

**Probabilistische
Bewertung von
Szenarien in Langzeit-
sicherheitsanalysen**
Ergebnisse des Vorhabens
ISIBEL

Probabilistische Bewertung von Szenarien in Langzeit- sicherheitsanalysen

Ergebnisse des Vorhabens
ISIBEL

Dieter Buhmann
Dirk-Alexander Becker
Eduardo Laggiard
André Rübél
Sabine Spießl
Jens Wolf

Juli 2016

Anmerkung:

Die diesem Bericht zugrunde liegenden Arbeiten wurden im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) über den Projektträger Karlsruhe, Wassertechnologie und Entsorgung (PTKA-WTE), unter dem Förderkennzeichen 02E10719 durchgeführt.

Die Arbeiten wurden von der GRS ausgeführt. 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.

GRS - 416
ISBN 978-3-944161-98-3

Deskriptoren:

Endlagerung, Radioaktive Abfälle, Radionuklidtransport, Safety Case, Salz, Sicherheitsanforderungen

Vorwort

Der vorliegende Bericht stellt die Ergebnisse der Umsetzung von Szenarien in Rechenfälle zusammen, die im Rahmen des Vorhabens ISIBEL-II (FKZ: 02E10719) durchgeführt wurden. Im Rahmen des Vorhabens ISIBEL-I (FKZ: 02E10055) wurde bereits das Instrumentarium zur deterministischen Bewertung überprüft; die hier beschriebenen Arbeiten befassen sich mit der Rolle probabilistischer Untersuchungen im Rahmen von Langzeitsicherheitsanalysen und der Überprüfung der entsprechenden Werkzeuge. Ausgangspunkt der Arbeiten ist die Frage der Umsetzung von Szenarien in Rechenfälle für die radiologische Konsequenzenanalyse gemäß den Sicherheitsanforderungen aus dem Jahr 2010. Die im Vorhaben „Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben“ (VSG) entwickelten Szenarien wurden als Basis für die vorliegende Untersuchung verwendet. Der hier verfolgte Weg bei der Umsetzung der Szenarien orientiert sich deshalb an dem Vorgehen der Szenarientwicklung, die in der VSG durchgeführt wurde: Hierbei werden die Szenarien auf der Basis von FEP in Wahrscheinlichkeitsklassen eingeteilt, bevor sie in Rechenfälle umgesetzt werden. Die Parametrisierung erfolgt nach der Ableitung der Szenarien über die Festlegung einer Ausprägung für jeden einzelnen Parameter. Die Festlegung der Ausprägung ist mathematisch nicht eindeutig und erfolgt mit Hilfe von Expertenwissen. Jedes Szenarium wird mittels eines probabilistischen Rechenlaufs dargestellt. Dieses Vorgehen weicht von dem Vorgehen in früheren Sicherheitsanalysen ab: Hier wurde ein „globaler“ probabilistischer Rechenfall verwendet, für dessen Parametrisierung für jeden Parameter eine Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion erforderlich ist.

Beide Verfahren werden im Rahmen der in diesem Bericht beschriebenen Arbeiten verglichen, wobei der Schwerpunkt auf der Umsetzung der oben beschriebenen Methodik lag. Für die globalen probabilistischen Analysen gibt es bereits zahlreiche Anwendungsbeispiele. Welcher Ansatz letztlich zum Einsatz kommt, hängt auch von der zukünftigen Ausgestaltung der regulatorischen Vorgaben ab.

Unabhängig von der Methode zeigen die Untersuchungen die Notwendigkeit des Einsatzes deterministischer und probabilistischer Rechenfälle in zukünftigen Sicherheitsanalysen. Nur durch eine geeignete Kombination ist eine Darstellung sowohl des erwarteten Verhaltens des Systems als auch von Ungewissheiten und der Robustheit des Systems möglich. Dabei ist sowohl bei der Umsetzung deterministischer Rechenfälle (Festlegung von Best-Estimate-Werte) als auch probabilistischer Rechenfälle (Festlegung von Verteilungsfunktionen / Ausprägungen) der Rückgriff auf Expertenwis-

sen unumgänglich. Für eine nachvollziehbare Festlegung von Best-Estimate-Werten oder Verteilungsfunktionen ist eine systematische Analyse von dokumentiertem Expertenwissen erforderlich, für die es bislang allerdings keine eindeutige Vorgehensanweisung gibt. In diesem Punkt besteht noch ein hoher FuE-Bedarf.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Szenarien und Rechenfälle	7
2.1	Referenzszenarium.....	7
2.2	Alternativszenarien	12
2.2.1	Alternative Betrachtungen zu spezifischen Annahmen	12
2.2.2	Weniger wahrscheinliche Ausprägungen der Initial-FEP.....	13
2.2.3	Weniger wahrscheinliche Ausprägung der Radionuklidmobilisierung und des Radionuklidtransportes.....	13
2.2.4	Alternativszenarien aus weniger wahrscheinlichen FEP	14
2.3	Unwahrscheinliche Entwicklungen	15
2.4	What-if-Fälle	17
3	Umsetzung der Szenarien in Rechenfälle	19
3.1	Umsetzung des Referenzszenariums	22
3.1.1	Deterministische Daten für den Basisfall.....	26
3.1.1.1	Nahfeld	26
3.1.1.2	Biosphäre	40
3.1.2	Probabilistische Daten für den Referenzfall	42
3.2	Umsetzung der Alternativszenarien	45
3.2.1	Alternative Betrachtungen zu spezifischen Annahmen	47
3.2.2	Weniger wahrscheinliche Ausprägungen der Initial-FEP.....	48
3.2.3	Weniger wahrscheinliche Ausprägung der Radionuklidmobilisierung und des Radionuklidtransportes.....	51
3.2.4	Weniger wahrscheinliche FEP	51
3.3	What-if-Rechenfälle	53
3.4	Klassischer Ansatz	54
3.5	Zusammenfassung	55
4	Ergebnisse	59
4.1	Referenzszenarium.....	59
4.1.1	Basisfall der deterministischen Rechnungen.....	60

4.1.1.1	Schnelle Konvergenz.....	69
4.1.1.2	Einfluss der Ortsdiskretisierung	70
4.1.1.3	Einfluss des Diffusionskoeffizienten.....	73
4.1.1.4	Einfluss der Größe des ewG.....	73
4.1.1.5	Einfluss des Endlagerkonzepts: Längere Richtstrecke im Osten.....	74
4.1.2	Referenzfall der probabilistischen Rechnungen	76
4.1.2.1	Feine Ortsdiskretisierung.....	79
4.1.2.2	Länge der Richtstrecke.....	81
4.1.2.3	Geänderte Diskretisierung der verlängerten Richtstrecke	83
4.1.2.4	Verkleinerung des ewG.....	85
4.1.2.5	Schnelle Konvergenz.....	88
4.1.3	Sensitivitätsanalyse	90
4.1.3.1	Referenzfall	90
4.1.3.2	Variante mit feiner Ortsdiskretisierung	93
4.2	Alternativszenarien	96
4.2.1	Frühes Versagen des Schachtverschlusses	96
4.2.2	Frühes Versagen des Streckenverschlusses	98
4.2.3	Größeres Anfangs-Lösungsvolumen im Infrastrukturbereich.....	100
4.3	What-if-Rechenfälle	102
4.3.1	Einhüllende der untersuchten Alternativszenarien	102
4.3.2	Geringerer Wert des Diffusionskoeffizienten.....	105
4.3.3	Gemeinsames frühes Versagen von Schacht- und Streckenverschluss.	107
4.4	Klassischer Ansatz	109
4.5	Vergleich der Ergebnisse.....	112
5	Bewertung der Ergebnisse	117
5.1	Umsetzung von Szenarien in probabilistische Rechenfälle	118
5.2	Ergebnisse der Konsequenzenanalyse.....	121
5.3	Instrumentarium der Langzeitsicherheitsanalyse	123
6	Zusammenfassung	127
7	Literatur.....	133

8	Abbildungsverzeichnis.....	137
9	Tabellenverzeichnis.....	143

1 Einleitung

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 10/¹ *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 Unsicherheits²- 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 eine begrenzte Anzahl schlüssiger Zukunftsbilder (Szenarien) entworfen, die für eine

¹ Im folgenden Text als „Sicherheitsanforderungen“ abgekürzt. Kursiv gesetzte Passagen sind den Sicherheitsanforderungen entnommen. Hervorhebungen in Fettdruck sind von den Autoren.

² 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.

zuverlässige Beurteilung der Sicherheit nach Stilllegung des Endlagers relevant sind. Dieses Vorgehen wird auch von den Sicherheitsanforderungen gefordert:

Zum Nachweis der Langzeitsicherheit ist vor jeder wesentlichen Festlegung gemäß Kapitel 5.1 eine umfassende, standortspezifische Sicherheitsanalyse und Sicherheitsbewertung, die einen Zeitraum von einer Million Jahre umfasst, vorzunehmen. Sie umfasst alle Informationen, Analysen und Argumente, die die Langzeitsicherheit des Endlagers belegen, und hat darzulegen, wodurch das Vertrauen in diese Bewertung begründet ist. Diese Bewertung und deren Dokumentation müssen insbesondere folgende Punkte umfassen:

(...)

Die umfassende Identifizierung und Analyse sicherheitsrelevanter Szenarien und ihre Einordnung in die Wahrscheinlichkeitsklassen.

(...)

Weitere Details zur Identifizierung und Analyse werden in den Sicherheitsanforderungen nicht gegeben, die Forderung nach Einteilung der Szenarien in Wahrscheinlichkeitsklassen spielt allerdings eine große Rolle im weiteren Nachweisverfahren, da anhand dieser Einteilung die Einhaltung der radiologischen Kriterien erfolgen muss:

*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.

In den Sicherheitsanforderungen werden die Begriffe „Entwicklung“ und „Szenarium“ nicht eindeutig voneinander abgegrenzt. Um Verwechslungen zu vermeiden, wird in diesem Bericht nur dann von Szenarien gesprochen, wenn von wahrscheinlichen oder weniger wahrscheinlichen Entwicklungen gesprochen wird, die zur radiologischen Konsequenzenanalyse überführt werden (Abbildung 1.1).

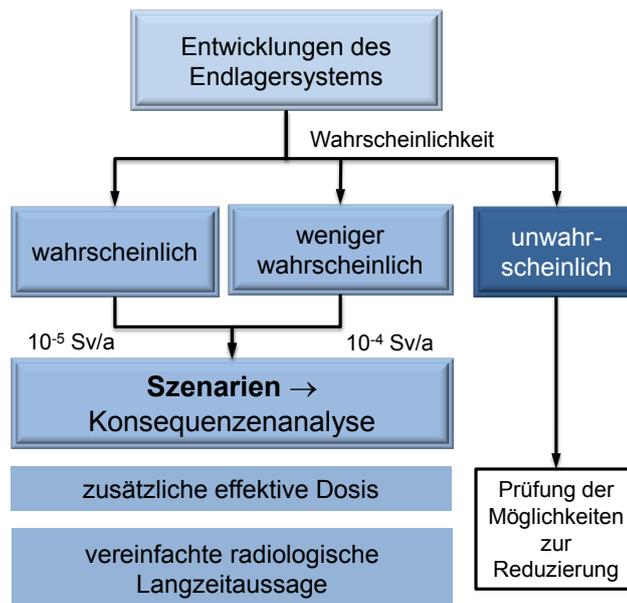


Abb. 1.1 Entwicklungen und Szenarien sowie deren Bedeutung im Langzeitsicherheitsnachweis

Im Vorhaben „Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben (VSG)“ /FIS 13/, wurde eine Reihe aus naturwissenschaftlicher Sicht plausibler Entwicklungsmöglichkeiten für den Standort Gorleben abgeleitet /BEU 12/. Dabei wurden die zu betrachtenden Szenarien in ein Referenzszenarium und mehrere Alternativszenarien

aufgeteilt. Unwahrscheinliche Entwicklungen wurden aus der Szenarienanalyse ausgeschlossen und nicht weiter analysiert.

In diesem Bericht werden Untersuchungen beschrieben, in denen das sicherheitsanalytische Instrumentarium hinsichtlich seiner Anwendbarkeit für eine Konsequenzenanalyse für Szenarien getestet wird. Dabei wurden wie in der VSG wahrscheinliche und weniger wahrscheinliche Entwicklungen des Standorts betrachtet.

Die Szenarien bilden die Grundlage für die Konsequenzenanalyse. Zur Durchführung der Analyse müssen **Rechenfälle** definiert werden, die jeweils modellmäßige Abstraktionen der Szenarien mit definierten Parameterwerten, Parameterbandbreiten oder Kenngrößen zu den statistischen Verteilungen der Parameterwerte darstellen. Zur numerischen Analyse der einzelnen Szenarien werden im Regelfall mehrere Rechenfälle definiert. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich die Vielzahl der zu betrachtenden Prozesse in einem Szenarium oft nicht vollständig mit nur einer Rechnung abbilden bzw. behandeln lässt. Es ist aber auch vorstellbar, dass ein abdeckend definierter Rechenfall dazu geeignet ist, die Auswirkungen von zwei oder mehr Szenarien zu bewerten. In jedem Fall ist die Anwendbarkeit der Rechenfälle für die jeweiligen Szenarien aufzuzeigen, und sicherzustellen, dass die für ein Szenarium definierten Rechenfälle in ihrer Gesamtheit eine umfassende Bewertung aller sicherheitlichen Fragestellungen zulassen /BEU 12/. Abbildung 1.2 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.

