlauf lässt sich ableiten, dass die Parameter „Diffusionskoeffizient“, „Endwert der Porosität in versetzten Strecken“, „Löslichkeitsgrenzen“ und „Länge der Abdichtungen“ die größte Relevanz für den Transport der Radionuklide haben. Die für die anderen unabhängigen Parameter nur sehr geringen Abweichungen vom linearen Kurvenverlauf sind nicht dargestellt. Die nicht geglätteten CSM-Kurven des klassischen Ansatzes in Abbildung 4.31 weisen darauf hin, dass selbst die große Zahl von 2000 Realisationen für eine robuste Auswertung nicht ausreichend ist. Dies wird durch Abbildung 4.32 bestätigt, die eine CSM-Auswertung auf Basis von nur 1000 Realisationen für den klassischen Ansatz zeigt. Insbesondere für die Länge der Abdichtungen (violette Kurven) wird deutlich, dass der Parameter nicht signifikant ist.



**Abb. 4.30** Beitrag der unabhängigen Variablen zum Stichprobenmittel (CSM) für den Referenzfall



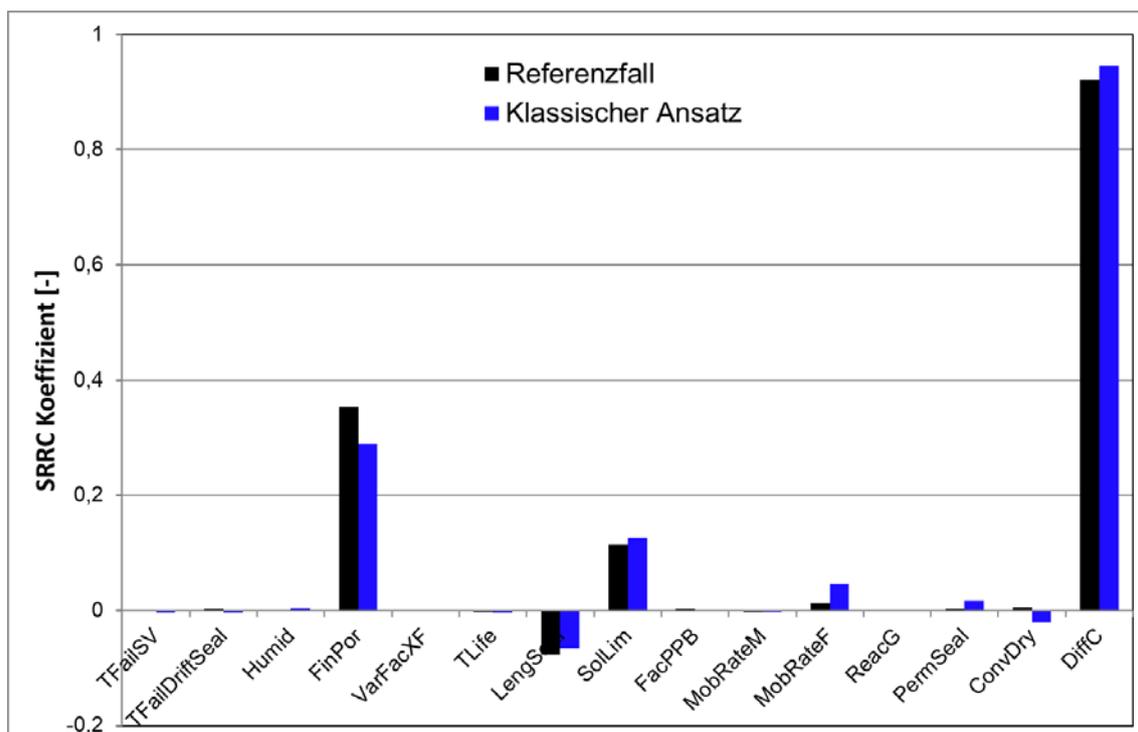
**Abb. 4.31** Beitrag der unabhängigen Variablen zum Stichprobenmittel (CSM) für den klassischen Ansatz mit 2000 Realisationen



**Abb. 4.32** Beitrag der unabhängigen Variablen zum Stichprobenmittel (CSM) für den klassischen Ansatz mit 1000 Realisationen

## Standardisierte Rang-Regression (SRRC)

Die Auswertungen nach der standardisierten Rang-Regression (SRRC) ergeben für den Referenzfall und den klassischen Ansatz eine ähnliche Reihenfolge der wesentlichen unabhängigen Variablen, siehe Abbildung 4.33. Für den Diffusionskoeffizienten (DiffC) ist der SRRC-Koeffizient am höchsten, was auf die größte Signifikanz hinweist, d. h. die Ergebnisse bestätigen, dass der Transport im Grubengebäude im Wesentlichen durch diffusive Prozesse bewirkt wird. Für den klassischen Ansatz ist der SRRC-Koeffizient des Diffusionskoeffizienten sogar etwas höher als für den Referenzfall. Dies ist nachvollziehbar, da für den klassischen Ansatz eine größere Bandbreite und eine andere Verteilung (lognormal) des Diffusionskoeffizienten in die Rechnungen einfließen. Von kleinerer, aber noch relevanter Bedeutung für die zwei Fälle sind die Parameter „Endwert der Porosität in versetzten Strecken“ (FinPor), „Löslichkeitsgrenzen“ (SolLim) und „Länge der Abdichtungen“ (LengSeal).

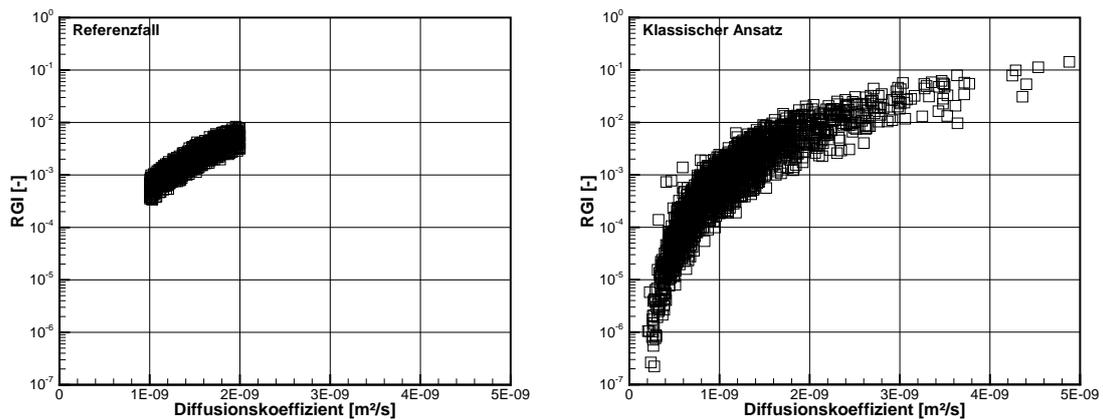


**Abb. 4.33** Standardisierte Rangregressionskoeffizienten (SRRC) für den Referenzfall und den klassischen Ansatz

## Scatterplots

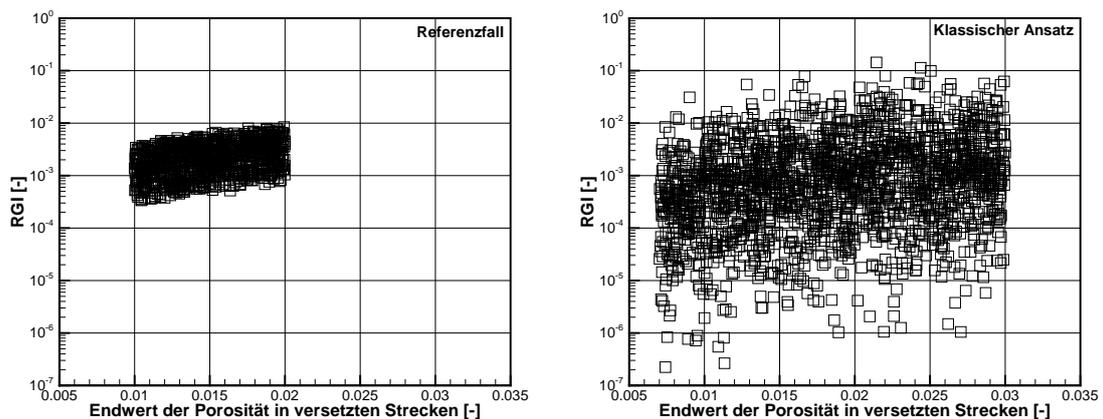
Die Abbildungen 4.34 und 4.35 zeigen die Scatterplots der Parameter „Diffusionskoeffizient“ und „Endwert der Porosität in versetzten Strecken“ für den Referenzfall und den

klassischen Ansatz. Die Signifikanz der beiden Parameter ist aus der deutlichen Steigung der Punktescharen zu entnehmen. Demzufolge hat ein großer Diffusionskoeffizient oder ein großer Endwert der Porosität in versetzten Strecken tendenziell einen großen maximalen RGI zur Folge. In den Scatterplots der beiden Parameter sind im klassischen Ansatz die größeren Bandbreiten der Parameterwerte und der RGI-Werte im Vergleich zu denen des Referenzfalls gut ersichtlich. Dies bestätigt die Ergebnisse der Ungewissheitsanalyse (Kapitel 4.1.5.1), dass im Referenzfall die Bandbreite der Ergebnisse geringer ist als im klassischen Ansatz.



**Abb. 4.34** Scatterplot für den Diffusionskoeffizienten; Referenzfall und klassischer Ansatz

Die Abbildungen wurden verkleinert, um einen übersichtlicheren optischen Vergleich der Kurvenverläufe in den beiden Rechenfällen zu ermöglichen.



**Abb. 4.35** Scatterplot für den Endwert der Porosität in versetzten Strecken; Referenzfall und klassischer Ansatz

#### **4.1.5.3 Zusammenfassung der Ergebnisse probabilistischer Analysen**

Zwei probabilistische Rechenfälle wurden für das Referenzsystem „Flache Lagerung – Streckenlagerung“ untersucht: Ein Referenzfall mit realitätsnahen Werten innerhalb der wahrscheinlichen Entwicklungen des Endlagersystems und ein klassischer Ansatz mit den möglichst abdeckenden Ausprägungen aller unabhängigen Parameter, der zur Umsetzung einer möglichst großen Gesamtheit an wahrscheinlichen und weniger wahrscheinlichen Entwicklungen dient.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Kriterien für den sicheren Einschluss trotz der großen und teilweise "extremen" Bandbreite der Parameter und der RGI-Werte im klassischen Ansatz immer erfüllt sind. Der RGI bleibt bei den 1000 Berechnungsfällen für den Referenzfall und den 2000 Berechnungsfällen für den klassischen Ansatz deutlich unter 1. Die Analysen zeigen weiterhin, dass der Diffusionskoeffizient, die Endporosität in versetzten Strecken, die Löslichkeit und die Länge der Abdichtungen den größten Einfluss auf das Systemverhalten haben. Allerdings spielen die letzten drei Parameter verglichen mit der Diffusion eine untergeordnete Rolle. Somit bestätigen die Ergebnisse der Rechnungen, dass der Transport in dem versetzten Grubengebäude hauptsächlich diffusiv erfolgt.