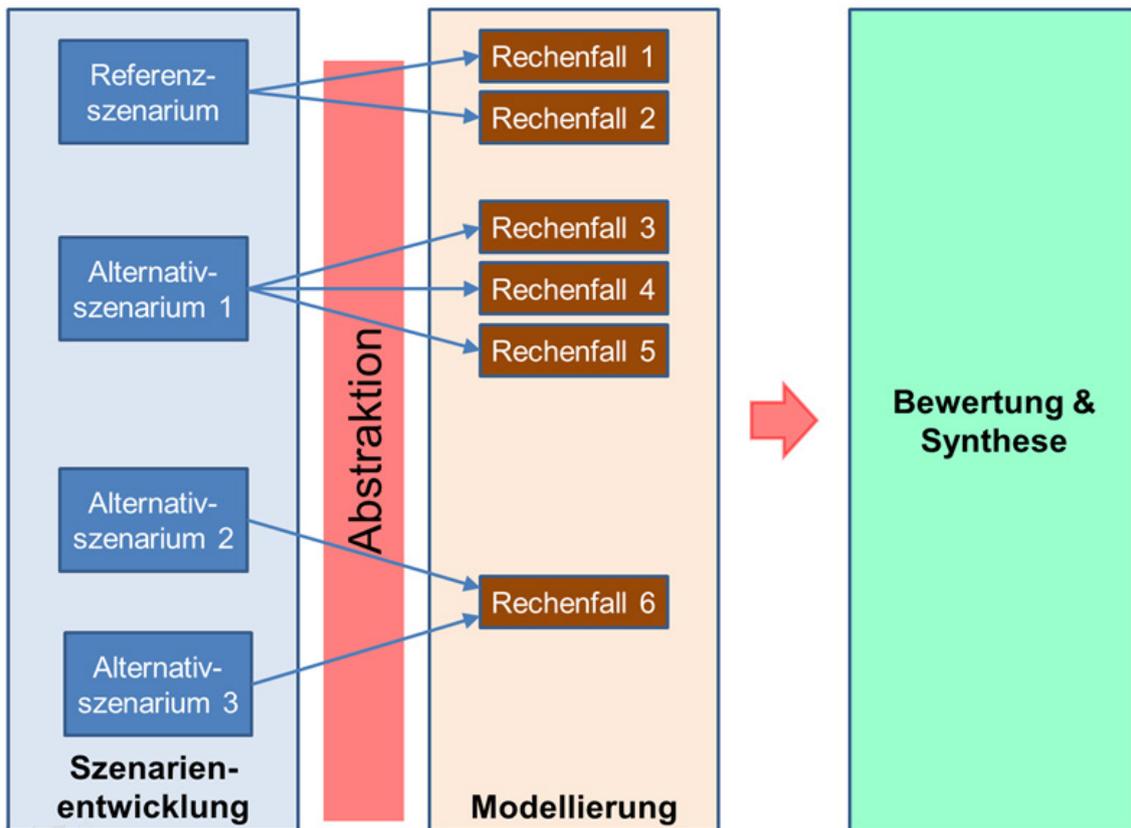


Abb. 1.2 Schematische Darstellung von der Entwicklung von Szenarien bis zur rechentechnischen Auswertung und Synthese der Ergebnisse /BEU 12/

Im Vorhaben ISIBEL wurden deterministische Analysen zu den radiologischen Konsequenzen einzelner Entwicklungsmöglichkeiten des Endlagersystems durchgeführt /BUH 08/. Diese basierten auf Entwicklungen des Endlagersystems, die speziell für diese Analysen abgeleitet, aber nicht Szenarienklassen mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit zugeordnet wurden. Im vorliegenden Bericht werden nun die in der VSG abgeleiteten Szenarien zugrunde gelegt und mit deterministischen und probabilistischen Werkzeugen untersucht. Ausgangspunkt der Arbeiten ist die Frage der **Umsetzung der in der VSG abgeleiteten Szenarien in Rechenfälle für die radiologische Konsequenzenanalyse gemäß den Sicherheitsanforderungen**. Dabei kann gezeigt werden, dass die Forderungen der Sicherheitsanforderungen

1. nach einer Einteilung der Entwicklungen in Wahrscheinlichkeitsklassen sowie
2. nach einer Durchführung von Ungewissheits- und Sensitivitätsanalysen, um den möglichen Lösungsraum aufzuzeigen sowie den Einfluss der Ungewissheiten einschätzen zu können,

dazu führen, dass den probabilistischen Rechnungen in der Nachweisführung eine sehr große Bedeutung zukommt. Sie sind ein unverzichtbares Werkzeug bei der Umsetzung von Szenarien in Rechenfälle.

Die zugrunde gelegten Szenarien wurden konzeptionell und numerisch in Modelle für eine Langzeitsicherheitsanalyse umgesetzt. Die Betrachtung der Prozesse erfolgt in gleicher Weise, wie in der VSG und in den vorhergehenden Analysen im Vorhaben ISIBEL. Einige numerische Modelle wurden angepasst, um die probabilistischen Analysen im erforderlichen Umfang durchführen zu können. Die Durchführung der Modellrechnungen zu den Szenarien erfolgt mit den angepassten und den vorhandenen Modellen. Anhand der Ergebnisse wird geprüft, ob die Modelle zur Nachbildung aller identifizierten Prozesse, die für den Nachweis der Langzeitsicherheit für die entwickelten Szenarien betrachtet werden müssen, vollständig vorhanden sind.

In Kapitel 2 werden die im Vorhaben VSG abgeleiteten Szenarien zusammengestellt und es wird auf die Auswahl der Rechenfälle für die weiteren Arbeiten eingegangen. In Kapitel 3 wird die Umsetzung der Szenarien in Rechenfälle erläutert und die Modellparameter werden für alle Rechnungen zu den Szenarien und What-if-Fällen zusammengestellt. Dabei werden auch die Bandbreiten und Verteilungsfunktionen der Parameter für die probabilistischen Rechnungen angegeben. In Kapitel 4 sind die Ergebnisse aller Modellrechnungen zusammengestellt. Eine Bewertung der Ergebnisse liefert Kapitel 5. Eine Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse erfolgt in Kapitel 6.

2 Szenarien und Rechenfälle

Die im Vorhaben VSG entwickelten Szenarien werden im Folgenden zusammengestellt und für die weiteren Berechnungen begründet ausgewählt. Es wird darauf eingegangen, wie die Szenarien in Rechenfälle für die Modellrechnungen umgesetzt werden können. Analysiert wird nur die Einlagerungsvariante AB1 mit Betrachtung der Einlagerung von Abfällen mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung in horizontalen Einlagerungskammern und der Einlagerung aller wärmeentwickelnden Abfälle in selbstabschirmenden Endlagerbehältern (POLLUX- und CASTOR-Behälter) in horizontalen Strecken /BEU 12/.

2.1 Referenzszenarium

Ein Referenzszenarium beinhaltet eine möglichst große Gesamtheit als wahrscheinlich anzusehender Entwicklungsmöglichkeiten des Endlagersystems. Als Ansatzpunkte bei der Ableitung eines Referenzszenariums dienen die wahrscheinlichen FEP, die die Funktion einer Initial-Barriere direkt beeinträchtigen können (Initial-FEP) und die FEP, die die Mobilisierung von Radionukliden aus den Abfällen und ihren Transport bestimmen. Um die Ausprägung dieser FEP zu bestimmen, werden alle auf die Initial-FEP einwirkenden FEP hinzugezogen. Dies sind solche, die gemäß FEP-Katalog entweder auslösend oder beeinflussend auf das jeweilige Initial-FEP wirken. Bei der Ableitung des Referenzszenariums für den Standort Gorleben wurden folgende spezifische Annahmen getroffen /BEU 12/:

- 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.

- Die Erkundungssohle wird derart durch Rückbaumaßnahmen gesichert, verfüllt und mit Verschlüssen abgedichtet, dass keine Wechselwirkungen mit der Einlagerungssohle zu besorgen sind.

Von den erwähnten Initial-FEP in ihren jeweiligen Ausprägungen und den spezifischen Annahmen ausgehend wurde für die Einlagerungsvariante AB1 ein Referenzszenarium abgeleitet. Es beschreibt die wahrscheinliche Entwicklung des Endlagersystems in den Teilsystemen „Nahfeld“, „Strecken und Schächte“, „Wirtsgestein“ und „Deck- und Nebengebirge“ sowie die Radionuklidmobilisierung und den Radionuklidtransport. 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. Um einen Überblick zum Referenzszenarium zu geben, sind in den Tabellen 2.1 bis 2.6 die bestimmenden FEP in den Teilsystemen und zur Radionuklidmobilisierung sowie dem Radionuklidtransport wiedergegeben.

Tab. 2.1 Orientierende zeitliche Einordnung der für das Teilsystem „Nahfeld“ zu berücksichtigenden Initial-FEP /BEU 12/

FEP-Titel	* Beeinträchtigung	keine zeitliche Beschränkung	bis ca. 10.000 a	ab ca. 10.000 a
Diapirismus		X		
Versagen eines Brennelement-Behälters	BEB	X		
Konvergenz		X		
Fluiddruck		X		
Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien		X		
Auflösung und Ausfällung		X		
Metallkorrosion	BEB	X		
Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen		X		
Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme	BEB	X		
Auflockerungszone			X	
Spannungsänderung und Spannungumlagerung	BEB	X		
Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein		X		
Thermochemische Sulfat-reduktion			X	

* Initial-Barriere im Teilsystem Nahfeld: BEB „Brennelement-Behälter“

Tab. 2.2 Orientierende zeitliche Einordnung der für das Teilsystem „Strecken und Schächte“ zu berücksichtigenden Initial-FEP /BEU 12/

FEP-Titel	* Beeinträchtigung	keine zeitliche Beschränkung	bis ca. 10.000 a	ab ca. 10.000 a
Erdbeben	SchV, StrV	X		
Diapirismus	SchV, StrV	X		
Glaziale Rinnenbildung	SchV			X
Alteration von Strecken- und Schachtverschlüssen	SchV, StrV	X		
Konvergenz	SchV, StrV	X		
Fluiddruck	SchV, StrV	X		
Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien	SchV, StrV	X		
Lageverschiebung des Schachtverschlusses	SchV	X		
Quellen des Bentonits	SchV	X		
Auflösung und Ausfällung	SchV, StrV	X		
Metallkorrosion		X		
Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen	SchV, StrV	X		
Auflockerungszone	SchV, StrV		X	
Spannungsänderung und Spannungumlagerung	SchV, StrV	X		
Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein		X		
Thermochemische Sulfat-reduktion			X	

* Initial-Barrieren im Teilsystem Strecken und Schächte: SchV „Schachtverschluss“, StrV „Streckenverschluss“

Tab. 2.3 Orientierende zeitliche Einordnung der für das Teilsystem „Wirtsgestein“ zu berücksichtigenden Initial-FEP /BEU 12/

FEP-Titel	* Beeinträchtigung	keine zeitliche Beschränkung	bis ca. 10.000 a	ab ca. 10.000 a
Erdbeben	WG	X		
Diapirismus	WG	X		
Subrosion	WG	X		
Bildung kryogener Klüfte	WG			X
Glaziale Rinnenbildung	WG			X
Konvergenz		X		
Fluiddruck	WG	X		
Nicht thermisch induzierte Volumenänderung von Materialien	WG	X		
Auflösung und Ausfällung	WG	X		
Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen		X		
Störungen und Klüfte im Wirtsgestein	WG	X		
Spannungsänderung und Spannungsumlagerung	WG	X		
Fluidvorkommen im Wirtsgestein	WG	X		
Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein	WG	X		
Thermochemische Sulfat-reduktion	WG		X	
Druckgetriebene Infiltration von Fluiden in das Salzgestein	WG	X		

* Initial-Barriere im Teilsystem Wirtsgestein: WG „Wirtsgestein“

Tab. 2.4 Orientierende zeitliche Einordnung der für das Teilsystem „Deck- und Nebengebirge“ zu berücksichtigenden Initial-FEP /BEU 12/

FEP-Titel	Beeinträchtigung	keine zeitliche Beschränkung	bis ca. 10.000 a	ab ca. 10.000 a
Fluiddruck		X		
Subrosion		X		
Glaziale Rinnenbildung				X

Tab. 2.5 Beeinflussende FEP für Radionuklidmobilisierung /BEU 12/

FEP-Titel	keine zeitliche Beschränkung	bis ca. 10.000 a	ab ca. 10.000 a
Inventar: Radionuklide	X		
Lösungen im Grubenbau	X		
Geochemisches Milieu im Grubenbau	X		
Versagen eines Brennelement-Behälters	X		
Korrosion der Brennstoffmatrix	X		
Korrosion von Glas	X		
Ausfall eines sonstigen Endlagerbehälters	X		
Metallkorrosion	X		
Materialversprödung durch Wasserstoffaufnahme	X		
Korrosion von Materialien mit Zement- oder Sorelphasen	X		
Verhalten von graphithaltigen Materialien und Urantails	X		
Zersetzung von Organika	X		
Komplexbildung	X		

Tab. 2.6 Beeinflussende FEP für Radionuklidtransport in der flüssigen Phase und Radionuklidtransport in der Gasphase /BEU 12/

FEP-Titel	keine zeitliche Beschränkung	bis ca. 10.000 a	ab ca. 10.000 a
Radionuklidmobilisierung	X		
Radioaktiver Zerfall	X		
Advektion	X		
Mechanische Dispersion	X		
Diffusion	X		
Matrixdiffusion	X		
Sorption oder Desorption	X		
Komplexbildung	X		
Kolloide	X		

2.2 Alternativszenarien

Durch die Alternativszenarien werden Entwicklungsmöglichkeiten beschrieben, die von dem Referenzszenarium abweichen, wobei sich jedes Alternativszenarium in genau einem Aspekt (zusätzliches FEP, geänderte spezifische Annahme oder Ausprägung eines FEP) vom Referenzszenarium unterscheidet. Auf Basis des Referenzszenariums werden die Alternativszenarien nach vier verschiedenen Ansatzpunkten abgeleitet:

- aus der alternativen Betrachtung von spezifischen Annahmen (s. o.),
- aus den Initial-FEP mit einer weniger wahrscheinlichen Ausprägung,
- aus den FEP zur Radionuklidmobilisierung oder zum Radionuklidtransport, ebenfalls mit einer weniger wahrscheinlichen Ausprägung und
- aus den weniger wahrscheinlichen FEP.

In /BEU 12/ sind auf diese Weise 17 Alternativszenarien identifiziert worden. In den folgenden Kapiteln werden sie in einem kurzen Überblick vorgestellt. Ausgehend von den Alternativszenarien wird in Kapitel 3.2 diskutiert, wie daraus Rechenfälle abgeleitet werden können.

2.2.1 Alternative Betrachtungen zu spezifischen Annahmen

Aus den alternativen Betrachtungen zu den spezifischen Annahmen wurden die in Tabelle 2.7 angegebenen Alternativszenarien abgeleitet.

Tab. 2.7 Alternativszenarien aus alternativen Betrachtungen

Annahme	Kürzel	Kurzbeschreibung Alternativszenarium
Klimaentwicklung	A1a1	Veränderte Rinnenbildung: zwei Rinnen an unterschiedlichen Stellen, Erosionsleistung 300 m Lockergestein, 50 m Festgestein
	A1a2	Veränderte Rinnenbildung, Rinnenbildung nach 480.000 Jahren mit Erosionsleistung 600 m Lockergestein, 50 m Festgestein
Sicherheitsabstand	A1a3	Reduzierung um 10 m zu potentiell lösungsführenden Gesteinen
	A1a4	Reduzierung um 5 m im Bereich z2/z3
Erkundungssohle	A1a5	Beeinflussung des Spannungszustandes bzw. der Konvergenz im Einlagerungsbereich

2.2.2 Weniger wahrscheinliche Ausprägungen der Initial-FEP

Bei neun der 23 Initial-FEP führen die weniger wahrscheinlichen Ausprägungen zu zusätzlichen Szenarien, siehe die Zusammenstellung in Tabelle 2.8. Acht FEP werden von anderen Alternativszenarien und drei vom Referenzszenarium repräsentiert /BEU 12/. Bei den FEP, deren weniger wahrscheinliche Ausprägungen von einem anderen Alternativszenarium abgedeckt werden, ist das repräsentative Szenarium in sechs Fällen das „Frühe(s) Versagen eines Strecken- oder Schachtverschlusses“.

Tab. 2.8 Alternativszenarien aus weniger wahrscheinlichen Ausprägungen von Initial-FEP

Initial-FEP	Kürzel	Kurzbeschreibung Alternativszenarium
Glaziale Rinnenbildung	A1i1	Veränderte Rinnenbildung: eine Rinne mit Erosionsleistung 600 m Lockergestein, 50 m Festgestein
Versagen eines Brennelement-Behälters	A1i2	Initialer Ausfall von sechs POLLUX-10- und drei CASTOR-Behältern
Konvergenz	A1i3	Änderung der Kriechklassen
Metallkorrosion	A1i4	Hohe Gasbildungsrate, erhöhte Mobilisierung aus metallischer Abfallmatrix, erhöhte Anzahl von Behältern mit Ausfall vor 500 a
Spannungsänderung und Spannungsumlagerung	A1i5	Veränderte Temperaturausbreitung
Fluidvorkommen im Wirtsgestein	A1i6	Zutritt von 10.200 m ³ aus dem z3
Thermochemische Sulfatreduktion	A1i7	Volumenzunahme im Wirtsgestein, Änderung der Zusammensetzung
Druckgetriebene Infiltration von Fluiden in das Salzgestein	A1i8	Fluidinfiltration möglich bei $p_{\text{fluid}} < p_{\text{litho}}$
Subrosion	A1i9	200 m Subrosion in einer Million Jahren

2.2.3 Weniger wahrscheinliche Ausprägung der Radionuklidmobilisierung und des Radionuklidtransportes

Das eingelagerte Inventar der Radionuklide hat hinsichtlich des Mengengerüsts keine weniger wahrscheinliche Ausprägung über die Ungewissheiten bzw. Bandbreiten im Referenzszenarium hinaus. Allerdings ist eine weniger wahrscheinliche Ausprägung denkbar für die chemische Form, in der die Radionuklide im Abfall vorliegen. Ein Bei-

spiel hierfür ist der Anteil an gasförmigen bzw. leicht zu mobilisierenden Radionukliden. Solche weniger wahrscheinlichen Ausprägungen sind zu berücksichtigen.

Weniger wahrscheinliche Ausprägungen des FEP *Lösungen im Grubenbau* hinsichtlich der Menge sind für eine Radionuklidmobilisierung vor allem in Bezug auf die Gasbildung und den Behälterausfall durch Korrosion zu betrachten. Während der Behälterausfall eine direkte Mobilisierung zur Folge hat, können die gebildeten nicht radioaktiven Gase den Transport für die radioaktiven Gase signifikant beeinflussen.

Das geochemische Milieu ergibt sich aus den eingebrachten Materialien, den Fluiden im Grubenbau sowie den ablaufenden chemischen Prozessen. Weniger wahrscheinliche Ausprägungen können für das geochemische Milieu nicht angegeben werden, vielmehr ergibt sich die Bandbreite aus den Ungewissheiten über die Mengen, die Zusammensetzung und die Verteilung der eingebrachten Stoffe. Ein entsprechendes geochemisches Milieu könnte die Korrosion der Metall- oder Betonbehälter und der Zement-Abfallmatrix intensivieren und damit die Radionuklidmobilisierung beeinflussen.

Weniger wahrscheinliche Ausprägungen der Korrosion von Glas ergeben sich aus den weniger wahrscheinlichen Ausprägungen des geochemischen Milieus und der verfügbaren Lösungsmengen und sind daher nicht separat zu betrachten.

Bezüglich des Radionuklidtransports müssen keine weniger wahrscheinlichen Ausprägungen angenommen werden. Diese sind durch die weniger wahrscheinlichen Ausprägungen der bei der Mobilisierung genannten FEP abgedeckt.

2.2.4 Alternativszenarien aus weniger wahrscheinlichen FEP

Die Betrachtung aller weniger wahrscheinlichen FEP des FEP-Katalogs führt zu zwei Alternativszenarien, die im Rahmen von Konsequenzenanalysen zu betrachten sind, siehe Tabelle 2.9. Das erste basiert auf dem weniger wahrscheinlichen FEP *Vorzeitiges Versagen eines Schachtverschlusses* (Szenarium A1w1), das zweite auf dem weniger wahrscheinlichen FEP *Vorzeitiges Versagen eines Streckenverschlusses* (Szenarium A1w2). Die Auswirkungen des FEP *Kanalisation in Dichtelementen* werden durch diese beiden Alternativszenarien abgedeckt. Die Auswirkungen des FEP *Wegsamkeiten in Erkundungsbohrungen* werden durch das Alternativszenarium A1a3 (Reduzierung des Sicherheitsabstandes) abgedeckt.

Tab. 2.9 Alternativszenarien aus weniger wahrscheinlichen FEP

FEP	Kürzel	Kurzbeschreibung Alternativszenarium
Frühes Versagen eines Schachtverschlusses	A1w1	Schachtverschluss mit erhöhter Durchlässigkeit vor 50.000 Jahren
Frühes Versagen eines Streckenverschlusses	A1w2	Streckenverschluss mit erhöhter Durchlässigkeit vor 50.000 Jahren

2.3 Unwahrscheinliche Entwicklungen

Gemäß den Sicherheitsanforderungen sind solche Entwicklungen unwahrscheinlich, deren Eintreten am Standort selbst unter ungünstigen Annahmen nicht erwartet wird und die bei vergleichbaren Standorten oder vergleichbaren geologischen Situationen nicht beobachtet wurden. Zustände und Entwicklungen für technische Komponenten, die durch zu treffende Maßnahmen praktisch ausgeschlossen werden können sowie das gleichzeitige unabhängige Versagen von mehreren Komponenten werden den unwahrscheinlichen Entwicklungsmöglichkeiten zugeordnet.

Auch wenn in den Sicherheitsanforderungen für die unwahrscheinlichen Entwicklungen kein Wert für zumutbare Strahlenexpositionen festgelegt wird, ist dennoch *im Rahmen der Optimierung zu prüfen, ob eine Reduzierung dieser Auswirkungen mit vertretbarem Aufwand möglich ist*. In welchem Umfang unwahrscheinliche Entwicklungen im Rahmen einer solchen Optimierung untersucht werden müssen, ist offen. Die Anzahl möglicher unwahrscheinlicher Entwicklungen ist unendlich groß und es sind daher Vorgehensweisen zu entwickeln, wie die durchzuführenden Analysen eingegrenzt werden können. Eine Möglichkeit hierzu ist die Beschränkung auf Entwicklungen, die sich auf folgende Elemente stützen:

1. FEP, die bei der Szenarienanalyse zurückgestellt wurden (FEP-Screening),
2. Kombination von Alternativszenarien aus weniger wahrscheinlichen FEP,
3. Kombination von Alternativszenarien aus weniger wahrscheinlichen Ausprägungen von FEP und
4. Kombination weniger wahrscheinlicher Szenarien aus den alternativen Betrachtungen zu spezifischen Annahmen.

Zu 1.) Im FEP-Katalog der VSG /WOL 12a/, /WOL 12b/ wurden alle FEP, die nicht wahrscheinlich oder weniger wahrscheinlich sind, als „nicht zu betrachten“ eingestuft. Tabelle 2.10 gibt eine Übersicht über diese FEP. Dabei wurde dieser Begriff gewählt, um anzuzeigen, dass alle diese FEP gemäß der dort abgeleiteten Methodik /BEU 12/ nicht durch Szenarien beschrieben werden. Eine weitere Betrachtung dieser FEP (und damit auch möglicher unwahrscheinlicher Entwicklungen) erfolgte nicht. Die quantitative Analyse der Konsequenzen entsprechender Szenarien ist für einige dieser FEP mit vergleichsweise großem Aufwand verbunden.

Tab. 2.10 FEP mit Eintrittswahrscheinlichkeit „nicht zu betrachten“ /WOL 12a/

FEP-Nr.	FEP-Name
1.1.12.01	Sicherheitsrelevante, unplanmäßige Ereignisse in der Betriebsphase
1.1.12.02	Kokillensticking
1.2.01.02	Orogenese
1.2.01.04	Hebung der Erdkruste
1.2.02.02	Grabenbildung
1.2.04.01	Magmatismus
1.2.05.01	Gesteinsmetamorphose
1.2.06.01	Hydrothermale Aktivität
1.5.01.01	Meteoriteneinschlag
2.1.12.04	Zündfähige Gasgemische
2.1.14.01	Erreichen einer kritischen Ansammlung (Kritikalität)
2.2.06.02	Selbstversatz
2.2.10.04	Schmelzen des Salzgesteins

Zu 2.) Die Kombination weniger wahrscheinlicher FEP würde insbesondere das in den Sicherheitsanforderungen genannte gleichzeitige unabhängige Versagen von mehreren technischen Komponenten abdecken (siehe Tab. 2.9).

Zu 3.) Hier ergibt sich durch die Kombination der Szenarien (Tab. 2.8) eine große Anzahl von zu bewertenden Entwicklungen. Gegebenenfalls müssen hier abdeckende Rechenfälle entwickelt werden.

Zu 4.) Die zu analysierenden Fälle aus der VSG sind in Tab. 2.7 dargelegt. Auch hier müssen gegebenenfalls abdeckende Rechenfälle entwickelt werden, um die Anzahl der Analysen zu begrenzen.

Da der Schwerpunkt dieses Berichtes auf die radiologische Konsequenzenanalyse und weniger auf die Durchführung eines Optimierungsprozesses ausgerichtet ist, werden unwahrscheinliche Entwicklungen in diesem Bericht nicht in Rechenfälle umgesetzt. Einige mögliche unwahrscheinliche Entwicklungen (z. B. das in den Sicherheitsanforderungen genannte *gleichzeitige unabhängige Versagen von mehreren Komponenten*) werden allerdings durch die analysierten What-if-Fälle abgedeckt.

2.4 What-if-Fälle

Außerhalb der Betrachtung von Referenz- und Alternativszenarien ist in einem Sicherheitsnachweis die Analyse der Robustheit des Systemverhaltens durch What-if-Fälle ein wichtiger Baustein bei der Kommunikation der Ergebnisse, insbesondere bei der Kommunikation von Ungewissheiten. Dabei werden z. B. einzelne Parameter mit Werten verwendet, die außerhalb realistischer Bandbreiten liegen, oder es werden Annahmen getroffen, die sich bei der Szenarienanalyse als nicht plausibel darstellen, z. B. das Fehlen der geologischen Barriere. Letztlich ist allen What-if-Fällen gemein, dass sie nicht von einer Einteilung der Eintrittswahrscheinlichkeit herrühren. Für What-if-Fälle existieren keine Vorgaben in den Sicherheitsanforderungen.

Aufbauend auf den Erfahrungen der Konsequenzenanalysen in den vorhergehenden Phasen des Vorhabens ISIBEL /BUH 08/, /BUH 10/ und in der VSG /LAR 13/ werden folgende What-if-Fälle in Rechenfälle umgesetzt:

1. Gemeinsame Betrachtung aller Alternativszenarien
2. Gleichzeitiges unabhängiges Versagen von Schacht- und Streckenverschlüssen
3. Geringerer Wert des Diffusionskoeffizienten

Zu 1.) Die Kombination von weniger wahrscheinlichen Alternativszenarien ergibt keine Szenarien sondern Entwicklungen, die – wenn unabhängig voneinander – als unwahrscheinlich zu klassifizieren sind. Die Kombination aller weniger wahrscheinlichen Alternativszenarien wird hier als What-if-Fall angesehen. Ziel ist der Vergleich mit den Konsequenzen der einzelnen Szenarien.

Zu 2.) Wie in der vorhergehenden Phase des Vorhabens ISIBEL /BUH 08/ wurde untersucht, welche Konsequenzen unter der Annahme, dass sowohl der Schacht- als auch die Streckenverschlüsse frühzeitig versagen, zu erwarten sind. Diese Entwicklung wird in den Sicherheitsanforderungen zu den unwahrscheinlichen Entwicklungen ge-

zählt. Die Untersuchung des Versagens mehrerer Barrieren ist eine sinnvolle Untersuchung zur Robustheit des Endlagersystems.

Zu 3.) Im Vorhaben VSG wurde unterstellt, dass bei einer Porosität kleiner 1 % kein diffusionswirksamer Porenraum im Salzgrus der Strecken und Schächte besteht. Da der Salzgrus bei allen Rechenfällen innerhalb sehr kurzer Zeit kompaktierte, spielte Diffusion in der Konsequenzenanalyse keine bedeutende Rolle /LAR 13/. Lässt man wie in den bisherigen Arbeiten des Vorhabens ISIBEL Diffusion auch bei geringen Porositäten zu, ist die Diffusion in allen bisherigen Untersuchungen der dominierende Transportprozess im Grubengebäude. Daher wurde untersucht, ob eine Änderung des Diffusionskoeffizienten zu relevanten Änderungen der Freisetzungsraten von Radionukliden aus dem ewG führt. Der Wert des Diffusionskoeffizienten basiert dabei nicht auf Messungen oder physikalischen Ableitungen sondern wurde entsprechend dem im freien Wasser vorgegeben.