#### **4.2 Endlagersystem „Flache Lagerung – horizontale Bohrlochlagerung“**

Bei der horizontalen Bohrlochlagerung werden die Brennelemente der Leistungsreaktoren in Brennstabkokillen (BSK-H) in horizontalen Bohrlöchern eingelagert. Bei den Bohrlöchern kommen als wesentliche Sicherheitselemente die Verrohrung und der Bohrlochverschluss hinzu. Im Referenzszenarium des Endlagersystems wird die Verrohrung inklusive der Verschlüsse der horizontalen Bohrlöcher als langfristig intakt angenommen, d. h. es kommt zu keinem Ausfall der Verrohrung und damit zu keinem Lösungszutritt zu den Abfallgebinden. Im Versagensszenarium werden die Verschlüsse zum Zeitpunkt 50.000 Jahre durchlässig.

Das Endlagerkonzept wird in der modelltechnischen Umsetzung in 2 Varianten behandelt:

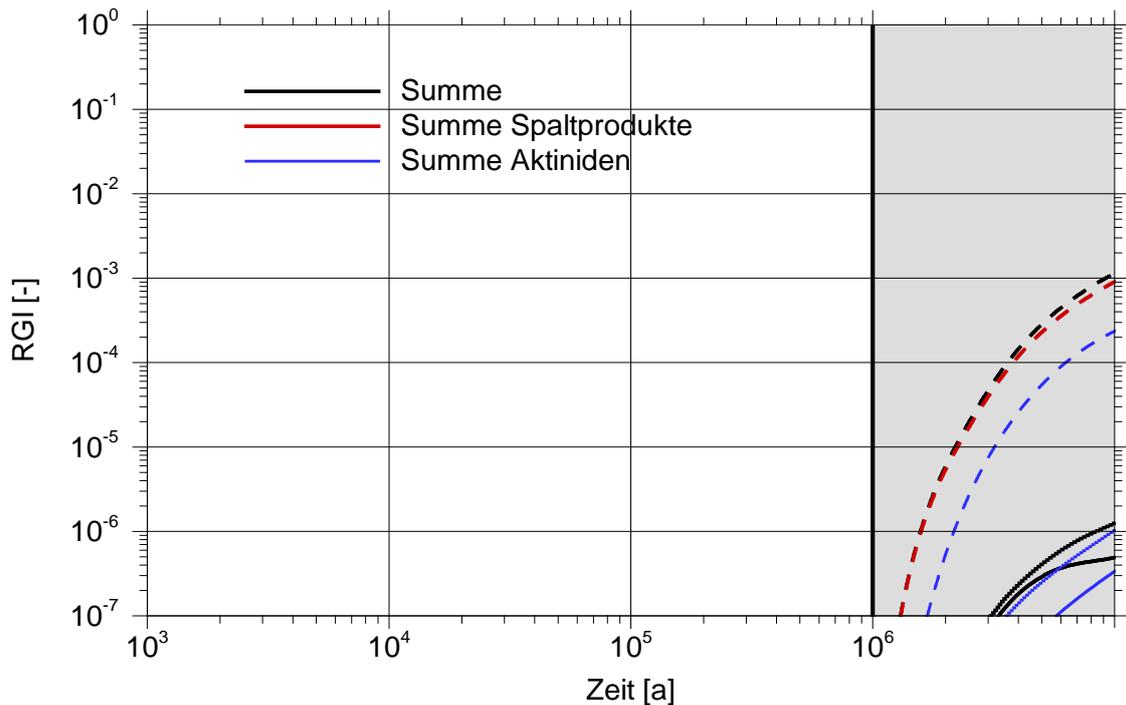
- Variante 1: Die Segmente für die horizontalen Bohrlöcher sind deaktiviert und werden im Versagensszenarium nach 50.000 Jahren zugeschaltet.

- Variante 2: Die Bohrlöcher sind immer zugeschaltet, die Verschlüsse separat modelliert. Im Versagensszenarium erhöht sich die Permeabilität der Verschlüsse nach 50.000 Jahren.

#### **4.2.1 Variante 1: Zuschalten der Bohrlöcher**

Im Referenzszenarium kommt es zu keinem Ausfall der Bohrlochverschlüsse und der Verrohrung und damit zu keinem Lösungszutritt zu den Abfallgebinden. In der Modellvariante 1 werden die Segmente für die Bohrlöcher im Referenzszenarium dauerhaft deaktiviert. Im Versagensszenarium werden die Verschlüsse zum Zeitpunkt 50.000 Jahre durchlässig und die Segmente modelltechnisch in die Segmentstruktur eingebunden. Bohrlochverschlüsse werden nicht separat modelliert.

Die berechneten RGI-Verläufe für die Modellvariante 1 der horizontalen Bohrlochlage sind in Abbildung 4.36 dargestellt. Im Referenzszenarium (dichte Bohrlochverschlüsse) ist der RGI sehr klein und entspricht annähernd der What-if-Variante „ohne Brennelemente“ der Streckenlagerung. Im Versagensszenarium ist der Maximalwert des RGI gegenüber dem Referenzszenarium um etwa 3 Größenordnungen erhöht.

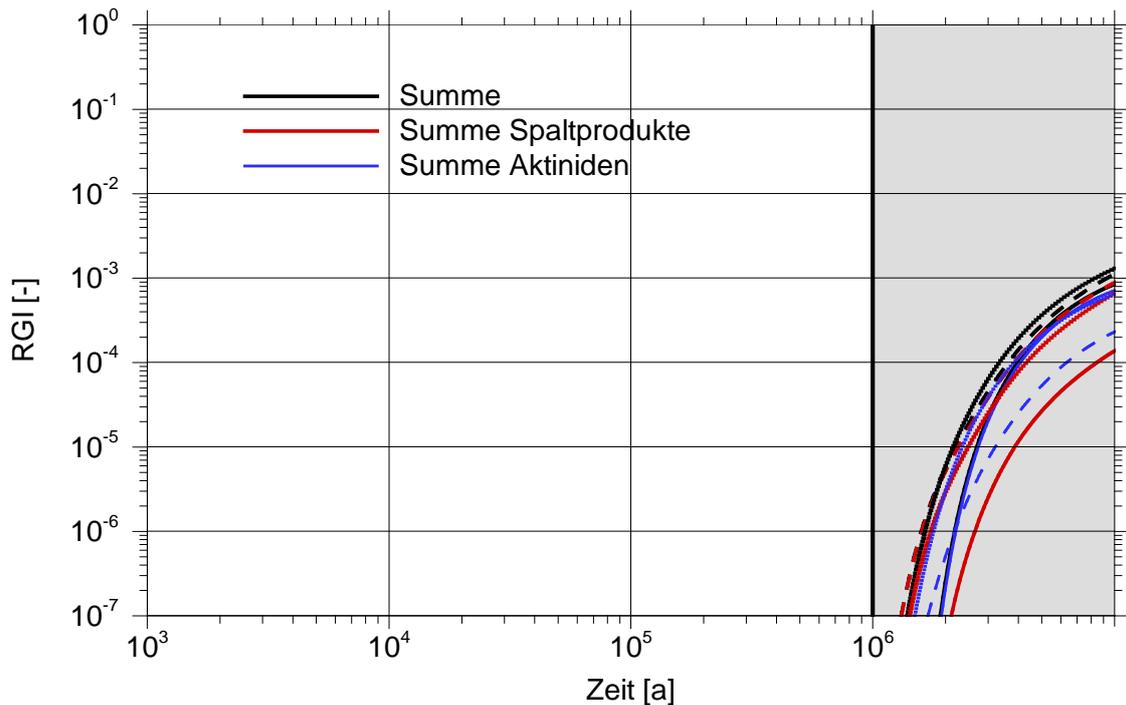


**Abb. 4.36** Horizontale Bohrlochlagerung, Variante 1. RGI im Referenzszenarium (dichte Bohrlochverschlüsse), im Vergleich zum Szenarium mit Versagen der Verschlüsse (gestrichelt) und in der Variante der Streckenlagerung „ohne Brennelemente“ (gepunktet)

#### 4.2.2 Variante 2: Modellierung der Bohrlochverschlüsse

In der Modellvariante 2 sind die Segmente für die Bohrlöcher immer aktiv und durch separat modellierte Bohrlochverschlüsse vom übrigen Grubengebäude getrennt. Die dichten Bohrlochverschlüsse werden mit einer Permeabilität von  $10^{-22} \text{ m}^2$  angesetzt. Im Versagensszenarium wird die Permeabilität nach 50.000 Jahren auf  $10^{-15} \text{ m}^2$  erhöht, siehe Kapitel 3.5.4.