3 Umsetzung der Szenarien in Rechenfälle

Die Modellrechnungen wurden mit dem Programmpaket RepoTREND (**T**ransport and **R**etention of **N**on-decaying and **D**ecaying contaminants in final **R**epositories) /REI 16/ durchgeführt, wobei die Module LOPOS und BioTREND eingesetzt wurden. Für LOPOS wird das Nahfeld durch eine Modellstruktur aus verbundenen Teilbereichen dargestellt, die als Segmente bezeichnet werden. Diese Struktur basiert auf den vorhergehenden Arbeiten des Vorhabens ISIBEL /BUH 08/ und wurde in Anlehnung an die radiologische Konsequenzenanalyse im Vorhaben VSG /BOL 11/, /BOL 12/, /LAR 13/ modifiziert. Die Eingangsdaten für die Modellrechnungen basieren ebenfalls auf Daten der VSG.

Für probabilistische Rechnungen verfügt das Programmpaket RepoTREND über einen speziellen Statistik-Rahmen, der den Namen RepoSTAR trägt (RepoTREND framework for STAtistic Runs) /BEC 16/. Dieser kam bei der Vorbereitung und Durchführung der probabilistischen Rechnungen zum Einsatz. Die Stichprobenziehung wurde dabei mit dem Modul Statist durchgeführt. Für die Auswertung der vorliegenden Rechnungen konnte jedoch noch nicht auf das zu RepoSTAR gehörige Auswertewerkzeug RepoSUN zurückgegriffen werden, da dieses erst seit dem Jahr 2016 zur Verfügung steht. Stattdessen wurden zum einen Tabellen erzeugt und mit den Werkzeugen des kommerziellen Programms Excel[®] ausgewertet. Zum anderen wurde für Sensitivitätsanalysen das Programm Matlab[®] eingesetzt. Gegenüber dieser für die vorliegenden Rechnungen noch notwendigen Handarbeit stellt RepoSUN in puncto Flexibilität, Benutzerfreundlichkeit und Robustheit gegen Bedienungsfehler eine erhebliche Verbesserung dar.

Die Segmentstruktur für alle Modellrechnungen ist in Abbildung 3.1 dargestellt. Sie besteht aus dem Infrastrukturbereich (INFRA-B), den Abdichtungen der Richtstrecken (RS-VO, RS-VW, RN-VW und QMV), zwei Einlagerungsbereichen (Ost und West) sowie einem Schachtsegment (DICHT-U). In den Einlagerungsbereichen sind jeweils mehrere Einlagerungsfelder mit den Abfällen angeordnet. Diese bestehen jeweils aus einem Querschlag (QO1 bis QO4, bzw. QW1 bis QW3) und einer oder zwei Modellstrecken, die jeweils die Abfälle enthalten (ES-XXX).

Die im betrachteten Konzept relevanten Behältertypen sind der POLLUX-10 für Leistungsreaktor-Brennelemente und der POLLUX-9 für Wiederaufarbeitungsabfälle. Bei den vernachlässigbar wärmeentwickelnden Abfällen werden die Strukturteile der

Brennelemente und ein Teil der Mischabfälle (optional auch die graphithaltigen Abfälle) in MOSAIK-Behältern (= Gussbehälter Typ 2), die Urantails in Konrad-VI-Containern sowie die Mischabfälle und graphithaltigen Abfälle in Konrad-IV-Containern und Konrad-I-Betonbehältern endgelagert. Die CASTOR AVR/THTR, CASTOR KNK und CASTOR MTR2 für Brennelemente aus Forschungs- bzw. Prototypreaktoren wurden bei den folgenden Rechnungen nicht berücksichtigt.

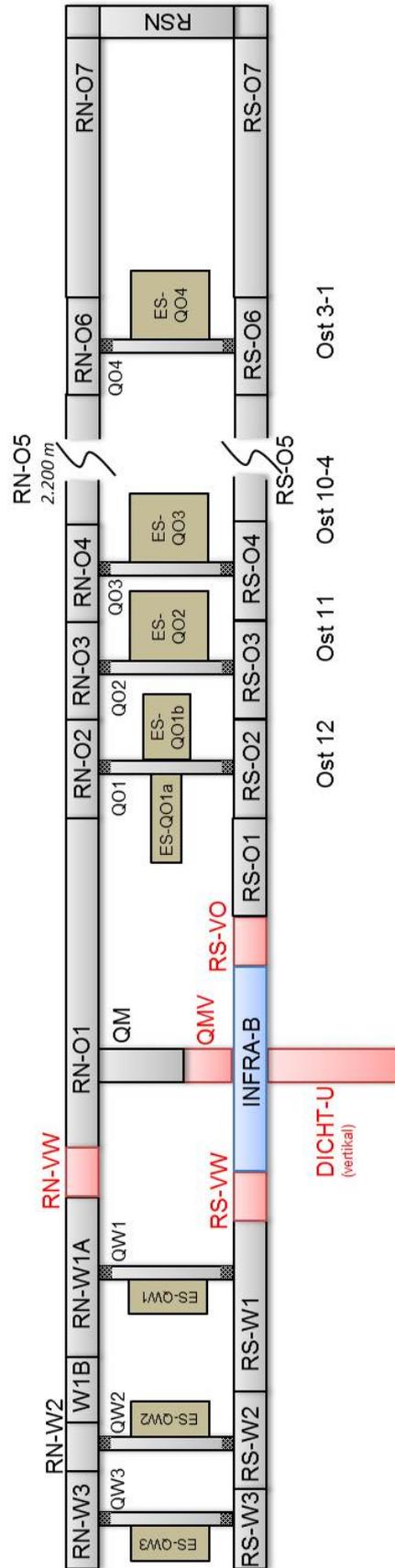


Abb. 3.1 Segmentstruktur des Nahfeldes

Im östlichen Bereich (erkennbar an den Segmentnamen mit einem „O“) befinden sich in Übereinstimmung mit den Daten aus der VSG die wärmeentwickelnden radioaktiven Abfälle, im westlichen Bereich (erkennbar an den Segmentnamen mit einem „W“) die Abfälle mit vernachlässigbarer Wärmeentwicklung. Zur Vereinfachung werden in dieser Studie für den östlichen Bereich nur die verglasten Abfälle sowie die Strukturteile und die direkt eingelagerten Brennelemente (LWR, SWR und WWER) betrachtet. Über das Schachtsegment DICHT-U wird die Verbindung zwischen dem Nahfeld und der Geosphäre hergestellt.

In den folgenden Kapiteln werden alle für die Modellrechnungen erforderlichen Daten zusammengestellt, zunächst für das Referenzszenarium und anschließend die Abweichungen für die betrachteten Alternativszenarien.

3.1 Umsetzung des Referenzszenariums

Das Referenzszenarium soll gemäß /BEU 12/ eine möglichst große Gesamtheit an wahrscheinlichen Entwicklungen umfassen. Je weniger wahrscheinliche Szenarien generiert werden (müssen), um die Bandbreite der wahrscheinlichen Entwicklungen abzudecken, desto eher kann das Referenzszenarium als erwartete Entwicklung angesehen werden. Um diesem Ziel näher zu kommen, sind die Möglichkeiten deterministischer Rechnungen begrenzt, da viele FEP bzw. die diese FEP in den Modellen beschreibenden Parameter X nicht einen festen wahrscheinlichen (oder bekannten) Wert besitzen, sondern einer stetigen Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung unterliegen.

Zur Einbindung einer möglichst großen Vielzahl von Entwicklungen ist der Einsatz von probabilistischen Verfahren zielführend. Ein deterministischer Best-Estimate-Rechenfall ist gemäß Sicherheitsanforderungen erforderlich und für verschiedene Auswertungen nützlich, kann aber nicht bei der Umsetzung des Referenzszenariums in einen Rechenfall ausreichen. Die Sicherheitsanforderungen unterscheiden zwischen drei Wahrscheinlichkeitsklassen für Systementwicklungen:

- wahrscheinlich³,

³ In den Sicherheitsanforderungen heißt es dazu: *Wahrscheinliche Entwicklungen sind die für diesen Standort prognostizierten normalen Entwicklungen und für vergleichbare Standorte oder ähnliche geologische Situationen normalerweise beobachtete Entwicklungen. Dabei ist für die technischen Komponenten des Endlagers die als normal prognostizierte Entwicklung ihrer Eigenschaften zugrunde zu legen. Falls eine quantitative Angabe zur Eintrittswahrscheinlichkeit einer bestimmten Entwicklung mög-*

- weniger wahrscheinlich⁴ und
- unwahrscheinlich⁵.

Bei stetig verteilten Parameterwerten ist das aus einer bestimmten Parameterkombination resultierende Szenarium immer nur als Repräsentant einer Klasse von Entwicklungen zu verstehen, deren Eintreten jeweils insgesamt als wahrscheinlich, weniger wahrscheinlich oder unwahrscheinlich anzusehen ist. Die diesen Klassen zugeordneten Wertebereiche der Parameter sind durch Experteneinschätzung festzulegen. Die Grenzziehung zwischen den Bereichen ist mathematisch allerdings nicht per se eindeutig, da die Gesamtwahrscheinlichkeit eines Intervalls von dessen Breite abhängt.

Ausgehend von einer vermuteten stetigen Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion kann eine sinnvolle Einteilung des gesamten Wertebereichs in einen „wahrscheinlichen“, einen „weniger wahrscheinlichen“ und einen „unwahrscheinlichen“ Teilbereich folgendermaßen festgelegt werden: auf der Skala der Wahrscheinlichkeitsdichte wird ein oberer Schwellenwert so definiert, dass das Integral der Dichtefunktion über alle Teilbereiche, in dem dieser Wert übertroffen wird, 0,9 beträgt. Dieses Intervall stellt dann den „wahrscheinlichen“ Wertebereich dar. In entsprechender Weise wird ein unterer Schwellenwert so definiert, dass das Integral über alle Teilbereiche, in denen dieser nicht erreicht wird, 0,01 beträgt; diese Teilbereiche bilden dann den „unwahrscheinlichen“ Wertebereich. Die übrig gebliebenen Teilintervalle stellen zusammengenommen den „weniger wahrscheinlichen“ Wertebereich mit einer Gesamtwahrscheinlichkeit von 0,09 dar.

lich ist, und ihre Eintrittswahrscheinlichkeit bezogen auf den Nachweiszeitraum mindestens 10 % beträgt, gilt diese als wahrscheinliche Entwicklung.

⁴ In den Sicherheitsanforderungen heißt es dazu: *Weniger wahrscheinliche Entwicklungen sind solche, die für diesen Standort unter ungünstigen geologischen oder klimatischen Annahmen eintreten können und die bei vergleichbaren Standorten oder vergleichbaren geologischen Situationen selten aufgetreten sind. Für die technischen Komponenten des Endlagers ist dabei eine als normal prognostizierte Entwicklung ihrer Eigenschaften bei Eintreten der jeweiligen geologischen Entwicklung zugrunde zu legen. Außerdem sind auch von der normalen Entwicklung abweichende ungünstige Entwicklungen der Eigenschaften der technischen Komponenten zu untersuchen. Rückwirkungen auf das geologische Umfeld sind zu betrachten. Abgesehen von diesen Rückwirkungen sind dabei die jeweilig erwarteten geologischen Entwicklungen zu berücksichtigen. Innerhalb einer derartigen Entwicklung ist das gleichzeitige Auftreten mehrerer unabhängiger Fehler nicht zu unterstellen. Falls eine quantitative Angabe zur Wahrscheinlichkeit einer bestimmten Entwicklung oder einer ungünstigen Entwicklung der Eigenschaften einer technischen Komponente möglich ist, sind diese hier zu betrachten, wenn diese Wahrscheinlichkeit bezogen auf den Nachweiszeitraum mindestens 1 % beträgt.*

⁵ In den Sicherheitsanforderungen heißt es dazu: *Unwahrscheinliche Entwicklungen sind Entwicklungen, deren Eintreten am Standort selbst unter ungünstigen Annahmen nicht erwartet wird und die bei vergleichbaren Standorten oder vergleichbaren geologischen Situationen nicht beobachtet wurden. Zustände und Entwicklungen für technische Komponenten, die durch zu treffende Maßnahmen praktisch ausgeschlossen werden können sowie das gleichzeitige unabhängige Versagen von mehreren Komponenten werden den unwahrscheinlichen Entwicklungen zugeordnet.*

Da die Sicherheitsanforderungen bezüglich der Wahrscheinlichkeit nicht weiter differenzieren, werden für die probabilistischen Rechnungen innerhalb der Wahrscheinlichkeitsklassen gleichverteilte Werte angenommen. Zusammen mit der oben beschriebenen Definition der Teilbereiche bedeutet das, dass für jeden Parameter die geschätzte stetige Verteilungsfunktion durch eine stilisierte, unstetige Treppenfunktion ersetzt wird. Dies wird in Abbildung 3.2 veranschaulicht.

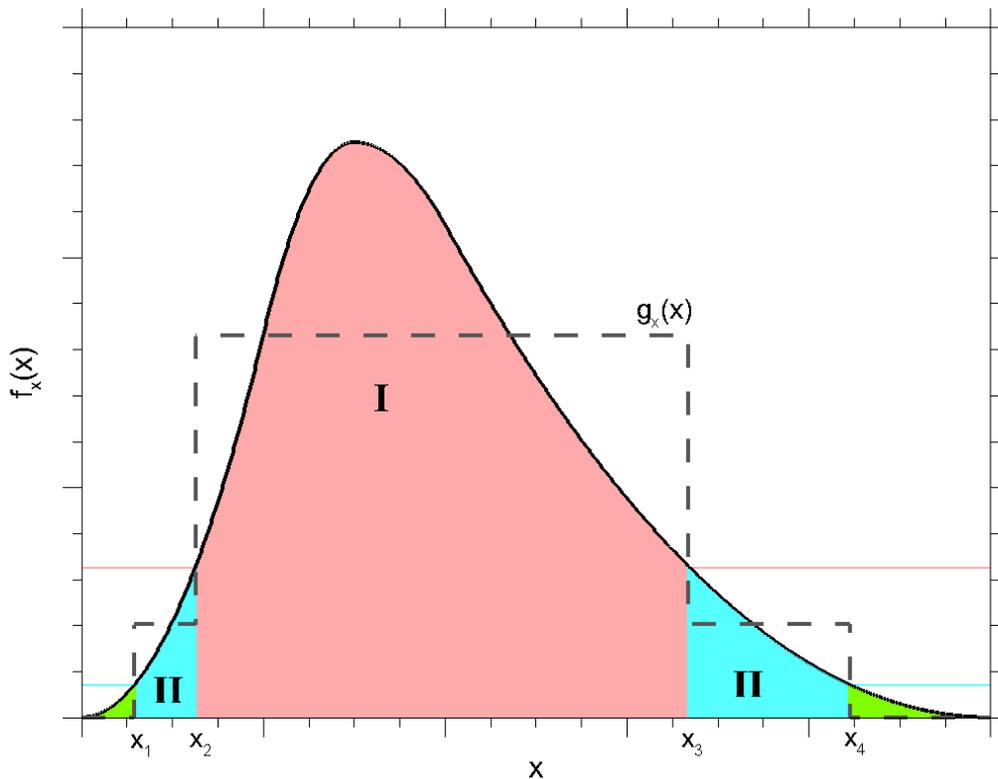


Abb. 3.2 Ableitung von Wahrscheinlichkeitsklassen aus einer Verteilungsdichtefunktion. Die farbig markierten Grenzen werden so bestimmt, dass die Integrale über die Teilintervalle 0,9 (rot) bzw. 0,99 (rot + cyan) betragen. Auf der x-Achse entspricht dann das rote Intervall dem wahrscheinlichen, das cyanfarbene dem weniger wahrscheinlichen und das grüne dem unwahrscheinlichen Parameterbereich. Die gestrichelte Linie gibt eine stilisierte Verteilungsfunktion mit Gesamtwahrscheinlichkeiten von 0,9 für wahrscheinliche und 0,1 für weniger wahrscheinliche Werte wieder.