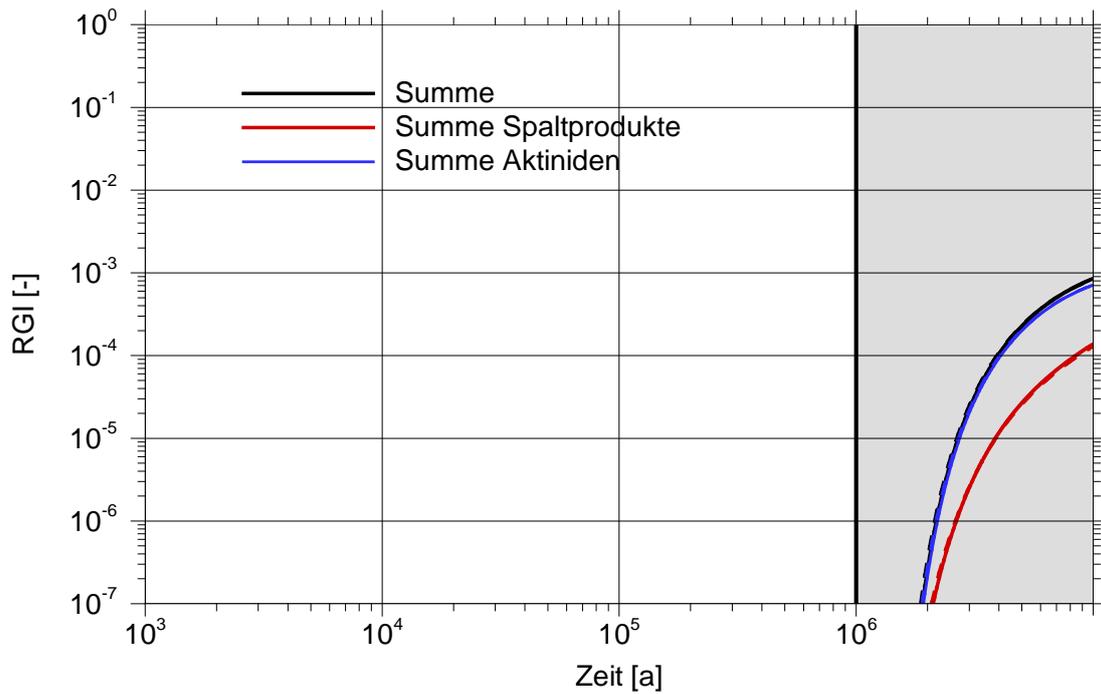
In der Abbildung 4.37 sind RGI-Verläufe für das Referenzszenarium (dichte Bohrlochverschlüsse) im Vergleich zum Szenarium mit Versagen der Verschlüsse und dem Basisfall der Streckenlagerung dargestellt. Die Maximalwerte des RGI sind für alle diese Rechenfälle in ähnlicher Größenordnung. Es zeigt sich, dass die Modellumsetzung der dichten Bohrlochverschlüsse mit Segmenten geringer Permeabilität sehr langfristig immer noch zu einem Lösungskontakt der Abfälle und somit zu einer rechnerischen Freisetzung aus den Einlagerungsbohrlöchern führt.



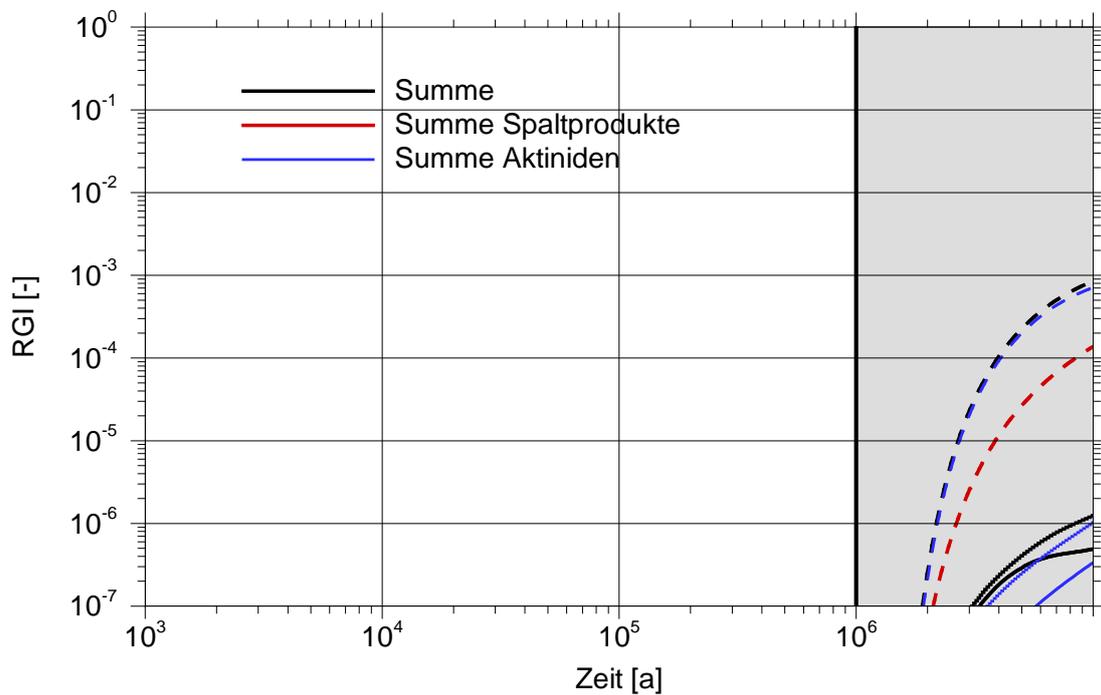
**Abb. 4.37** Horizontale Bohrlochlagerung. RGI im Referenzszenarium (dichte Bohrlochverschlüsse) im Vergleich zum Szenarium mit Versagen der Verschlüsse (gestrichelt) und der Referenzvariante (Streckenlagerung; gepunktet)

Im Versagensszenarium (Abbildung 4.37) wurde eine Konvergenz der Einlagerungsbohrlöcher ab dem Zeitpunkt des Verschlussversagens nach 50.000 Jahren berücksichtigt. Diese Annahme ist konservativ und setzt voraus, dass zum Versagenszeitpunkt auch die Bohrlochliner vollständig korrodiert sind. Es ist jedoch auch ein Szenarium denkbar, bei dem die Stahl liner aufgrund ihrer massiven Auslegung auch bei Lösungszufluss in die Bohrlöcher ihre mechanische Integrität erhalten und eine Konvergenz der Bohrlöcher dauerhaft verhindert wird. In diesem Szenarium bliebe der un- verfüllte Ringraum zwischen Kokillen und Liner auch nach Lösungsfüllung erhalten, ein Nuklidtransport aus den Bohrlochern erfolgt ausschließlich diffusiv.

Die RGI-Verläufe für das Versagensszenarium ohne Konvergenz sind in der Abbildung 4.38 im Vergleich zum Referenzszenarium (dichte Bohrlochverschlüsse) dargestellt. Die Kurven unterscheiden sich kaum. Damit ist belegt, dass die angenommene Permeabilität der Bohrlochverschlüsse nur einen geringen Einfluss auf die langfristige Nuklidfreisetzung hat. Sofern eine Konvergenz ausgeschlossen wird, erfolgt der Transport aus den Einlagerungsbohrlochern in beiden Szenarien ausschließlich diffusiv und annähernd gleich.



**Abb. 4.38** Horizontale Bohrlochlagerung. RGI im Referenzszenarium (dichte Bohrlochverschlüsse) im Vergleich zum Szenarium mit Versagen der Verschlüsse ohne Konvergenz (gestrichelt)



**Abb. 4.39** Horizontale Bohrlochlagerung. RGI im Referenzszenarium Variante 1 (Bohrlöcher deaktiviert) im Vergleich zur Variante 2 mit Bohrlöchern und Verschlüssen (gestrichelt) sowie der Variante „Streckenlagerung, ohne Brennelemente“ (gepunktet)

In Abbildung 4.39 sind nochmals die RGI-Verläufe der Varianten 1 und 2 im Referenzszenarium (dichte Bohrlochverschlüsse) gegenübergestellt. Zum Vergleich sind die Ergebnisse der What-if-Variante „ohne Brennelemente“ der Streckenlagerung ebenfalls dargestellt. Es wird deutlich, dass ein Szenarium ohne Verschlussversagen nur in der Variante 1, wo im Modell die Bohrlöcher deaktiviert sind, zur Nachbildung einer Entwicklung mit dauerhaft trockenen Abfällen führt. In der Variante 1, in der die Bohrlochverschlüsse durch eigene Modellsegmente geringer Permeabilität abgebildet werden, kommt es langfristig trotz „dichter“ Verschlüsse zu einem Lösungszutritt in die Bohrlöcher und somit zu einer Freisetzung aus den hier eingelagerten Brennelementen.

Die Frage, ob die dauerhafte und vollständige Abdichtung von horizontalen Bohrlöchern gegenüber in das Grubengebäude eindringender Lösung technisch überhaupt möglich ist, ist daher von einiger Relevanz zum einen für die Modellumsetzung solcher Endlagervarianten aber letztlich auch für die sicherheitliche Bewertung des Einschlussvermögens derartiger Endlagersysteme.

### **4.3 Endlagersystem „Salzkissen – vertikale Bohrlochlagerung“**

Bei einem Salzkissen sind die vertikalen Dimensionen der Salzstruktur größer als bei der flachen Lagerung, so dass Grubengebäude mit vertikalen Bohrlöchern möglich sind. Im Referenzszenarium für dieses Endlagersystem wird angenommen, dass die Bohrlochverschlüsse und die Verrohrung langfristig dicht sind, also niemals versagen.

Das Endlagersystem wird ebenfalls mit 2 Modellierungs-Varianten untersucht:

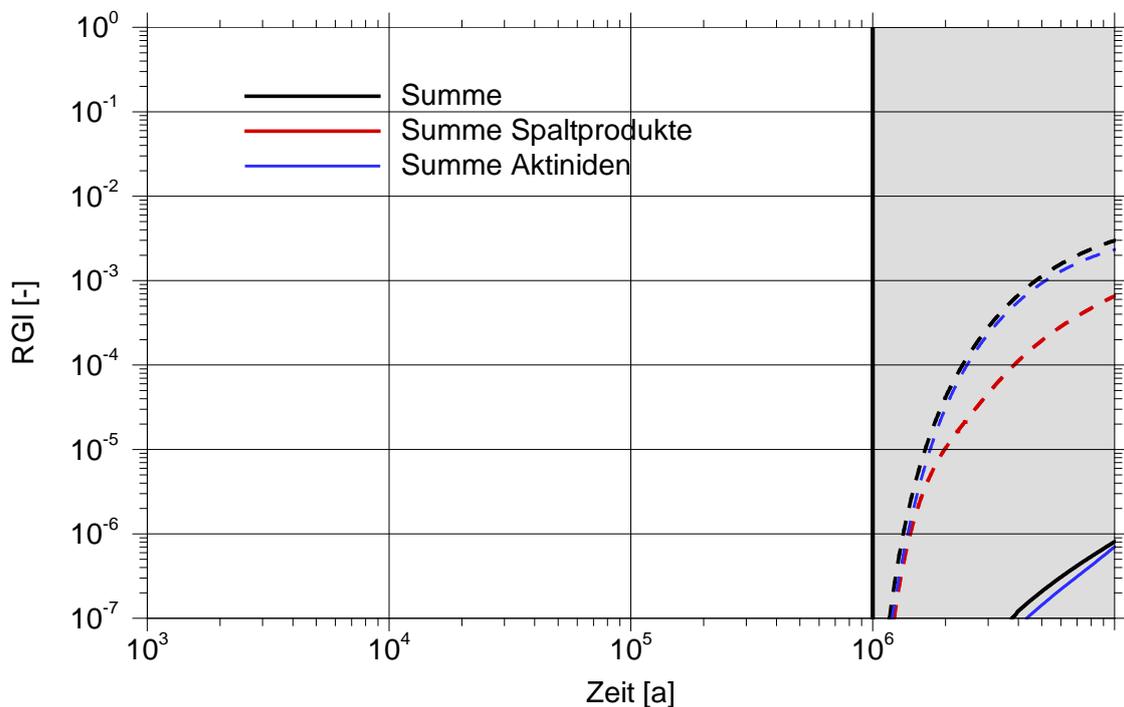
- Variante 1: Die Segmente für die horizontalen Bohrlöcher sind deaktiviert und werden im Versagensszenarium nach 50.000 Jahren zugeschaltet.
- Variante 2: Die Bohrlöcher sind immer zugeschaltet, die Verschlüsse separat modelliert. Im Versagensszenarium versagen die Verschlüsse nach 50.000 Jahren (Erhöhung der Permeabilität).