Eine wissenschaftlich begründbare Festlegung der für dieses Verfahren notwendigen Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen ist methodisch schwierig und bedarf weiterer FuE-

Arbeiten. Für die in diesem Vorhaben durchzuführenden Arbeiten war es ausreichend die Intervallgrenzen und damit die stilisierten Verteilungen direkt festzulegen.

Auf Grund dieser Überlegungen wird vorgeschlagen, das Referenzszenarium als einen probabilistischen Rechenfall mit gleichverteilten Parameterwerten innerhalb der wahrscheinlichen Ausprägung umzusetzen. Der bereits verwendete Begriff „Ausprägung“ kann an dieser Stelle präzisiert werden: Die Ausprägung ist ein mit Hilfe von Expertenwissen abgeleitetes Intervall einer Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion. Eine „wahrscheinliche“ Ausprägung hat die Bedingung, dass das Integral der Dichtefunktion 0,9 beträgt, wird aber eindeutig erst durch Expertenwissen festgelegt. Für die Festlegung wird das oben beschriebene und in Abbildung 3.2 dargestellte Verfahren vorgeschlagen.

Ein Best-Estimate-Parameterwert ist gemäß Sicherheitsanforderungen erforderlich und zur Darstellung grundlegender Sachverhalte sinnvoll. Ein deterministischer Rechenfall mit möglichst vielen gut belegten Schätzwerten ist sicherlich ein wichtiges Argument innerhalb eines Langzeitsicherheitsnachweises. So lassen sich einige Ergebnisse durch deterministische Rechnungen einfacher darstellen. Aber auch probabilistische Rechnungen mit fundierten anderen Verteilungen (z. B. Normal- oder Dreiecksverteilung) können weitere Argumente liefern (siehe Diskussion in Kapitel 3.4).

Für ein eindeutiges Auseinanderhalten der Rechenfälle bei der Umsetzung des Referenzszenariums wird folgende Unterscheidung getroffen:

1. **Basisfall:** Deterministischer Rechenfall innerhalb der wahrscheinlichen Entwicklungen des Endlagersystems mit möglichst realitätsnahen Werten (Best-Estimate-Werte⁶) im Sinne der Sicherheitsanforderungen.
2. **Referenzfall:** Probabilistischer Rechenfall mit der wahrscheinlichen Ausprägungen (aller variierten Parameter), der zur Umsetzung einer möglichst großen Gesamtheit an wahrscheinlichen Entwicklungen dient.

⁶ Unter einem „Best-Estimate-Wert“ wird ein Parameterwert verstanden, der mit dem verwendeten Modell aufgrund einer Expertenschätzung ein möglichst realitätsnahes Systemverhalten wiedergibt. Wie dies zu verstehen ist, ist nicht eindeutig definiert. Nimmt man an, dass die Ungewissheit über den Parameterwert durch eine Dichteverteilung charakterisiert ist, so kann man etwa den Erwartungswert, den Median oder den Modus (= wahrscheinlichster Wert) der Verteilung als Optimalwert ansehen und durch Expertenschätzung anzunähern versuchen. Es sollte sichergestellt werden, dass der Best-Estimate-Wert im „wahrscheinlichen“ Parameterbereich (der wahrscheinlichen Ausprägung) liegt; dies ist bei dem oben beschriebenen Verfahren zur Festlegung der Grenzen der Wahrscheinlichkeitsklassen sicher, wenn der Modus verwendet wird.

In der Umsetzung der Szenarien in Rechenfälle ist man auf den Leistungsumfang des Instrumentariums angewiesen. Die numerische Umsetzung der FEP setzt dabei Grenzen und führt dazu, dass sowohl deterministische als auch probabilistische Varianten notwendig sein können, um z. B. Modellungswissheiten oder nicht bekannte Korrelationen abzubilden. Letztlich bleibt es eine schwierige Aufgabe für die Modellierer, nachzuweisen, wie sie die abgeleiteten Szenarien in geeigneten Rechenfällen umfassend umgesetzt haben. Wie im Fall der Szenarien ist es zielführend, die für die Szenarien verwendeten FEP (siehe Tabellen 2.1 bis 2.6) als Hilfsmittel zum Nachweis einer umfassenden Umsetzung zu verwenden. Ein Beispiel für eine entsprechende Verwendung liefert /LAR 13/.

3.1.1 Deterministische Daten für den Basisfall

Die Grundlagen für das Referenzszenarium sind in Kapitel 2.1 beschrieben. Im vorliegenden Kapitel sind die Parameterwerte für die deterministischen Rechnungen zusammengestellt. Sie basieren auf den Werten aus den bisherigen Arbeiten im Vorhaben ISIBEL /BUH 08/ und wurden zum Vergleich mit den Ergebnissen aus dem Vorhaben VSG /LAR 13/ gegebenenfalls modifiziert. Die jeweiligen Quellen sind bei den Tabellen angegeben. Ob es sich bei diesen Werten jeweils um die Best-Estimate-Werte handelt, wurde im Rahmen des FuE-Vorhabens ISIBEL nicht geprüft.

3.1.1.1 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 /STO 96/.

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

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.

Über die Glasmasse ist im Bericht /LAR 13/ keine Angabe vorhanden. In Anlehnung an frühere Arbeiten wird eine Glasmasse pro CSD-V-Kokille von 412 kg angenommen /KIE 12/. Auch zu Hohlraumvolumina, usw. sind im Bericht /LAR 13/ keine Angaben zu finden. Gemäß /KIE 12/ ist ein Hohlraumvolumen von $0,02 \text{ m}^3$ pro Kokille anzunehmen. Die Glasoberfläche wurde mit $16,5 \text{ m}^2$ pro Kokille angenommen, die Metallmasse pro Kokille mit 80 kg.

Für die Mobilisierung der Radionuklide aus den ausgedienten Brennelementen wird ein Ansatz verwendet, der eine Mobilisierung aus drei Bereichen der Brennelemente vorsieht: aus den Metallteilen, der Brennstoffmatrix und aus der sogenannten „instant release fraction“ (IRF). In Tabelle 3.1 sind die Daten zusammengestellt, die zur Berechnung der Inventare in den POLLUX-Behältern erforderlich sind.

Tab. 3.1 Berechnungsgrundlagen für das Inventar eines POLLUX-Behälters für ausgediente Brennelemente /LAR 13/

Behälter	Behältervolumen [m^3]	Anzahl Behälter	Behältermasse [kg]
POLLUX-9	10,55	415	58.100
POLLUX-10	10,55	2135	55.500

Für den Ausfall der POLLUX-Behälter wurde eine Lebensdauer von 500 Jahren angesetzt, siehe Tabelle 3.16⁷.

⁷ Obwohl die POLLUX-Behälter eine zu gewährleistende Funktionsdauer von 500 Jahren haben, muss bei allen Fertigungs- und Prüfverfahren eine geringe Fehlerquote unterstellt werden. Für das Referenzszenarium wird in /BEU 12/ in Anlehnung an Untersuchungen in anderen Endlagerprojekten eine Fehlerquote von 0,1 % angenommen. Unter Berücksichtigung der eingelagerten Anzahl von POLLUX-Behältern wird für das Referenzszenarium die Einlagerung von bis zu vier POLLUX-Behältern mit unentdeckten Defekten unterstellt. Welche Behälter betroffen sind, kann nicht angegeben werden, so dass zahlreiche Rechenfälle aus dieser Annahme resultieren und dementsprechend in einer Sicherheitsanalyse geprüft werden müssen. Diese Auswertung ist nicht Gegenstand des Vorhabens ISIBEL und wurde in den weiteren Rechnungen nicht berücksichtigt.

In Tabelle 3.2 sind die relativen Freisetzungsraten für die Mobilisierung aus den drei oben genannten Bereichen der Brennelemente zusammengestellt. Diese Werte wurden in /BUH 08/ für LWR-Brennelemente ermittelt, im vorliegenden Bericht aber für die Mobilisierung aus dem Gemisch aus LWR-, DWR- und WWER-Brennelementen verwendet. Tabelle 3.4 enthält die relativen Inventaranteile für die drei Bereiche.

Tab. 3.2 Relative Freisetzungsraten in den Bereichen eines Brennelements /BUH 08/

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

Für die Mobilisierung aus den vernachlässigbar Wärme entwickelnden Abfällen wurde ein einfacher Ansatz verwendet, bei dem die Behälter-Lebensdauer vernachlässigt wird und die Mobilisierung über eine konstante Rate angesetzt wird.

In Tabelle 3.3 sind die Parameter zusammengestellt, die für die Mobilisierung aus verglasten Abfällen und die vernachlässigbar Wärme entwickelnden Abfälle verwendet wurden.

Tab. 3.3 Mobilisierungsparameter /BUH 08/

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

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

Element	Metallteile	Brennstoffmatrix	IRF	Löslichkeitsgrenze [mol/m ³]
Be	0,002	0,998	0,000	1 · 10 ¹⁰
C	0,418	0,524	0,058	1 · 10 ¹⁰
Cl	0,515	0,436	0,048	1 · 10 ¹⁰
Ca	0,325	0,675	0,000	1 · 10 ¹⁰
Ni, Nb	1,000	0,000	0,000	1 · 10 ¹⁰
Sr	0,000	0,990	0,010	1 · 10 ¹⁰
Zr	0,049	0,951	0,000	1 · 10 ¹⁰
Mo	0,986	0,014	0,000	1 · 10 ¹⁰
Tc	0,001	0,998	0,001	1 · 10 ¹⁰
Pd	0,000	0,999	0,001	1 · 10 ¹⁰
I, Cs	0,000	0,980	0,020	1 · 10 ¹⁰
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 ⁻²
Pu	0,000	1,000	0,000	2,40 · 10 ⁻³
U	0,000	1,000	0,000	0,755
Th	0,000	1,000	0,000	0,233
Se, Rb, Ag, Sn, Ho, Cm, Ra, Pa, Ac	0,000	1,000	0,000	1 · 10 ¹⁰

In den folgenden Tabellen **3.5** bis **3.10** sind weitere Daten zusammengestellt, die zur Modellierung der LOPOS-Rechnungen verwendet wurden.

Tab. 3.5 Berechnungsgrundlagen für das Inventar eines Behälters aus dem Gesamtinventar der sonstigen radioaktiven Mischabfälle /LAR 13/

Behälter	Nettoabfallvolumen [m ³]	Anzahl Behälter	m ³ Abfall pro Behälter
Konrad Typ IV	8.136	1.695	4,8
Gussbehälter Typ II	517	1.150	0,45
Betonbehälter Typ I	160	800	0,2

Tab. 3.6 Volumina von Abfallbehältern, westliche Einlagerungsfelder /BOL 11/

Behälter	Bruttovolumen 1 Behälter [m ³]	Bruttovolumen alle Behälter [m ³]
Typ IV, sonstige Mischabfälle	7,4	12.543
Typ IV, Urantails		53.406
Gussbehälter Typ II, sonstige Mischabfälle	1,3	1.495
Gussbehälter Typ II, Graphitabfälle		2.990
Betonbehälter Typ I	1,3	1.040

Tab. 3.7 Anzahl der Abfälle im LOPOS-Modell pro Modell-Einlagerungsfeld; „1“ = alle Behälter sind in diesem Feld (grün=wird verwendet)

Abfalltyp	ES-QW3	ES-QW2	ES-QW1	ES-QO1	ES-QO2	ES-QO3	ES-QO4
CSD-V							1
BE-MIX				168	224	1685	
v-Strukt				1			
Urantails			1				
Misch		1					
Graphit	1						

Das Segment ES-QO1 ist in zwei Teile geteilt: a) Strukturteile (v-Strukt), b) Pollux mit Brennelementen (BE-MIX); CSD-V: verglaste Abfälle; Misch: Mischabfälle

Die Angaben in Tabelle 3.7 erfolgen im Hinblick auf die Inventarangaben in Tabelle 3.15. Dort beziehen sich die Inventare jeweils auf das Gesamtinventar aller Behälter dieses Typs, mit Ausnahme der Pollux-Behälter mit abgebrannten Brennelementen, für die das Inventar pro Behälter angegeben ist. In Tabelle 3.7 bedeutet folglich eine 1, dass alle Abfallbehälter dieses Typs in dem Feld eingelagert sind.