#### **4.3.1 Variante 1: Zuschalten der Bohrloch-Segmente nach 50.000 Jahren**

Im Referenzszenarium des Endlagersystems wird angenommen, dass die Verschlüsse und Verrohrungen der Bohrlöcher langfristig dicht sind. Infolgedessen werden Radionuklide nur aus den Abfallgebänden freigesetzt, die nicht in Bohrlöchern gelagert sind.

Es ergeben sich die durchgezogenen Kurven in Abbildung 4.40. Diese Kurven entsprechen wie zu erwarten dem What-if-Rechenfall „ohne Brennelemente“ im Endlagersystem der flachen Lagerung (siehe Abbildung 4.43), da bei der vertikalen Bohrlochlagerung auch nur die Brennelemente in den Bohrlöchern eingelagert werden.

Werden die Segmente für die Bohrlöcher nach 50.000 Jahren zugeschaltet, was einem Versagen der Bohrlochverschlüsse zu diesem Zeitpunkt entspricht, ergeben sich die gestrichelten Kurven in Abbildung 4.40. Der RGI ist um ca. 3 Größenordnungen höher als im Referenzszenarium, da nun vor allem die Radionuklide aus den Brennelementkokillen relevant sind.



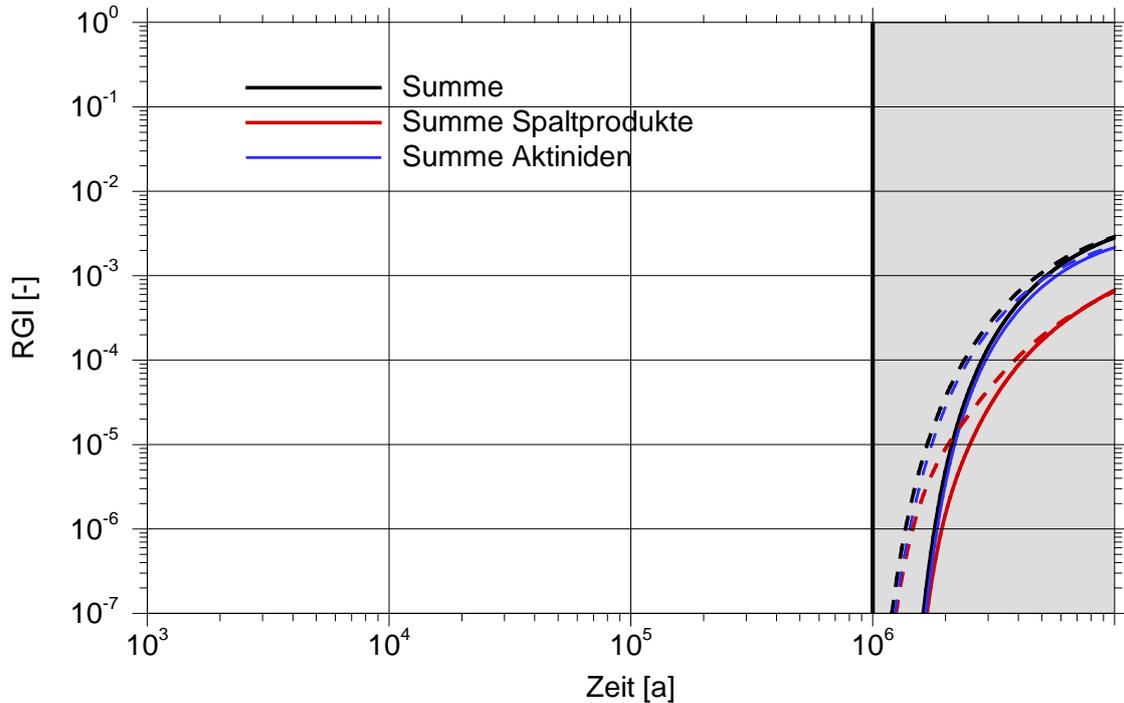
**Abb. 4.40** Vertikale Bohrlochlagerung, Variante 1. RGI im Referenzszenarium mit dichten Bohrlochverschlüssen, im Vergleich zum Szenarium mit Zuschalten der Bohrloch-Segmente (gestrichelt)

#### 4.3.2 Variante 2: Versagen der Bohrlochverschlüsse nach 50.000 Jahren

In dieser Variante werden die Bohrlöcher durch 2 Segmente modelliert: dem Bohrloch und dem Verschluss. Es wird angenommen, dass der Verschluss nach 50.000 Jahren versagt, d. h. dass sich seine Permeabilität stark erhöht. Die durchgezogenen Kurven in Abbildung 4.41 sind wieder für das Referenzszenarium (dichte Verschlüsse über die gesamte Modellzeit), wobei sich hier größere RGI als in Abbildung 4.40 ergeben, weil

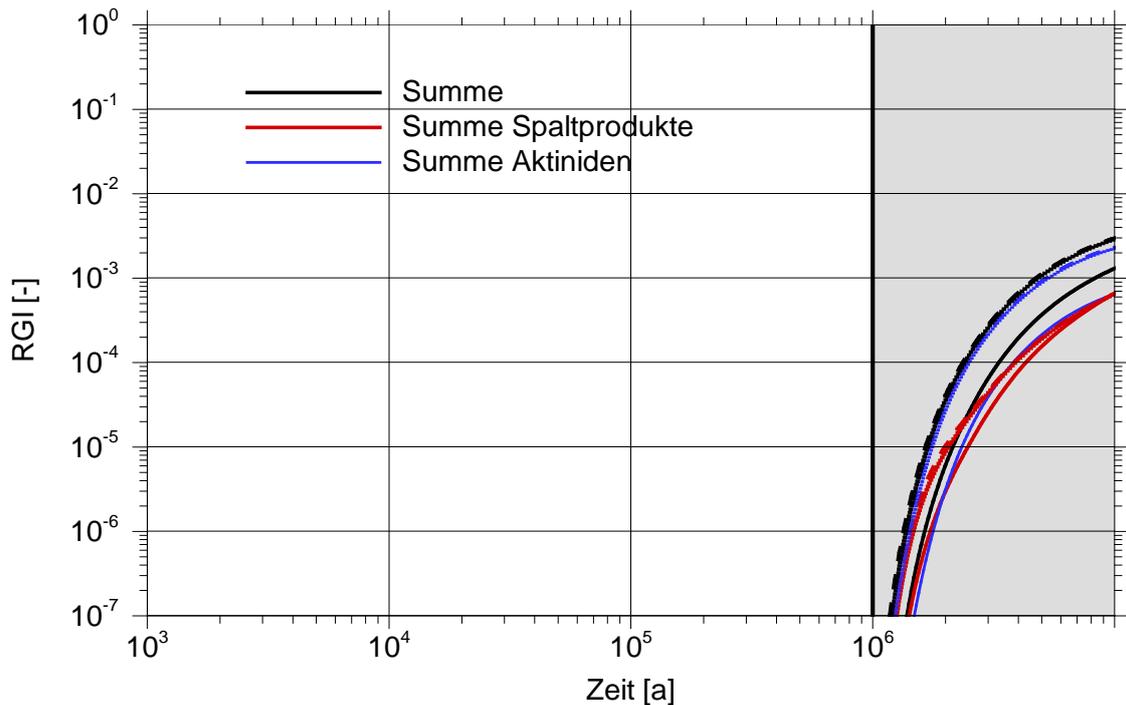
die Verschlüsse von Beginn an eine geringe Permeabilität haben, in Variante 1 aber absolut dicht sind.

Durch das Versagen der Bohrlochverschlüsse nach 50.000 Jahren ergeben sich die gestrichelten Kurven in Abbildung 4.41. Die Kurvenverläufe beginnen etwas früher als im Referenzszenarium, erreichen aber die gleichen Maximalwerte nach  $1 \cdot 10^7$  Jahren.



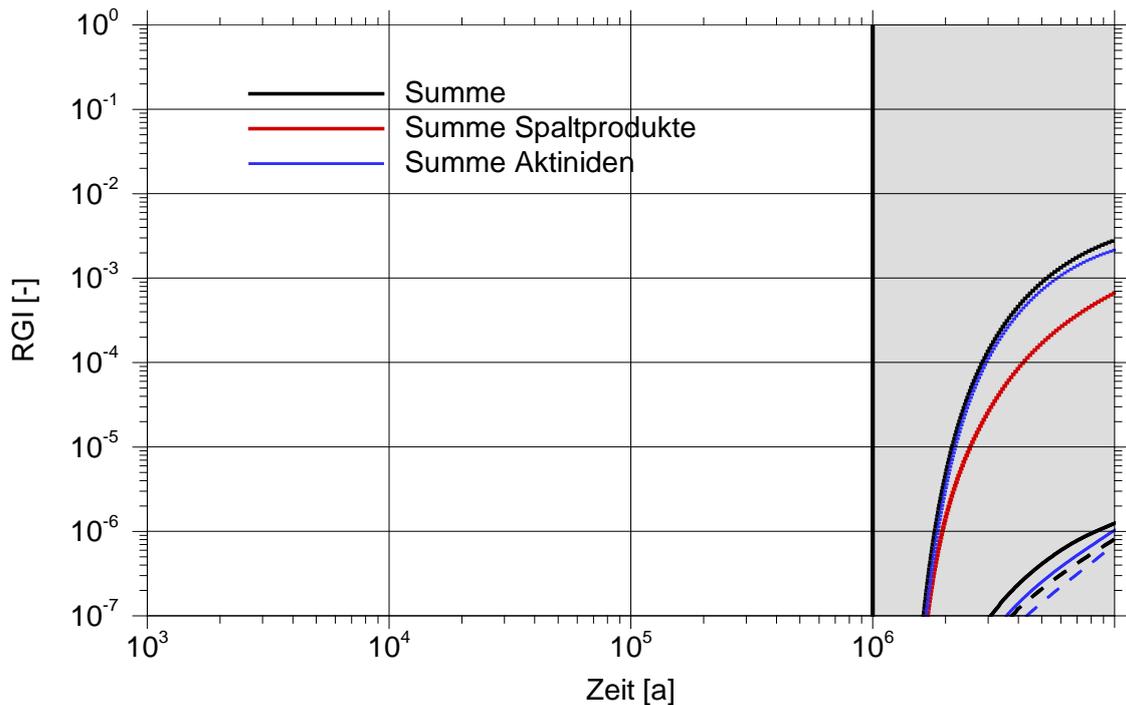
**Abb. 4.41** Vertikale Bohrlochlagerung, Variante 2. RGI im Referenzszenarium mit dichten Bohrlochverschlüssen, im Vergleich zum Szenarium mit Versagen der Verschlüsse (gestrichelt)

In Abbildung 4.42 sind die Ergebnisse für die beiden Varianten (jeweils mit Versagen der Verschlüsse) verglichen und dem Basisfall der Streckenlagerung gegenübergestellt. Die Ergebnisse der beiden Varianten unterscheiden sich nur unwesentlich; die RGI sind generell größer als im Basisfall und beginnen früher.