Tab. 3.8 Anzahl der Behälter/Abfälle für die in LOPOS modellierten Segmente

Segment	Einlagerungsfelder	Abfälle / Behälter	Anzahl
ES-QO4	Ost 1 bis Ost 3	POLLUX-9	415
		POLLUX-10	58
ES-QO3	Ost 4 bis Ost 10	POLLUX-10	1.685
ES-QO2	Ost 11	POLLUX-10	224
ES-QO1b	Ost 12	POLLUX-10	168
ES-QO1a	Ost 12	Gussbehälter Typ 2; Strukturteile	2.620
ES-QW1	West 1	Konrad Typ VI Urantails	7.217

Segment	Einlagerungsfelder	Abfälle / Behälter	Anzahl
ES-QW2	West 2	Konrad Typ IV Andere Mischabfälle	1.695
		Gussbehälter Typ II Andere Mischabfälle	1.150
		Betonbehälter Typ I Andere Mischabfälle	800
ES-QW3	West 3	Gussbehälter Typ II Graphitabfälle	2.300

Tab. 3.9 Abmessungen der Modell-Einlagerungsfelder in LOPOS

Segment	Daten pro Strecke und gesamt [m] /BOL 12/	Länge [m]	Höhe [m]	Breite [m]	Volumen [m ³]	An- zahl
ES-QO4	L: 45 x 245 = 12.025 H: ca. 3,6 B: ca. 4,72 (17 m ²)	245	3,6	231,8	204.448	1
ES-QO3	L(gesamt): 14.901	245	3,6	287,2	253.310	1
ES-QO2	L: 8 x 245 = 1.960	245	3,6	37,8	33.340	1
ES-QO1a	L: 172,6 (Gussbehälter) H: ca. 6,1 B: ca. 7,1 (43,3 m ²)	173	3,6	60,0	37.368	1
ES-QO1b	L: 6 x 245 = 1.470 H: ca. 3,6 B: ca. 4,72 (17 m ²)	245	3,6	28,3	24.961	1
ES-QW1	L(gesamt): 1.817 Q=43,3 m ² (wie oben)	360	3,6	60,7	78.667	1
ES-QW2	L(gesamt): 723,3 Q=43,3 m ² (wie oben)	180	3,6	483,0	312.984	1
ES-QW3	L: 124,2 Q=43,3 m ² (wie oben)	124,2	3,6	12,0	5.365	1

Tab. 3.10 Abmessungen der Modellsegmente für den Infrastrukturbereich und für die Schachtverschlüsse, Zugangsstrecken und Querschläge

Segment	Länge [m]	Höhe [m]	Breite [m]	Volumen [m³]	Anzahl
DICHT-U	400	7,0	6,53	18.284	1
INFRA-B	1.000	3,6	63,9	230.040	1
RS-VO	150	3,6	6,39	3.451	1
RS-VW	150	3,6	6,39	3.451	1
QMV	150	3,6	6,67	3.602	1
RN-VW	150	3,6	6,67	3.602	1
QM	527	3,6	6,67	12.654	1
RS-O1	300	3,6	6,39	6.901	1
RS-O2	300	3,6	6,39	6.901	1
RS-O3	300	3,6	6,39	6.901	1
RS-O4	300	3,6	6,39	6.901	1
RS-O5	2.000	3,6	6,39	46.008	1
RS-O6	100	3,6	6,39	2.300	1
RS-O7	1.000	3,6	6,39	23.004	1
RS-O8	100	3,6	12,0	2.300	1
RSN	430	3,6	6,39	9.892	1
RN-O1	300	3,6	6,67	7.204	1
RN-O2	300	3,6	6,67	7.204	1
RN-O3	300	3,6	6,67	7.204	1
RN-O4	300	3,6	6,67	7.204	1
RN-O5	1.900	3,6	6,67	45.623	1
RN-O6	100	3,6	6,67	2.401	1
RN-O7	1.000	3,6	6,67	24.012	1
RN-O8	100	3,6	6,67	2.401	1
QO1	205	3,6	6,67	4.922	1
QO2	275	3,6	6,67	6.603	1
QO3	360	3,6	6,67	8.644	1
QO4	330	3,6	6,67	7.924	1
RS-W1	800	3,6	6,39	18.403	1
RS-W2	100	3,6	6,39	2.300	1
RS-W3	100	3,6	6,39	2.300	1
RN-W1A	400	3,6	6,67	9.605	1
RN-W1B	200	3,6	6,67	4.802	1
RN-W2	100	3,6	6,67	2.401	1
RN-W3	100	3,6	6,67	2.401	1
QW1	713	3,6	6,67	17.121	1
QW2	746	3,6	6,67	17.913	1
QW3	898	3,6	6,67	21.563	1

In den Tabellen 3.11 und 3.12 sind die verwendeten Konvergenzparameter angegeben. Diese wurden durch Anpassung an die Porositätsverläufe aus dem VSG-Bericht /LAR 13/ ermittelt, siehe die Abbildungen 4.3 und 4.4. Im Vorhaben VSG wurden zwei verschiedene Konvergenzverläufe angegeben und als „langsame“ bzw. „schnelle“ Konvergenz bezeichnet. Beide Verläufe werden hier als wahrscheinliche Entwicklungen angesehen, wobei die „langsame“ Konvergenz für den Basisfall und die „schnelle“ Konvergenz für Variantenrechnungen verwendet wird.

Tab. 3.11 Globale Konvergenzparameter

Parameter	Wert	Dimension
Global: g_1 (Stützfunktion Versatz)	-1	-
Global: h_1 (Stützfunktion Versatz)	-2	-
Global: g_2 (feucht)	10.000 * (1.000)	-
Global: g_2 (trocken)	100	-
Global: Exponent in Druckfunktion	5	-
Global: K_0 (Referenz-Konvergenzrate)	0,01 * ($1 \cdot 10^{-8}$)	a^{-1}
Global: K_{tr} (Trocken-Konvergenzrate)	0,01 * (0,1)	a^{-1}
Global: Referenzporosität	0,3	-
Global: Aktivierungsenergie von Salz	6.500	K
Global: Endporosität (Parameter lambda)	$4 \cdot 10^{-6}$	-

^{*)} Werte in Klammern für „schnelle“ Konvergenz

Tab. 3.12 Lokale Konvergenzparameter

Segment	Lokale Variation (f_{loc})	Erhöhung der Kriechraten nach Durchfeuchtung (x_F)	Lokale Variation des Referenzdrucks (f_{pG})	Parameter in der Zeitfunktion (λ_S)	Fluiddruck bei voll ausgeprägtem Feuchtekriechen (p_0) [MPa]
RS-W1, RS-W2, RS-W3, RN-W1A, RN-W1B, RN-W2, RN-W3	0,29 * (0,1)	4	1	0,3	1
QO1, QO2, QO3, QO4, ES-QO1a	0,02 * (0,6)	1 * (4)	1	0,08 * (0,008)	0,5
QW1, QW2, QW3, ES-QW1, ES-QW2, ES-QW3	0,08 * (0,015)	0,4	1,2	0,04 * (0,4)	0,1
RS-O1, RS-O2, RS-O3, RS-O4, RS-O5, RS-O6, RS-O7, RS-O8, RN-O1, RN-O2, RN-O3, RN-O4, RN-O5, RN-O6, RN-O7, RN-O8, RSN, QM	0,28 * (0,2)	4	1	0,3 * (0,2)	1
ES-QO1b, ES-QO2, ES-QO3, ES-QO4	0,0017 * (1,0)	1	1	0,08	0,5

^{*)} Werte in Klammern für „schnelle“ Konvergenz

Die Temperaturdaten für die Modellrechnungen stammen aus dem Abschlussbericht zum Arbeitspaket 5 der VSG /BOL 11/. In den vorliegenden Rechnungen wurde jedoch die modifizierte Grubengebäudestruktur aus dem Arbeitspaket 6 der VSG /BOL 12/ zugrunde gelegt, so dass die Stützstellen für die Temperaturdaten entsprechend übertragen werden mussten. In Tabelle 3.13 sind die Temperaturstützstellen zusammengestellt (Nummern gemäß Abbildung 3.3), die für die einzelnen Modellsegmente verwendet wurden.

(Streckenlagerung)

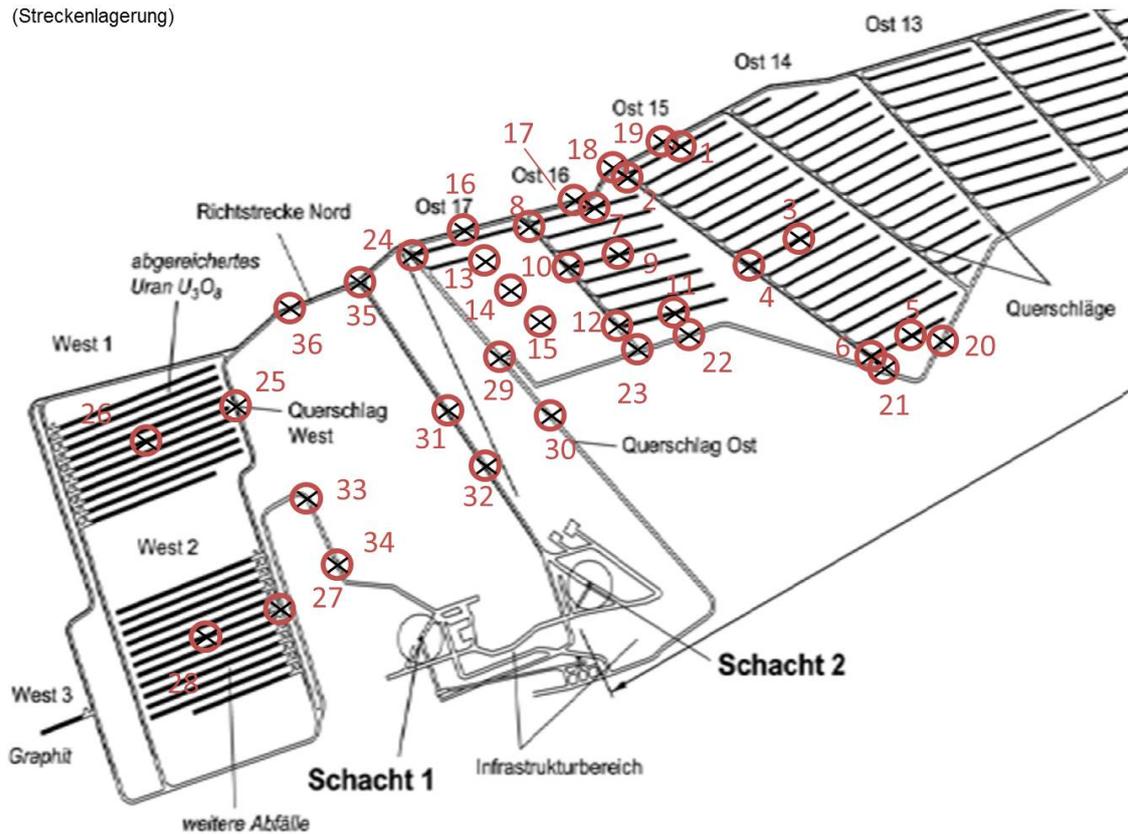


Abb. 3.3 Temperaturstützstellen

Tab. 3.13 Zuordnung der Temperaturstützstellen zu den Modellsegmenten

Nummer Stützstelle	Modellsegment
3	ES-QO3, ES-QO4
6	QO3, QO4
7	ES-QO1b
8	QO1, QO2
9	* ES- QO1b, ES-QO2
13	ES-QO1a
17	RN-O2
18	RN-O3, RN-O4
19	RN-O5, RN-O6, RN-O7, RN-O8
20	RS-O5, RS-O6, RS-O7, RS-O8, RSN
21	RS-O3, RS-O4
23	RS-O1, RS-O2
25	QW1
26	ES-QW1
27	QW2, QW3, RS-W1, RS-W2, RS-W3
28	ES-QW2, ES-QW3
31	QM

Nummer Stützstelle	Modellsegment
35	RN-O1
36	RN-W1A, RN-W1B, RN-W2, RN-W3
37	ES-QO4 (Mobilisierung Glas)

¹⁾ Zuordnung geändert in der Variante für „schnelle“ Konvergenz

Tab. 3.14 Halbwertszeiten [a] der betrachteten Radionuklide /GRS 09/

Spalt- und Aktivierungsprodukte		Th- und Np-Reihe		U- und Ac-Reihe	
Nuklid	HWZ	Nuklid	HWZ	Nuklid	HWZ
H-3	$1,232 \cdot 10^1$	Cm-248	$3,400 \cdot 10^5$	Cm-246	$4,730 \cdot 10^3$
C-14	$5,730 \cdot 10^3$	Pu-244	$8,000 \cdot 10^7$	Pu-242	$3,750 \cdot 10^5$
Cl-36	$3,000 \cdot 10^5$	Cm-244	$1,810 \cdot 10^1$	Am-242m	$1,410 \cdot 10^2$
Ca-41	$1,030 \cdot 10^5$	Pu-240	$6,563 \cdot 10^3$	Cm-242	$4,461 \cdot 10^{-1}$
Ni-59	$7,500 \cdot 10^4$	U-236	$2,342 \cdot 10^7$	Pu-238	$8,774 \cdot 10^1$
Co-60	$5,272 \cdot 10^0$	Th-232	$1,405 \cdot 10^{10}$	U-238	$4,468 \cdot 10^9$
Ni-63	$1,000 \cdot 10^2$	U-232	$6,890 \cdot 10^1$	Th-234	$6,600 \cdot 10^{-2}$
Se-79 *	$1,100 \cdot 10^6$	Ra-228	$5,750 \cdot 10^0$	U-234	$2,455 \cdot 10^5$
Rb-87	$4,800 \cdot 10^{10}$	Th-228	$1,913 \cdot 10^0$	Th-230	$7,540 \cdot 10^4$
Sr-90	$2,864 \cdot 10^1$	Ra-224	$1,002 \cdot 10^{-2}$	Ra-226	$1,600 \cdot 10^3$
Zr-93	$1,500 \cdot 10^6$			Rn-222	$1,047 \cdot 10^{-2}$
Mo-93	$3,500 \cdot 10^3$	Cm-245	$8,500 \cdot 10^3$	Pb-210	$2,230 \cdot 10^1$
Nb-94	$2,000 \cdot 10^4$	Pu-241	$1,435 \cdot 10^1$		
Tc-99	$2,100 \cdot 10^5$	Am-241	$4,322 \cdot 10^2$	Cm-247	$1,560 \cdot 10^7$
Pd-107	$6,500 \cdot 10^6$	Np-237	$2,144 \cdot 10^6$	Cm-243	$2,910 \cdot 10^1$
Cd-113	$1,460 \cdot 10^1$	Pa-233	$7,390 \cdot 10^{-2}$	Am-243	$7,370 \cdot 10^3$
Sn-126 *	$2,345 \cdot 10^5$	U-233	$1,592 \cdot 10^5$	Pu-239	$2,411 \cdot 10^4$
I-129	$1,570 \cdot 10^7$	Th-229	$7,880 \cdot 10^3$	U-235	$7,038 \cdot 10^8$
Cs-135	$2,000 \cdot 10^6$	Ra-225	$4,050 \cdot 10^{-2}$	Pa-231	$3,276 \cdot 10^4$
Cs-137	$3,017 \cdot 10^1$	Ac-225	$2,740 \cdot 10^{-2}$	Ac-227	$2,1773 \cdot 10^1$
Sm-151	$9,300 \cdot 10^1$			Th-227	$5,130 \cdot 10^{-2}$
Eu-154	$8,606 \cdot 10^0$			Ra-223	$3,130 \cdot 10^{-2}$

* Für die Halbwertszeiten von Se-79 und Sn-126 liegen neue Messwerte vor. In den Rechnungen zu ISIBEL wurde mit den alten, in der Tabelle angegebenen Werten gerechnet, um die Ergebnisse mit früheren Rechnungen vergleichen zu können. Die neuen Halbwertszeiten sind: Se-79: $3,27 \cdot 10^5$ a /JÖR 10/ und Sn-126: $1,98 \cdot 10^5$ a /BIE 09/.

Tab. 3.15 Inventare der einzelnen Abfallarten zu Beginn der Nachverschlussphase (Zeitpunkt 40,6 Jahre nach Beginn der Einlagerung im Jahre 2035) /LAR 13/ (Gesamtinventar; bei Brennelementen umgerechnet auf das Inventar pro Behälter)

Nuklid	Strukturteile [Bq]	DWR-/SWR-/WWER-Brennelemente [Bq pro Behälter]	CSD-V [Bq]	Sonstige radioaktive Mischabfälle [Bq]	Urantails [Bq]	Graphitabfälle [Bq]
Be-10	1,35·10 ⁰⁷	6,89·10 ⁰⁷	4,01·10 ¹⁰	0,0	0,0	0,0
C-14	6,23·10 ¹²	1,86·10 ¹¹	6,63·10 ¹³	2,94·10 ¹²	0,0	2,78·10 ¹⁴
Cl-36	2,32·10 ¹¹	5,34·10 ⁰⁹	1,88·10 ¹²	7,67·10 ⁰⁹	0,0	5,80·10 ¹⁰
Ca-41	7,46·10 ⁰⁹	2,96·10 ⁰⁸	1,41·10 ¹¹	0,0	0,0	0,0
Ni-59	4,03·10 ¹⁴	1,04·10 ¹²	3,19·10 ¹¹	8,85·10 ¹²	0,0	0,0
Ni-63	3,76·10 ¹⁶	1,01·10 ¹⁴	2,73·10 ¹³	1,06·10 ¹⁵	0,0	0,0
Se-79	8,81·10 ⁰⁶	1,38·10 ¹⁰	8,53·10 ¹²	2,79·10 ⁰⁸	0,0	0,0
Rb-87	3,35·10 ⁰²	6,23·10 ⁰⁶	4,08·10 ⁰⁹	0,0	0,0	0,0
Sr-90	3,55·10 ¹¹	5,39·10 ¹⁵	2,02·10 ¹⁸	6,55·10 ¹⁴	0,0	3,19·10 ¹²
Zr-93	1,51·10 ¹²	5,67·10 ¹¹	3,41·10 ¹⁴	2,48·10 ¹¹	0,0	0,0
Nb-94	9,66·10 ¹³	1,66·10 ¹²	5,71·10 ¹⁰	3,97·10 ⁰⁷	0,0	0,0
Mo-93	1,75·10 ¹²	2,30·10 ¹⁰	1,77·10 ¹¹	6,30·10 ⁰⁶	0,0	0,0
Tc-99	2,27·10 ¹¹	4,23·10 ¹²	2,64·10 ¹⁵	7,61·10 ¹¹	0,0	0,0
Pd-107	5,31·10 ⁰⁶	4,33·10 ¹⁰	1,97·10 ¹³	0,0	0,0	0,0
Ag-108m	4,46·10 ⁰⁶	1,96·10 ¹⁰	1,33·10 ¹³	0,0	0,0	0,0
Sn-126	2,27·10 ⁰⁷	1,81·10 ¹¹	9,60·10 ¹³	1,40·10 ¹⁰	0,0	0,0
I-129	9,98·10 ⁰⁵	8,99·10 ⁰⁹	4,97·10 ¹²	3,25·10 ¹²	0,0	0,0
Cs-135	2,12·10 ⁰⁷	1,48·10 ¹¹	8,21·10 ¹³	9,79·10 ⁰⁹	0,0	0,0
Cs-137	8,86·10 ¹¹	9,04·10 ¹⁵	3,08·10 ¹⁸	1,32·10 ¹⁵	0,0	6,93·10 ¹¹
Sm-147	2,16·10 ⁰²	1,43·10 ⁰⁶	1,12·10 ⁰⁹	0,0	0,0	0,0
Sm-151	1,83·10 ¹⁰	7,49·10 ¹³	3,49·10 ¹⁶	8,17·10 ¹¹	0,0	0,0
Ho-166m	9,25·10 ⁰³	4,03·10 ⁰⁸	8,18·10 ¹⁰	0,0	0,0	0,0
Ra-226	7,34·10 ⁰¹	1,89·10 ⁰⁶	5,33·10 ⁰⁸	1,29·10 ¹¹	2,07·10 ⁰⁹	0,0
Th-229	1,51·10 ⁰⁰	2,91·10 ⁰⁶	2,74·10 ⁰⁸	3,20·10 ⁰²	0,0	0,0
Th-230	6,87·10 ⁰³	1,65·10 ⁰⁸	1,56·10 ¹⁰	1,28·10 ⁰⁵	1,32·10 ¹¹	0,0
Th-232	3,84·10 ⁻⁰³	1,07·10 ⁰⁵	1,09·10 ⁰⁸	2,41·10 ¹¹	0,0	0,0
Pa-231	6,43·10 ⁰²	1,45·10 ⁰⁷	7,53·10 ⁰⁹	9,05·10 ⁰⁵	2,45·10 ¹⁰	0,0
U-232	2,23·10 ⁰⁴	1,09·10 ¹⁰	8,13·10 ⁰⁹	0,0	0,0	0,0
U-233	5,99·10 ⁰²	5,53·10 ⁰⁸	2,13·10 ¹⁰	8,90·10 ⁰⁵	0,0	0,0
U-234	1,59·10 ⁰⁷	4,19·10 ¹¹	9,19·10 ¹¹	3,37·10 ⁰⁹	1,99·10 ¹⁴	0,0
U-235	5,31·10 ⁰⁵	2,60·10 ⁰⁹	6,15·10 ⁰⁹	5,22·10 ⁰⁹	1,58·10 ¹³	0,0
U-236	1,64·10 ⁰⁶	6,46·10 ¹⁰	7,72·10 ¹⁰	1,13·10 ¹⁰	0,0	0,0
U-238	1,71·10 ⁰⁷	5,95·10 ¹⁰	9,11·10 ¹⁰	8,14·10 ¹⁰	1,18·10 ¹⁵	0,0
Np-237	4,08·10 ⁰⁶	1,33·10 ¹¹	6,29·10 ¹³	2,52·10 ¹⁰	0,0	0,0

Nuklid	Strukturteile [Bq]	DWR-/SWR-/WWER-Brennelemente [Bq pro Behälter]	CSD-V [Bq]	Sonstige radioaktive Mischabfälle [Bq]	Urantails [Bq]	Graphitabfälle [Bq]
Pu-238	$1,00 \cdot 10^{10}$	$1,29 \cdot 10^{15}$	$2,04 \cdot 10^{15}$	$1,41 \cdot 10^{14}$	0,0	0,0
Pu-239	$7,36 \cdot 10^{10}$	$9,65 \cdot 10^{13}$	$4,09 \cdot 10^{14}$	$1,60 \cdot 10^{13}$	0,0	0,0
Pu-240	$5,16 \cdot 10^{10}$	$2,13 \cdot 10^{14}$	$1,14 \cdot 10^{15}$	$2,43 \cdot 10^{13}$	0,0	0,0
Pu-242	$4,13 \cdot 10^{07}$	$1,29 \cdot 10^{12}$	$2,13 \cdot 10^{12}$	$4,56 \cdot 10^{10}$	0,0	0,0
Pu-244	$8,99 \cdot 10^{01}$	$1,49 \cdot 10^{08}$	$8,45 \cdot 10^{09}$	$8,10 \cdot 10^{06}$	0,0	0,0
Am-241	$3,06 \cdot 10^{11}$	$1,90 \cdot 10^{15}$	$1,55 \cdot 10^{17}$	$1,83 \cdot 10^{14}$	0,0	0,0
Am-242m	$2,85 \cdot 10^{08}$	$6,28 \cdot 10^{12}$	$8,42 \cdot 10^{14}$	$6,07 \cdot 10^{10}$	0,0	0,0
Am-243	$9,32 \cdot 10^{07}$	$1,68 \cdot 10^{13}$	$2,76 \cdot 10^{15}$	$1,34 \cdot 10^{11}$	0,0	0,0
Cm-245	$5,52 \cdot 10^{04}$	$7,26 \cdot 10^{11}$	$2,41 \cdot 10^{13}$	$9,02 \cdot 10^{08}$	0,0	0,0
Cm-246	$3,31 \cdot 10^{03}$	$1,19 \cdot 10^{11}$	$3,41 \cdot 10^{12}$	0,0	0,0	0,0
Cm-247	$1,86 \cdot 10^{-03}$	$6,60 \cdot 10^{05}$	$8,89 \cdot 10^{06}$	0,0	0,0	0,0
Cm-248	$1,11 \cdot 10^{-03}$	$1,70 \cdot 10^{06}$	$1,70 \cdot 10^{07}$	0,0	0,0	0,0
Ac-227	$3,45 \cdot 10^{02}$	$1,13 \cdot 10^{07}$	$7,05 \cdot 10^{09}$	$1,09 \cdot 10^{05}$	$1,51 \cdot 10^{10}$	0,0
Gesamt	$3,81 \cdot 10^{16}$	$1,82 \cdot 10^{16}$	$5,30 \cdot 10^{18}$	$3,42 \cdot 10^{15}$	$1,40 \cdot 10^{15}$	$2,82 \cdot 10^{14}$

In Tabelle 3.16 sind alle weiteren Parameter zusammengestellt, die in den deterministischen Modellrechnungen verwendet wurden.

Tab. 3.16 Sonstige Parameter (Nahfeld)

Parameter	Wert	Dimension
Lebensdauer eines Containers	0	a
Lebensdauer eines Behälters mit Strukturteilen	500	a
Erdbeschleunigung	9,81	m/s ²
Atmosphärendruck	0,1	MPa
geothermischer Gradient	0,03	K/m
mittlere Dichte von Steinsalz	2.300	kg/m ³
mittlere Dichte der Grubenlösung	1.200	kg/m ³
dynamische Viskosität der Grubenlösung	0,0015	Pa·s
Gebirgstemperatur auf Referenzteufe	310	K
hydrostatischer Druck auf Referenzteufe	11,5	MPa
Gebirgsdruck auf Referenzteufe	20,8	MPa
Exponent in Druckfunktion	4	-
Diffusionskoeffizient	$1,5 \cdot 10^{-9}$	m ² /s
Aktivierungsenergie in Diffusionsterm	2.230	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. Im Vorhaben VSG /LAR 13/ wurde als Dispersionslänge ein Wert von 0,05 m verwendet. Eine Rückhaltung im Grubengebäude durch Sorption wurde nicht berücksichtigt, Löslichkeitsgrenzen wurden aber überall verwendet, siehe die Werte in Tabelle 3.17.

Tab. 3.17 Maximale Elementkonzentrationen im Grubengebäude

Element	Maximale Konzentration [mol/m ³]
C, Cl, Ca, Co, Ni, Se, Sr, Nb, Mo, Pd, Sn, I, Cs, Pb, Po, Ra, Pa, Cm	(unbegrenzt)
Sm, Am	$7,65 \cdot 10^{+0}$
Np	$7,52 \cdot 10^{-2}$
Pu	$2,4 \cdot 10^{-3}$
U	$7,55 \cdot 10^{-1}$
Th	$2,33 \cdot 10^{-1}$
Zr	$9,15 \cdot 10^{-2}$
Tc	$9,92 \cdot 10^{-2}$

Im Vorhaben VSG /LAR 13/ wurde als Feuchtigkeit in den Richtstrecken ein Wert von 0,6 % verwendet. In den vorliegenden Rechnungen wurde dieser Wert auf 0,5 % gerundet. Tabelle 3.18 zeigt im Vergleich die Werte für die Beziehung zwischen der Porosität und Permeabilität von versetzten Strecken für beide Vorhaben.

Tab. 3.18 Parameter für die Beziehung zwischen Porosität und Permeabilität

Parameter	VSG	ISIBEL
Endwert der Porosität	0,01	0,01
Permeabilitätssprung bei Erreichen des Endwerts	$1 \cdot 10^{-22} \text{ m}^2$	(ohne)
Parameter (Vorfaktor)	$4,86 \cdot 10^{-10}$	$4,86 \cdot 10^{-10}$
Exponent	4,714	4,714

In den probabilistischen Rechnungen wurde ein älterer Wert ($2,0 \cdot 10^{-9}$) für den Vorfaktor in der Permeabilitäts-Porositäts-Relation verwendet, siehe Tabelle 3.21. Daher wurde in einer Testrechnung untersucht, ob der Wert des Vorfaktors die Ergebnisse in relevanter Weise verändert. Mit einem Wert von $4,86 \cdot 10^{-10}$ anstelle von $2,0 \cdot 10^{-9}$ sind die berechneten Werte des RGI im zeitlichen Verlauf generell etwas niedriger (ca. einen Faktor 2 bis 5), die Maximalwerte zu späten Zeiten sind jedoch nahezu gleich. In den probabilistischen Rechnungen mit dem höheren Vorfaktor sind die berechneten Konsequenzen daher eher konservativ.

Tab. 3.19 Parameter für Verschlussbauwerke

Parameter	Wert
Standzeit Schachtverschluss	50.000 a
Standzeit Streckenverschluss	50.000 a
Permeabilität eines Verschlusses während der Standzeit	$1 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$
Permeabilität eines Verschlusses nach der Standzeit	$1 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$
Länge eines Verschlusses	150 m

Für den Basisfall wird angenommen, dass nach Überschreiten der Standzeit die Verschlussbauwerke nicht mehr ihre anfängliche Dichtwirkung haben werden. Im Modell nimmt dabei die Permeabilität der Bauwerke um zwei Größenordnungen zu. Im Vorhaben VSG wurden die Permeabilitäten der einzelnen Komponenten eines Schachtverschlusses getrennt betrachtet und bei Versagen der Komponente um jeweils drei Größenordnungen erhöht.