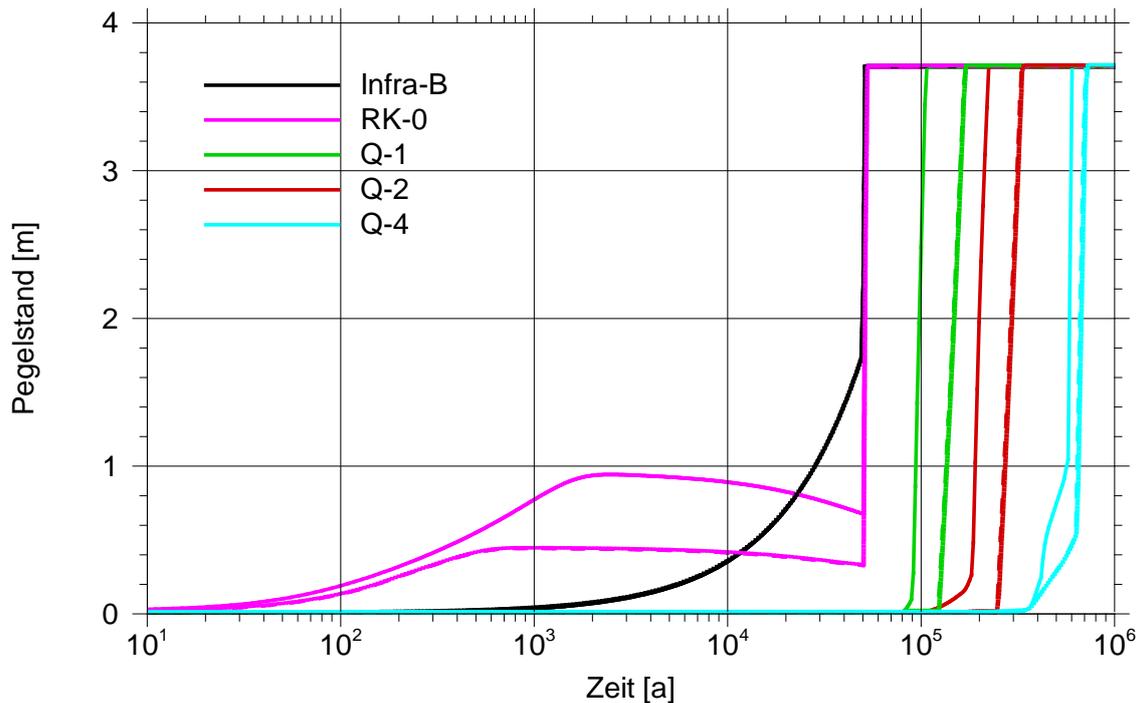
**Abb. 4.42** RGI im Basisfall der Streckenlagerung im Vergleich zur vertikalen Bohrlochlagerung: Variante 1 (gestrichelt), Variante 2 (gepunktet)

In Abbildung 4.43 sind die Ergebnisse für die Referenzszenarien der beiden Varianten (jeweils ohne Versagen der Verschlüsse) verglichen und dem What-if-Rechenfall „keine Brennelemente“ der Streckenlagerung gegenübergestellt. Die Ergebnisse der beiden Varianten unterscheiden sich, weil in Variante 1 überhaupt keine Radionuklide aus den vertikalen Bohrlöchern freigesetzt werden (Segmente sind deaktiviert), in Variante 2 aber eine Freisetzung entsprechend der geringen Permeabilität der Verschlüsse möglich ist. Die RGI für die Variante 1 sind vergleichbar groß wie diejenigen des What-if-Rechenfalls „keine Brennelemente“, da in beiden Fällen nur Radionuklide freigesetzt werden, die nicht aus Brennelementen stammen.



**Abb. 4.43** RGI im What-if-Rechenfall „keine Brennelemente“ der Streckenlagerung im Vergleich zur vertikalen Bohrlochlagerung: Variante 1 (gestrichelt), Variante 2 (gepunktet)

In Abbildung 4.44 ist der zeitliche Verlauf des Lösungszuflusses in das Grubengebäude anhand der Lösungspegel in den Segmenten zu erkennen. Die Kurven für den Basisfall der Streckenlagerung sind durchgezogen, die Kurven für die beiden Varianten der vertikalen Bohrlochlagerung (jeweils mit Versagen der Verschlüsse) gestrichelt, bzw. gepunktet. Die Kurvenverläufe für die beiden Varianten sind gleich und zeitlich verzögert gegenüber dem Basisfall, für den Infrastrukturbereich sind alle Kurven gleich. Die zeitliche Verzögerung in den Querschlügen ergibt sich aus dem unterschiedlichen Verhalten der Einlagerungsorte: bei der Streckenlagerung (Basisfall) konvergiert die Strecke und nimmt zu späten Zeiten nur noch wenig Lösung auf, so dass die Querschlüge davor schneller mit Lösung gefüllt werden. Bei der vertikalen Bohrlochlagerung sind die Bohrlöcher langfristig offen und nehmen große Lösungsmengen auf, so dass die Querschlüge vergleichsweise langsam mit Lösung gefüllt werden.



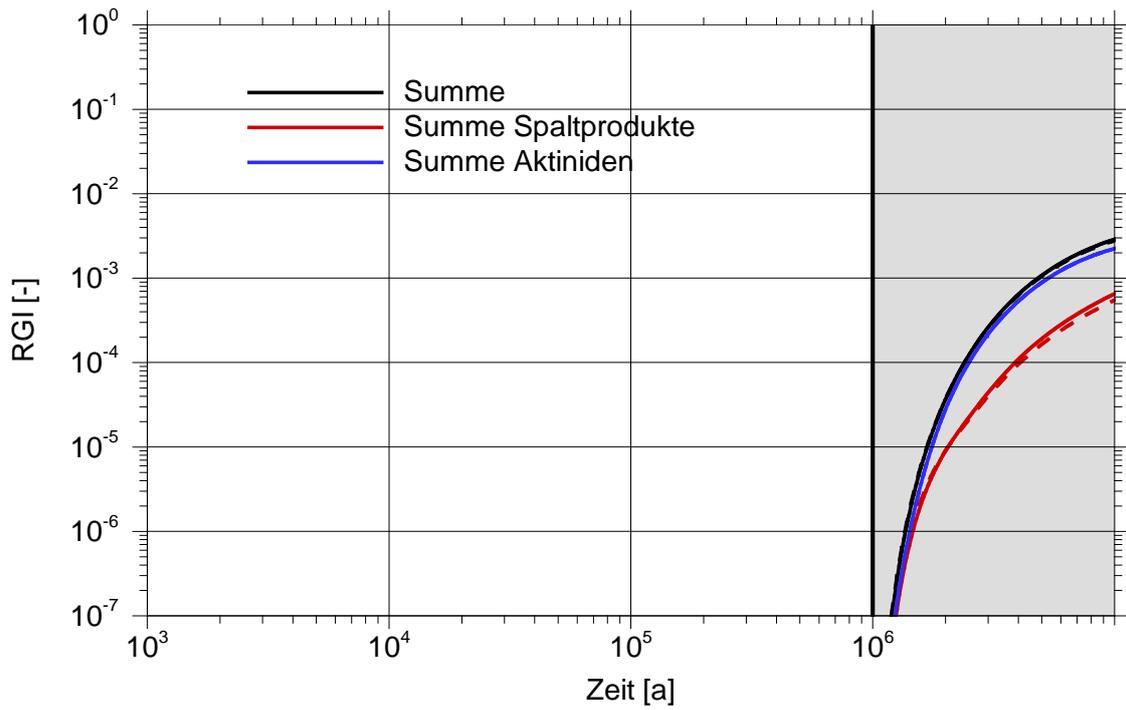
**Abb. 4.44** Lösungspegel im Basisfall im Vergleich zur vertikalen Bohrlochlagerung: Variante 1 (gestrichelt), Variante 2 (gepunktet)

### 4.3.3 What-if-Rechenfälle für die vertikale Bohrlochlagerung

Wie in den Kapiteln 3.4.7 und 3.5.4 erläutert, wurden zum besseren Verständnis des Systemverhaltens für die vertikale Bohrlochlagerung zwei What-if-Rechenfälle untersucht:

1. Beschleunigtes Versagen der Behälter
2. Beschleunigte Mobilisierung aus Brennelement-Behältern

In Abbildung 4.45 sind die Ergebnisse für das Referenzszenarium mit Versagen der Bohrlochverschlüsse und die beiden What-if-Rechenfälle dargestellt. Die Kurven für das Referenzszenarium und den What-if-Rechenfall für die beschleunigte Mobilisierung sind identisch. Für den What-if-Rechenfall mit beschleunigtem Behälterversagen ergeben sich geringfügig kleinere RGI-Werte. Die Ergebnisse zeigen, dass sowohl der Einfluss der Behälterlebensdauer als auch der Einfluss der Mobilisierung aus der Brennstoffmatrix auf die langzeitigen radiologischen Konsequenzen eines Nuklidaustrages aus dem Endlager nur gering sind.



**Abb. 4.45** Vertikale Bohrlochlagerung. RGI in der Variante des Referenzszenariums mit Versagen des Verschlusses im Vergleich zum What-if-Fall mit beschleunigtem Behälterversagen (gestrichelt) sowie dem What-if-Fall mit beschleunigter Mobilisierung (gepunktet)

## **5 Zusammenfassung, Diskussion und Bewertung der Ergebnisse**

Für Endlagerkonzepte in flach lagernden Salzformationen wurden Modellrechnungen zur Bewertung des sicheren Einschusses von Radionukliden im ewG durchgeführt. Die Modellrechnungen basieren auf ähnlichen Untersuchungen von Endlagerkonzepten in steil lagernden Salzformationen (Salzstöcke), die in den Ergebnisberichten der Vorhaben ISIBEL und VSG vorgestellt wurden. Durch die Ähnlichkeit der Modellrechnungen ist ein Vergleich der Ergebnisse für steile und flache Lagerung möglich.

Die Modellrechnungen und die Bewertung der Ergebnisse basieren auf den Sicherheitsanforderungen des BMU sowie dem Sicherheits- und Nachweiskonzept und den Endlagerkonzepten, die im Vorhaben entwickelt worden sind. Die Ergebnisse werden mit Hilfe des radiologischen Geringfügigkeitsindex (RGI) bewertet, der eine relative, dimensionslose Größe ist und auf Dosiskonversionsfaktoren zurückgreift, die für ein etabliertes Biosphärenmodell ermittelt wurden.

Es wurde keine detaillierte Szenarienentwicklung auf Basis eines FEP-Katalogs durchgeführt. Die untersuchten Rechenfälle wurden stattdessen auf Grund der Erfahrungen der Vorhaben ISIBEL und VSG aus den dort betrachteten wahrscheinlichen und weniger wahrscheinlichen Endlagerentwicklungen abgeleitet. Zudem wurden What-if-Fälle betrachtet, um Aussagen zur Wirksamkeit der Barrieren und zur Robustheit des Systems treffen zu können. Als Referenzsystem wurde die reine Streckenlagerung in flach lagernden Salzformationen ausgewählt; die Ergebnisse für die anderen Systeme (horizontale und vertikale Bohrlochlagerung in flach lagernden Salzformationen bzw. in Salzkissen) wurden mit den Ergebnissen für dieses Referenzsystem verglichen. Für das Endlagersystem mit direkt endgelagerten Transportbehältern in Salzkissen wurden keine Modellrechnungen durchgeführt, weil angenommen wurde, dass sich die Ergebnisse aufgrund der ähnlichen Einlagerungstechnik und ähnlicher Abfallinventare wenig von denen der reinen Streckenlagerung unterscheiden.

Für das Referenzsystem sind alle Eingangsdaten tabellarisch zusammengestellt; für die übrigen Systeme und Varianten sind die Abweichungen zum Referenzsystem jeweils angegeben.

Für das Referenzsystem werden die Ergebnisse umfassend dargestellt. Im Basisfall der deterministischen Rechnungen ergeben sich RGI-Werte, die auch im Maximum

mindestens 2 Größenordnungen unter dem Grenzkriterium ( $RGI=1$ ) liegen. Das Systemverhalten wird anhand der berechneten Auffüllphase des Grubengebäudes erläutert. Ein Vergleich mit den Ergebnissen aus den Vorhaben ISIBEL und VSG zeigt, dass die berechneten Konsequenzen ähnlich, aber tendenziell etwas geringer sind. Die geringeren RGI-Werte können teilweise durch andere Annahmen zum Feuchtegehalt und zu den Abmessungen der Richtstrecken erklärt werden: in ISIBEL/VSG wurden ein etwas höherer Feuchtegehalt des Salzgrusversatzes und feuchte Bereiche entlang der gesamten Richtstrecken angenommen. In der vorliegenden Untersuchung wurde angenommen, dass der Versatz nur in einem kleinen Stück der Richtstrecken – den Zugangsstrecken zwischen dem Infrastruktur- und dem Einlagerungsbereich – angefeuchtet wird, dass die Feuchtigkeitsmenge etwas geringer ist und dass diese feuchten Bereiche durch Verschlüsse eingegrenzt werden. Weiterhin sind die angenommenen Längen der Richtstrecken in KOSINA deutlich größer als in der VSG.

Durch Betrachtung von Varianten und durch probabilistische Rechnungen wurde das Systemverhalten detaillierter untersucht. Als wesentliche Einflussgrößen wurden dabei die Diffusion und die Konvergenz identifiziert. Advektion spielt in den betrachteten Systemen eine untergeordnete Rolle, weil Lösungen erst sehr spät in die Grubenbaue eindringen und dadurch erst sehr spät einen Gegendruck aufbauen und der Versatz in den Grubenbauen durch Gebirgskonvergenz langfristig bis zu sehr geringen Porositäten kompaktiert. Es wird wie im Vorhaben ISIBEL angenommen, dass es auch bei diesen geringen Porositäten verbundene Porenräume gibt, durch die sich die Radionuklide diffusiv ausbreiten können. Diese Annahme steht im Widerspruch zur Annahme im Vorhaben VSG, dass Diffusion dann nicht mehr möglich ist. Daher sind die Ergebnisse unterschiedlich.

Die Modellrechnungen für das Referenzsystem wurden auch verwendet, um vor der endgültigen Festlegung einige Designparameter des Endlagerkonzepts zu untersuchen. Beispielsweise wurde untersucht, welchen Einfluss die Versatzfeuchte in den Richtstrecken und die Verschlusslängen haben. Die Ergebnisse wurden bei der Festlegung des Endlagerkonzepts berücksichtigt.

Die Modellergebnisse wurden ergänzt durch What-if-Rechnungen, bei denen Parameter außerhalb ihres zu erwartenden Wertebereichs untersucht wurden, z. B. ein sofortiges Versagen aller Verschlussbauwerke unterstellt wurde. Mit diesen What-if-Fällen lässt sich die Bandbreite des Systemverhaltens eingrenzen. Die berechneten Ergebnisse entsprechen den Erwartungen.

Für die weiteren Endlagersysteme werden einige ausgewählte Ergebnisse gezeigt und mit den Ergebnissen des Referenzsystems verglichen. Wenn unterstellt wird, dass die Verrohrung und die Verschlüsse der Bohrlöcher nach einer bestimmten Zeit ausfallen, ergeben sich vergleichbare RGI-Werte wie bei der Streckenlagerung. Wenn gezeigt werden kann, dass die Verrohrung und die Verschlüsse langfristig dicht sind, sind die berechneten Konsequenzen viel geringer als bei der Streckenlagerung, weil keine Radionuklide mehr aus den Bohrlöchern freigesetzt werden können und eine Freisetzung nur aus den übrigen Abfällen, die nicht in Bohrlöchern gelagert sind, möglich ist.

Mit dem derzeit verfügbaren Instrumentarium für Modellrechnungen zur Bewertung der radiologischen Konsequenzen (Programmpaket RepoTREND inklusive Modulen für probabilistische Rechnungen) lassen sich die Endlagerkonzepte für flach lagernde Salzformationen bewerten. Entwicklungsbedarf besteht bei der Modellierung der verrohrten horizontalen und vertikalen Bohrlöcher. Hierfür ist auch zu klären, wie das Langzeitverhalten anzusetzen ist. Für ausgediente Brennelemente aus Forschungsreaktoren sind gegebenenfalls Mobilisierungsmodelle abzuleiten oder abzusichern. Für ausgediente HTR-Brennelemente ist das Mobilisierungsmodell zu überprüfen. Die Gasbildung, der Gastransport und ggf. die Freisetzung von Radionukliden auf dem Gaspfad sind weitere offene Punkte. Hierfür laufen derzeit Entwicklungsarbeiten für das Programmpaket RepoTREND (Modellierung des 2-Phasen-Flusses).

Der Systemzustand nach Abschluss der Kompaktion von Salzgrus ist experimentell schwer zugänglich und die Ergebnisse der Experimente und gebirgsmechanischen Modellrechnungen sind nicht eindeutig zu interpretieren. Daher wurde (konservativ) in der vorliegenden Untersuchung angenommen, dass es auch nach Abschluss der Kompaktion einen verbundenen Porenraum gibt, durch den Radionuklide diffundieren können. Wenn belegt werden könnte, dass es solche verbundenen Porenräume nicht gibt, wäre kein Radionuklidtransport möglich und alle in diesem Bericht gezeigten RGI-Werte wären nahe Null.



## Literaturverzeichnis

- /BEC 16/ Becker, D.: RepoSTAR – Ein Codepaket zur Steuerung und Auswertung statistischer Rechenläufe mit dem Programmpaket RepoTREND. GRS-411, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, ISBN 978-3-944161-93-8, BMWi-FKZ 02E10367, Braunschweig, 2016.
- /BER 15/ Bertrams, N., Bollingerfehr, W., Dörr, S., Filbert, W., Simo, E., Fahland, S., Hammer, J., Heusermann, S., Kühnlenz, T., Mrugalla, S., Reinhold K., Buhmann, D., Kindlein, J., Mönig, J., Wolf, J., Minkley, W., Popp, T.: Konzeptentwicklung für ein generisches Endlager für wärmeentwickelnde Abfälle in flach lagernden Salzschieben in Deutschland sowie Entwicklung und Überprüfung eines Sicherheits- und Nachweiskonzeptes KOSINA – Zwischenbericht Dezember 2015. DBE Tec, BGR, GRS und IfG, TEC-37-2015-Z, BMWi-FKZ 02E11395/02E11405, Zwischenbericht, Peine, 2015.
- /BER 18/ Bertrams, N., Bollingerfehr, W., Filbert, W., Prignitz, S., Simo, E.: Technische Konzepte für ein Endlager in flach lagernden Salzformationen – Ergebnisse aus dem Vorhaben KOSINA. DBE Technology GmbH (DBE Tec), TEC-12-2017-AP, BMWi-FKZ 02E11395/02E11405, Peine, 2018.
- /BEU 12/ Beuth, T., Bracke, G., Buhmann, D., Dresbach, C., Keller, S., Krone, J., Lommerzheim, A., Mönig, J., Mrugalla, S., Rübel, A., Wolf, J.: Szenari-entwicklung: Methodik und Anwendung. Bericht zum Arbeitspaket 8, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-284, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, ISBN 978-3-939355-60-1, Köln, 2012.
- /BIE 09/ Bienvenu, P., Ferreux, L., Andreatti, G., Arnal, N., Lépy, M.-C., Bé, M.-M.: Determination of  $^{126}\text{Sn}$  half-life from ICP-MS and gamma spectrometry measurements. Radiochimica Acta 97, 687-694, 2009.
- /BMI 83/ Sicherheitskriterien für die Endlagerung radioaktiver Abfälle in einem Bergwerk, RdSchr. d. BMI v. 20.4.1983 – RS – AGK 3 – 515 790/2.

- /BMU 10/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle. Bonn, Stand: 30. September 2010.
- /BMU 12/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Allgemeine Verwaltungsvorschrift zu § 47 der Strahlenschutzverordnung: Ermittlung der Strahlenexposition durch die Ableitung radioaktiver Stoffe aus kerntechnischen Anlagen oder Einrichtungen. Bundesanzeiger AT 05.09.2012 B1, Bonn, 28. August 2012.
- /BUH 08a/ Buhmann, D., Mönig, J., Wolf, J., Heusermann, S., Keller, S., Weber, J.R., Bollingerfehr, W., Filbert, W., Kreienmeyer, M., Krone, J., Tholen, M.: Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW – ISIBEL. Zusammenfassender Abschlussbericht. DBE Tec, BGR und GRS, TEC-09-2008-AB, BMWi-FKZ 02E10065 und 02E10055, Peine, 2008.
- /BUH 08b/ Buhmann, D., Mönig, J., Wolf, J.: Untersuchungen zur Ermittlung und Bewertung von Freisetzungsszenarien. Teilbericht zum Projekt ISIBEL: „Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW“. GRS-233, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, ISBN 978-3-939355-07-6, BMWi-FKZ 02E10055, Braunschweig, 2008.
- /BUH 10/ Buhmann, D., Mönig, J., Wolf, J., Keller, S., Mrugalla, S., Weber, J.R., Krone, J., Lommerzheim, A.: Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW – ISIBEL. Nachweis und Bewertung des Isolationszustandes "Sicherer Einschluss". DBE Tec, BGR und GRS, BMWi-FKZ 02E10065 und 02E10055, Peine, 2010.
- /BUH 16/ Buhmann, D., Becker, D.-A., Laggiard, E., Rübél, A., Spießl, S., Wolf, J.: Probabilistische Bewertung von Szenarien in Langzeitsicherheitsanalysen – Ergebnisse des Vorhabens ISIBEL. GRS-416, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, ISBN 978-3-944161-98-3, BMWi-FKZ 02E10719, Braunschweig, 2016.

- /FIL 14/ Filbert, W., Breustedt, M., Dörr, S., Herold, P., Lerch, C., Wolf, J., Ullmann, D., Kristek, F., Sindern, W.: Direkte Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern bis 160 Mg, DIREGT III, Abschlussbericht. DBE Technology GmbH (DBE Tec), Peine, 2014.
- /FIS 13/ Fischer-Appelt, K., Baltés, B., Buhmann, D., Larue, J., Mönig, J.: Synthesebericht für die VSG. Bericht zum Arbeitspaket 13, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-290, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, ISBN 978-3-939355-66-3, Köln, 2013.
- /GRA 12/ Graf, R.; Brammer, K.-J.; Filbert, W.: Direkte Endlagerung von Transport- und Lagerbehältern – ein umsetzbares technisches Konzept. GNS Gesellschaft für Nuklear-Service mbH und DBE Technology GmbH, Jahrestagung KTG 2012.
- /GRS 09/ Datensatz der GRS, basierend auf Angaben der Karlsruher Nuklidkarte und international veröffentlichten Daten. Dokumentiert z. B. für das Endlager Morsleben (ERAM) in GRS-A-3454 „Endlager Morsleben: Sicherheitsanalyse für das verfüllte und verschlossene Endlager mit dem Programm EMOS“, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, 2009.
- /HIR 99/ Hirsekorn, R.-P., Boese, B., Buhmann, D.: LOPOS: Programm zur Berechnung der Schadstofffreisetzung aus netzwerkartigen Grubengebäuden. GRS-157, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, ISBN 3-931995-19-4, Braunschweig, 1999.
- /KIN 18/ Kindlein, J., Buhmann, D., Mönig, J., Wolf, J.: Sicherheits- und Nachweiskonzept für ein Endlager in flach lagernden Salzformationen – Ergebnisse aus dem Vorhaben KOSINA. GRS-495, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, ISBN 978-3-946607-80-9, BMWi-FKZ 02E11405B, Braunschweig, April 2018.

- /KNA 17/ Knauth, M., Popp, T.: Vorläufige Bewertung des Kompaktionsverhaltens von Salzgrus unter den für die Bedingungen der flachen Lagerung gewählten Materialparametern. Memo, Institut für Gebirgsmechanik (IfG), Leipzig, 23.02.2017.
- /LAR 13/ Larue, J., Baltés, B., Fischer, H., Frieling, G., Kock, I., Navarro, M., Seher, H.: Radiologische Konsequenzenanalyse. Bericht zum Arbeitspaket 10, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-289, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, ISBN 978-3-939355-65-6, Köln, 2013.
- /LIU 16/ Liu, W., Völkner, E., Minkley, W., Popp, T.: Zusammenstellung der Materialparameter für THM-Modellberechnungen – Ergebnisse aus dem Vorhaben KOSINA. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), BMWi-FKZ 02E11395, Hannover, 2016.
- /LIU 18/ Liu, W., Knauth, M., Eickemeier, R., Fahland, S., Minkley, W., Popp, T.: TM- und THM-gekoppelte Modellberechnungen zur Integritätsanalyse der geologischen Barrieren in flach lagernden Salzformationen – Ergebnisse aus dem Vorhaben KOSINA. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Hannover und Institut für Gebirgsmechanik (IfG), Leipzig, BMWi-FKZ 02E11395/02E11405, Hannover, 2018.
- /MRU 11/ Mrugalla, S.: Geowissenschaftliche Langzeitprognose. Bericht zum Arbeitspaket 2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben. GRS-275, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, ISBN 978-3-939355-51-9, Köln, 2011.
- /MÜL 99/ Müller-Lyda, I., Birthler, H., Fein, E.: Ableitung von Permeabilitäts-Porositätsrelationen für Salzgrus. GRS-148, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, ISBN 3-931995-10-0, BMWi-FKZ 02E8855-2, Braunschweig, 1999.

- /PRÖ 02/ Pröhl, G., Gering, F.: Dosiskonversionsfaktoren zur Berechnung der Strahlenexposition in der Nachbetriebsphase von Endlagern nach dem Entwurf der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zu § 47 Strahlenschutzverordnung. GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, Institut für Strahlenschutz, Neuherberg, 2002.
- /REI 14/ Reiche, T. und Becker, D.-A.: Berechnung radiologischer Konsequenzen der Freisetzung radioaktiver Stoffe aus einem Endlager in die Biosphäre mit dem Programm BioTREND. GRS-345, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, ISBN 978-3-944161-25-9, BMWi-FKZ 02E10367, Braunschweig, 2014.
- /REI 16/ Reiche, T.: RepoTREND – Das Programmpaket zur integrierten Langzeitsicherheitsanalyse von Endlagersystemen. GRS-413, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, ISBN 978-3-944161-95-2, BMWi-FKZ 02E10367, Braunschweig, 2016.
- /STA 13/ Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für Wärme entwickelnde radioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz - StandAG). Bundesgesetzblatt, Teil I, Nr. 41 vom 23. Juli 2013: 2553-2564.
- /STA 17/ Gesetz zur Suche und Auswahl eines Standortes für ein Endlager für hochradioaktive Abfälle (Standortauswahlgesetz - StandAG). Bundesgesetzblatt, Teil I, Standortauswahlgesetz vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1074), zuletzt geändert durch Artikel 2 Absatz 16 des Gesetzes vom 20. Juli 2017 (BGBl. I S. 2808).
- /VÖL 17/ Völkner, E., Kühnlenz, T., Hammer, J., Gast, S.: Entwicklung generischer geologischer Modelle für flach lagernde Salzformationen – Ergebnisse aus dem Vorhaben KOSINA. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), BMWi-FKZ 02E11395, Hannover, 2017.



## Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1	Schematische Darstellung von der Entwicklung von Szenarien bis zur rechen-technischen Auswertung und Synthese der Ergebnisse /BEU 12/ .....	6
Abb. 3.1	Ablaufschema einer probabilistischen Rechnung mit RepoSTAR /BEC 16/ .....	10
Abb. 3.2	Grundriss Grubengebäude für die Streckenlagerung (nach /BER 18/, ergänzt) .....	13
Abb. 3.3	Segmentstruktur für die Streckenlagerung (LOPOS-Modell) .....	14
Abb. 3.4	Einlagerungsbohrloch und Querschlag, Schnitte (nach /BER 18/, ergänzt) .....	14
Abb. 3.5	Grundriss Grubengebäude für die horizontale Bohrlochlagerung /BER 18/ .....	15
Abb. 3.6	Segmentstruktur für die horizontale Bohrlochlagerung (LOPOS-Modell); Variante 1 (oben) und Variante 2 (unten) .....	16
Abb. 3.7	Grundriss Grubengebäude für die vertikale Bohrlochlagerung /BER 18/ .....	18
Abb. 3.8	Segmentstruktur für die vertikale Bohrlochlagerung (LOPOS-Modell); Variante 1 (oben) und Variante 2 (unten); vertikale Segmente sind gedreht dargestellt .....	19
Abb. 3.9	Temperaturstützstellen für die Streckenlagerung; nahe dem Infrastrukturbereich (oben) und weiter vom Schacht entfernt (unten) .....	39
Abb. 4.1	Summe des RGI als Funktion der Länge des Schachtverschlusses .....	56
Abb. 4.2	Zufließende Lösungsvolumina im Infrastrukturbereich als Funktion der Länge des Schachtverschlusses .....	57
Abb. 4.3	Summe des RGI als Funktion der Länge der Verschlüsse in den Zugangsstrecken .....	58
Abb. 4.4	RGI als Funktion der Versatzfeuchte in den Zugangsstrecken .....	59
Abb. 4.5	Basisfall: RGI, Summe und dosisbestimmende Radionuklide .....	60
Abb. 4.6	Basisfall: zeitliche Entwicklung der Lösungspegel im Grubengebäude ....	61
Abb. 4.7	Basisfall: Lösungsvolumina im Grubengebäude im Vergleich zu Ergebnissen aus ISIBEL-II, bzw. VSG (gestrichelt) .....	62

Abb. 4.8	Basisfall (durchgezogen): Vergleich mit ISIBEL-II, bzw. VSG (gestrichelt).....	62
Abb. 4.9	Variante des Basisfalls: RGI bei geringer Diffusion (Skala der y-Achse bis $1 \cdot 10^{-9}$ erweitert) .....	63
Abb. 4.10	Vergleich des Basisfalls mit der Variante mit geringer Diffusion (gestrichelt; Skala der y-Achse bis $1 \cdot 10^{-9}$ erweitert) .....	64
Abb. 4.11	Vergleichsfall „langsame Konvergenz“ (gestrichelt): zeitlicher Verlauf der Porosität in den Zugangs- und Richtstrecken bei unterschiedlicher Feuchte und Temperatur. Basisfall: durchgezogene Linien.....	65
Abb. 4.12	Variante des Basisfalls: RGI bei langsamer Konvergenz .....	66
Abb. 4.13	Vergleich des Basisfalls (durchgezogen) mit der Variante mit langsamer Konvergenz (gestrichelt).....	66
Abb. 4.14	Variante des Basisfalls: RGI bei kleinem ewG .....	67
Abb. 4.15	Vergleich des Basisfalls (durchgezogen) mit der Variante mit kleinem ewG (gestrichelt).....	68
Abb. 4.16	Beobachtungspunkte für die ewG-Varianten (Ausschnitt aus Abbildung 3.3) .....	68
Abb. 4.17	Rechenfälle für die Variante mit kleinem ewG: Rand des ewG an RK-V1 (durchgezogen), RU-V1 (gepunktet), bzw. INFRA-RK (gestrichelt).....	69
Abb. 4.18	RGI bei Variation der räumlichen Diskretisierung. Durchgezogen: Basisfall (Blocklänge 20 m); gestrichelt: keine räumliche Diskretisierung; gepunktet: feinere räumliche Diskretisierung (5 m Blocklänge).....	70
Abb. 4.19	RGI im What-if-Rechenfall ohne Versagen der Verschlüsse (gestrichelt) im Vergleich zum Basisfall.....	71
Abb. 4.20	Volumina im Infrastrukturbereich im What-if-Rechenfall ohne Versagen der Verschlüsse (gestrichelt) im Vergleich zum Basisfall .....	72
Abb. 4.21	Lösungspegel im What-if-Rechenfall ohne Versagen der Verschlüsse (gestrichelt) im Vergleich zum Basisfall.....	72
Abb. 4.22	RGI im What-if-Rechenfall mit instantanem Versagen der Verschlüsse (gestrichelt) im Vergleich zum Basisfall .....	73

Abb. 4.23	Volumina im Infrastrukturbereich im What-if-Rechenfall mit instantanem Versagen der Verschlüsse (gestrichelt) im Vergleich zum Basisfall .....	74
Abb. 4.24	Lösungspegel im What-if-Rechenfall mit instantanem Versagen der Verschlüsse (gestrichelt) im Vergleich zum Basisfall .....	74
Abb. 4.25	RGI im What-if-Rechenfall ohne Berücksichtigung der Brennelemente der Leistungsreaktoren (gestrichelt) im Vergleich zum Basisfall .....	75
Abb. 4.26	Zeitlicher Verlauf der statistischen Kenngrößen des RGIs im Referenzfall .....	78
Abb. 4.27	Zeitlicher Verlauf der statistischen Kenngrößen des RGIs im klassischen Ansatz .....	78
Abb. 4.28	Häufigkeitsdichte der Maximalwerte des RGI im Referenzfall .....	79
Abb. 4.29	Häufigkeitsdichte der Maximalwerte des RGI im klassischen Ansatz .....	80
Abb. 4.30	Beitrag der unabhängigen Variablen zum Stichprobenmittel (CSM) für den Referenzfall .....	81
Abb. 4.31	Beitrag der unabhängigen Variablen zum Stichprobenmittel (CSM) für den klassischen Ansatz mit 2000 Realisationen .....	82
Abb. 4.32	Beitrag der unabhängigen Variablen zum Stichprobenmittel (CSM) für den klassischen Ansatz mit 1000 Realisationen .....	82
Abb. 4.33	Standardisierte Rangregressionskoeffizienten (SRRC) für den Referenzfall und den klassischen Ansatz.....	83
Abb. 4.34	Scatterplot für den Diffusionskoeffizienten; Referenzfall und klassischer Ansatz .....	84
Abb. 4.35	Scatterplot für den Endwert der Porosität in versetzten Strecken; Referenzfall und klassischer Ansatz .....	84
Abb. 4.36	Horizontale Bohrlochlagerung, Variante 1. RGI im Referenzszenarium (dichte Bohrlochverschlüsse), im Vergleich zum Szenarium mit Versagen der Verschlüsse (gestrichelt) und in der Variante der Streckenlagerung „ohne Brennelemente“ (gepunktet) .....	87
Abb. 4.37	Horizontale Bohrlochlagerung. RGI im Referenzszenarium (dichte Bohrlochverschlüsse) im Vergleich zum Szenarium mit Versagen der Verschlüsse (gestrichelt) und der Referenzvariante (Streckenlagerung; gepunktet).....	88

Abb. 4.38	Horizontale Bohrlochlagerung. RGI im Referenzszenarium (dichte Bohrlochverschlüsse) im Vergleich zum Szenarium mit Versagen der Verschlüsse ohne Konvergenz (gestrichelt) .....	89
Abb. 4.39	Horizontale Bohrlochlagerung. RGI im Referenzszenarium Variante 1 (Bohrlöcher deaktiviert) im Vergleich zur Variante 2 mit Bohrlöchern und Verschlüssen (gestrichelt) sowie der Variante „Streckenlagerung, ohne Brennelemente“ (gepunktet).....	89
Abb. 4.40	Vertikale Bohrlochlagerung, Variante 1. RGI im Referenzszenarium mit dichten Bohrlochverschlüssen, im Vergleich zum Szenarium mit Zuschalten der Bohrloch-Segmente (gestrichelt) .....	91
Abb. 4.41	Vertikale Bohrlochlagerung, Variante 2. RGI im Referenzszenarium mit dichten Bohrlochverschlüssen, im Vergleich zum Szenarium mit Versagen der Verschlüsse (gestrichelt) .....	92
Abb. 4.42	RGI im Basisfall der Streckenlagerung im Vergleich zur vertikalen Bohrlochlagerung: Variante 1 (gestrichelt), Variante 2 (gepunktet) .....	93
Abb. 4.43	RGI im What-if-Rechenfall „keine Brennelemente“ der Streckenlagerung im Vergleich zur vertikalen Bohrlochlagerung: Variante 1 (gestrichelt), Variante 2 (gepunktet).....	94
Abb. 4.44	Lösungspegel im Basisfall im Vergleich zur vertikalen Bohrlochlagerung: Variante 1 (gestrichelt), Variante 2 (gepunktet) .....	95
Abb. 4.45	Vertikale Bohrlochlagerung. RGI in der Variante des Referenzszenariums mit Versagen des Verschlusses im Vergleich zum What-if-Fall mit beschleunigtem Behälterversagen (gestrichelt) sowie dem What-if-Fall mit beschleunigter Mobilisierung (gepunktet) .....	96

## Tabellenverzeichnis

Tab. 3.1	Mobilisierungsparameter /BUH 16/ .....	33
Tab. 3.2	Daten für die Behälter der Streckenlagerung /BER 15/ .....	34
Tab. 3.3	Relative Freisetzungsraten in den Bereichen eines Brennelements /BUH 16/.....	34
Tab. 3.4	Elementspezifische Inventaranteile in den einzelnen Bereichen eines LWR-Brennelementes und Löslichkeitsgrenzen /LAR 13/ .....	34
Tab. 3.5	Anzahl der Abfälle im LOPOS-Modell pro Modell-Einlagerungsfeld; Streckenlagerung; „1“ = alle Behälter sind in diesem Feld .....	35
Tab. 3.6	Anzahl der Behälter/Abfälle für die in LOPOS modellierten Segmente bei Streckenlagerung .....	36
Tab. 3.7	Geometrische Daten der Modell-Einlagerungsfelder in LOPOS bei Streckenlagerung.....	36
Tab. 3.8	Geometrische Daten der Modellsegmente für den Infrastrukturbereich, die Schachtverschlüsse, Zugangsstrecken, Richtstrecken und Querschläge .....	37
Tab. 3.9	Globale Konvergenzparameter (schnelle Konvergenz) .....	38
Tab. 3.10	Lokale Konvergenzparameter (schnelle Konvergenz) .....	38
Tab. 3.11	Zuordnung der Temperaturstützstellen zu den Modellsegmenten für die Streckenlagerung .....	39
Tab. 3.12	Halbwertszeiten [a] der betrachteten Radionuklide /GRS 09/.....	40
Tab. 3.13	Inventare der einzelnen Abfallarten (Zeitpunkt: 2075; Beginn der Einlagerung: 2050; Beginn der Nachverschlussphase: 2080) /LAR 13/ (Gesamtinventar; bei Brennelementen umgerechnet auf das Inventar pro Behälter) .....	41
Tab. 3.14	Sonstige Parameter (Nahfeld).....	42
Tab. 3.15	Parameter für die Beziehung zwischen Porosität und Permeabilität.....	43
Tab. 3.16	Parameter für Verschlussbauwerke .....	43
Tab. 3.17	Dosiskonversionsfaktoren (DKF) in [Sv/a pro Bq/m <sup>3</sup> ] gemäß /PRÖ 02/, zitiert nach /BUH 16/ .....	45
Tab. 3.18	Parameter für Varianten und What-if-Fälle der Streckenlagerung .....	46

Tab. 3.19	Globale Konvergenzparameter (langsame Konvergenz).....	47
Tab. 3.20	Lokale Konvergenzparameter (langsame Konvergenz).....	47
Tab. 3.21	Parameter, Bandbreiten und Verteilungen für das Referenzszenarium.....	48
Tab. 3.22	Parameterverteilungen für den klassischen Ansatz mit gleichzeitiger Variation aller unabhängigen Variablen .....	50
Tab. 3.23	Anzahl der Abfälle im LOPOS-Modell pro Modell-Einlagerungsfeld; horizontale und vertikale Bohrlochlagerung; „1“ = alle Behälter sind in diesem Feld .....	51
Tab. 3.24	Anzahl der Behälter pro Abfallart für die in LOPOS modellierten Einlagerungsfelder bei horizontaler und vertikaler Bohrlochlagerung.....	51
Tab. 3.25	Daten für die Behälter der Endlagervarianten /BER 15/ .....	52

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

Schwertnergasse 1  
**50667 Köln**

Telefon +49 221 2068-0

Telefax +49 221 2068-888

Boltzmannstraße 14

**85748 Garching b. München**

Telefon +49 89 32004-0

Telefax +49 89 32004-300

Kurfürstendamm 200

**10719 Berlin**

Telefon +49 30 88589-0

Telefax +49 30 88589-111

Theodor-Heuss-Straße 4

**38122 Braunschweig**

Telefon +49 531 8012-0

Telefax +49 531 8012-200

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