3.1.1.2 Biosphäre

In der vereinfachten radiologischen Langzeitaussage wird keine Strahlenexposition in der Biosphäre, sondern gemäß /MÖN 12/ ein radiologischer Geringfügigkeitsindex (RGI) am Rand des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs (ewG) berechnet.

Eine vereinfachte radiologische Langzeitaussage für in Lösung befindliche Radionuklide ist gemäß /BMU 10/ zulässig, wenn rechnerisch gezeigt werden kann, dass die jährlich aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich freigesetzten radioaktiven Stoffe bei einer Referenzgruppe von 10 Personen der Bevölkerung höchstens zu 0,1 Personen-Millisievert pro Jahr für wahrscheinliche und höchstens zu 1 Personen-Millisievert pro Jahr für weniger wahrscheinliche Entwicklungen führen.

Für die Bewertung der Ergebnisse wird der Indikator RGI verwendet, der aus den jährlichen Radionuklidströmen S_i [Bq/a] über den Rand des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, d. h. bei Undurchlässigkeit der geologischen Barriere im einschlusswirksamen Gebirgsbereich lediglich über die geotechnischen Verschlussbauwerke am Rand des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs, berechnet wird. Dieser Radionuklidstrom wird auf die jährlich geschöpfte Wassermenge [m³/a] des Versorgungsbrunnens für das Kollektiv von 10 Erwachsenen verteilt.

Mit Hilfe von nuklidspezifischen Dosiskonversionsfaktoren DKF_i [Sv/a / Bq/m³] und dem Bezugswert für eine geringfügige Freisetzung K_{RGI} [Sv/a] ergibt sich daraus die Berechnungsvorschrift

$$RGI = \frac{10 \cdot \sum_i S_i \cdot DKF_i}{W \cdot K_{RGI}}$$

Bei einem Wert $RGI \leq 1$ ist die Freisetzung geringfügig.

Die Berechnung des RGI -wertes wurde im Rahmen des Vorhabens VSG wie folgt konkretisiert:

- Die Wassermenge W , in der die Radionuklide verteilt werden, beträgt 5.000 m³ pro Jahr für ein Kollektiv von 10 Erwachsenen.
- Die nuklidspezifischen Dosiskonversionsfaktoren DKF_i werden unter Verwendung der Dosisfaktoren gemäß der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift /BMU 12/ und eines geeigneten Biosphärenmodells ermittelt.
- Der Bezugswert für eine geringfügige Freisetzung K_{RGI} beträgt für wahrscheinliche Szenarien 0,1 Personen-Millisievert pro Jahr, für weniger wahrscheinliche Szenarien 1 Personen-Millisievert pro Jahr /BMU 10/.

Die bei der Berechnung verwendeten Dosiskonversionsfaktoren wurden dem Bericht /PRÖ 02/ entnommen und sind in Tabelle 3.20 angegeben.

Tab. 3.20 Dosiskonversionsfaktoren (DKF) in [Sv/a pro Bq/m³] gemäß /PRÖ 02/, zitiert nach /LAR 13/

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	$2,0 \cdot 10^{-9}$	Pu-240	$9,6 \cdot 10^{-7}$	Am-242m	$7,6 \cdot 10^{-7}$
Ni-59	$4,9 \cdot 10^{-9}$	U-236	$5,6 \cdot 10^{-7}$	U-238	$7,1 \cdot 10^{-7}$
Ni-63	$1,1 \cdot 10^{-9}$	Th-232	$1,1 \cdot 10^{-4}$	Pu-238	$7,5 \cdot 10^{-7}$
Se-79	$3,4 \cdot 10^{-7}$	U-232	$5,4 \cdot 10^{-6}$	U-234	$1,4 \cdot 10^{-6}$
Rb-87	$1,3 \cdot 10^{-7}$	Cm-245	$1,4 \cdot 10^{-6}$	Th-230	$3,7 \cdot 10^{-5}$
Sr-90	$1,8 \cdot 10^{-7}$	Am-241	$8,0 \cdot 10^{-7}$	Ra-226	$3,0 \cdot 10^{-5}$
Zr-93	$3,7 \cdot 10^{-8}$	Np-237	$4,7 \cdot 10^{-6}$	Cm-247	$2,9 \cdot 10^{-6}$
Mo-93	$3,2 \cdot 10^{-7}$	U-233	$3,9 \cdot 10^{-6}$	Am-243	$2,0 \cdot 10^{-6}$
Nb-94	$3,1 \cdot 10^{-6}$	Th-229	$1,7 \cdot 10^{-5}$	Pu-239	$9,8 \cdot 10^{-7}$
Tc-99	$8,8 \cdot 10^{-9}$			U-235	$3,3 \cdot 10^{-6}$
Pd-107	$1,9 \cdot 10^{-9}$			Pa-231	$4,0 \cdot 10^{-5}$
Sn-126	$1,6 \cdot 10^{-5}$			Ac-227	$1,0 \cdot 10^{-5}$
I-129	$5,6 \cdot 10^{-7}$				
Cs-135	$5,7 \cdot 10^{-8}$				
Cs-137	$9,5 \cdot 10^{-7}$				
Sm-151	$3,2 \cdot 10^{-10}$				

3.1.2 Probabilistische Daten für den Referenzfall

Die Auswahl der Parameter sowie die Festlegung der Bandbreiten ist ein aufwändiges Unterfangen, das einen großen Abstimmungsbedarf in einem Genehmigungsverfahren 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, in dem methodische Aspekte der Umsetzung von Szenarien in Rechenfälle behandelt werden, wird dieser Schritt ausgelassen. Die Auswahl der Parameter sollte auf orientierenden Sensitivitätsanalysen (Screening) beruhen. In diesem Vorhaben wurden die Parameter auf der Grundlage der Erfahrungen von Sensitivitätsanalysen aus früheren sicherheitsanalytischen Bewertungen ausgewählt (Tab. 3.21). 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 vor-

handenen Instrumentariums. Für einen realen Sicherheitsnachweis bedürfen die Verteilungen und Bandbreiten einer intensiven Diskussion, die im Rahmen des hier beschriebenen FuE-Vorhabens nicht geleistet werden kann. Dies betrifft z. B. die untere Begrenzung der Lebensdauer der Behälter.

Mit der Maßgabe, die wahrscheinliche Entwicklung mit dem Referenzfall möglichst vollständig abzudecken, wird die Anzahl der zu variierenden Parameter für Rechnungen in einem Genehmigungsverfahren wahrscheinlich deutlich größer als in diesem Vorhaben sein. Bei Ungewissheitsanalysen kann prinzipiell mit einer beliebigen Anzahl ungewisser Parameter gearbeitet werden. Das führt allerdings nur dann zu aussagekräftigen Ergebnissen, wenn die angenommenen Verteilungen tatsächlich als repräsentativ anzusehen sind. Dann ist auch die Verteilung der Modellausgabewerte repräsentativ. Wenn man jedoch wenig über die Ungewissheiten der Parameter weiß und dementsprechend große Bandbreiten für viele Parameter wählt, ergibt sich typischerweise eine breite, gaußähnliche Verteilung mit deutlich ausgeprägtem Zentrum, die eine signifikante Bewertung der Ungewissheit kaum erlaubt. Deshalb wurde für die Rechnungen im Vorhaben ISIBEL-II mit einer relativ kleinen Anzahl von Parametern gearbeitet, die entsprechend der Erklärung zu Beginn von Kapitel 3.1 alle als gleichverteilt innerhalb ihrer „wahrscheinlichen“ Grenzen angenommen wurden, siehe Tabelle 3.21.

Tab. 3.21 Parameter, Bandbreiten und Verteilungen für das Referenzszenarium

Parameter	Untere Grenze	Obere Grenze	Verteilung
Zeitpunkt Versagen des Schachtverschlusses [a]	40.000	60.000	gleich
Zeitpunkt Versagen des Streckenverschlusses RS-VO [a]	40.000	60.000	gleich
Anfangs-Feuchtigkeit in Versatz (Richtstrecken) [%]	0,4	0,6	gleich
Endwert der Porosität in versetzten Strecken	0,01	0,02	gleich
Trockenkonvergenzrate [a ⁻¹]	0,007 (0,095) *	0,013 (0,105) *	gleich
Erhöhung der Konvergenz durch Feuchte (Faktor * x _F)	0,9	1,1	gleich
Löslichkeitsgrenzen (Faktor)	0,75	1,25	gleich
Diffusionskoeffizient [m ² /s]	1,0·10 ⁻⁹	2,0·10 ⁻⁹	gleich
Vorfaktor in PPB	1,5·10 ⁻⁹	2,5·10 ⁻⁹	gleich
Behälterlebensdauer Pollux [a]	400	600	gleich
Mobilisierungsrate LWR-BE, Metall [a ⁻¹]	3,2·10 ⁻³	4,0·10 ⁻³	gleich
Mobilisierungsrate LWR-BE, Brennstoff-Matrix [a ⁻¹]	8,0·10 ⁻⁷	1,25·10 ⁻⁶	gleich
Reaktionsrate Glas [kg/m ² /a]	0,35	0,38	gleich
Länge der Abdichtungen [m]	140	160	gleich
Permeabilität Abdichtungen [m ²]	5·10 ⁻¹⁸	2·10 ⁻¹⁷	gleich

^{*)} In Klammern Werte für schnellere Konvergenz. Wie in Kapitel 3.1.1 angesprochen, werden diese Parameter für Variantenbetrachtungen verwendet.

Von den in den Tabellen angeführten unabhängigen Parametern hängen viele weitere Modellparameter ab. Zum Beispiel gilt die Anfangs-Feuchtigkeit im Versatz der Richtstrecken für alle Bereiche aller Richtstrecken, 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, auch wenn z. B. für die Permeabilitäts-Porositäts-Beziehung (PPB) eine Korrelation zwischen dem Vorfaktor (siehe obige Tabelle) und dem Exponenten (hier nicht statistisch variiert) bekannt ist /MÜL 99/.

Zur Beschreibung des Konvergenzprozesses werden gemäß Tabelle 3.21 zwei Parameter unabhängig variiert, die Trockenkonvergenzrate und der Faktor für das Feuchte-kriechen. Mit dieser Vorgehensweise wird nicht die Parameterbandbreite, die sich aus der Ungewissheit der Kriechklasse, bzw. aus den gebirgsmechanischen Rechnungen ergibt, abgebildet. Es soll hier nur untersucht werden, ob der Konvergenzprozess einen relevanten Einfluss auf die Konsequenzen hat oder nicht. In einem konsistenten Vorgehen müssten die Eingangsparameter der gebirgsmechanischen Rechnungen variiert werden und aus den Ergebnissen von Monte-Carlo-Simulationen die Bandbreiten der LOPOS-Parameter ermittelt werden. Wegen der großen Rechenzeiten für gebirgsmechanische Rechnungen ist ein solches Vorgehen im Vorhaben ISIBEL-II nicht möglich. Wie die Bandbreite der Konvergenzparameter für LOPOS in probabilistischen Rechnungen in Zukunft abgebildet werden soll, ist eine offene Frage.

3.2 Umsetzung der Alternativszenarien

Alternativszenarien setzen auf dem Referenzszenarium auf, die Szenarien verändern sich durch Berücksichtigung von weniger wahrscheinlichen FEP bzw. von weniger wahrscheinlichen Ausprägungen wahrscheinlicher FEP sowie die Bewertung der in das Referenzszenarium eingehenden Prämissen. Das bedeutet, dass das für das Referenzszenarium erstellte Modell und dessen Parameterverteilung Ausgangspunkte für die Umsetzung der Alternativszenarien in Rechenfälle sind. Es gilt dann zu bewerten:

- Kann der Rechenfall zum Referenzszenarium für die Umsetzung des Alternativszenariums übernommen werden?
- Wenn ja, welche Parameter müssen geändert werden?
- Wie sieht die Bandbreite für die geänderten Parameter aus?

Im Folgenden wird für alle Szenarien der VSG geprüft, welche Rechenfälle notwendig sind, um die radiologischen Konsequenzen von Alternativszenarien berechnen zu können. Zunächst ist der Zustand der Barrieren durch die Integritätsanalyse zu prüfen. Danach sind folgende Fälle zu unterscheiden (Abb. 3.4):

1. Die Integritätsanalyse zeigt die Funktionsfähigkeit der Barrieren (z. B. keine neuen Wegsamkeiten im Wirtsgestein). Die gegenüber dem Referenzszenarium geänderte Systementwicklung hat keine Auswirkungen auf den Rechenfall zur radiologischen Konsequenzenanalyse. Das Modell des Referenzfalls und dessen

Parameter sind weiterhin gültig, daher lässt sich das Alternativszenarium durch den Referenzfall (R-0) abdecken.

2. Die Integritätsanalyse zeigt die Funktionsfähigkeit der Barrieren. Die gegenüber dem Referenzszenarium geänderte Systementwicklung hat Auswirkungen auf den Rechenfall zur radiologischen Konsequenzenanalyse: Das Modell des Referenzfalls ist weiterhin gültig, die Parameter müssen allerdings angepasst werden. Das Alternativszenarium kann in einen alternativen Rechenfall (A-x) zur radiologischen Konsequenzenanalyse umgesetzt werden (2a).

Es ist zu prüfen, ob dieser Rechenfall durch einen anderen Rechenfall (A-n) bereits abgedeckt ist (2b).

3. Die Integritätsanalyse zeigt die Funktionsfähigkeit der Barrieren nicht. Es ergibt sich ein neuer Rechenfall (A-y). Die Verletzung der Integrität (insbesondere der geologischen Barriere) führt zu einer signifikant veränderten Systementwicklung, so dass davon auszugehen ist, dass dieser neue Rechenfall weder durch R-0 noch durch einen anderen vorhandenen Rechenfall abgedeckt werden kann.

Wie bereits im Fall des Referenzszenariums begründet, wird auch für weniger wahrscheinliche Parameter bzw. deren Ausprägungen eine Gleichverteilung für die Konsequenzenanalyse verwendet. Zusätzliche probabilistische Rechnungen mit anderen, begründbaren Verteilungen (z. B. Normal- oder Dreiecksverteilung) können darüber hinaus wertvolle Argumente in einem Langzeitsicherheitsnachweis liefern. Da Alternativszenarien zum Ziel haben, Szenarienungewissheiten abzubilden, sind deterministische Rechnungen mit Best-Estimate-Werten wenig aussagekräftig.

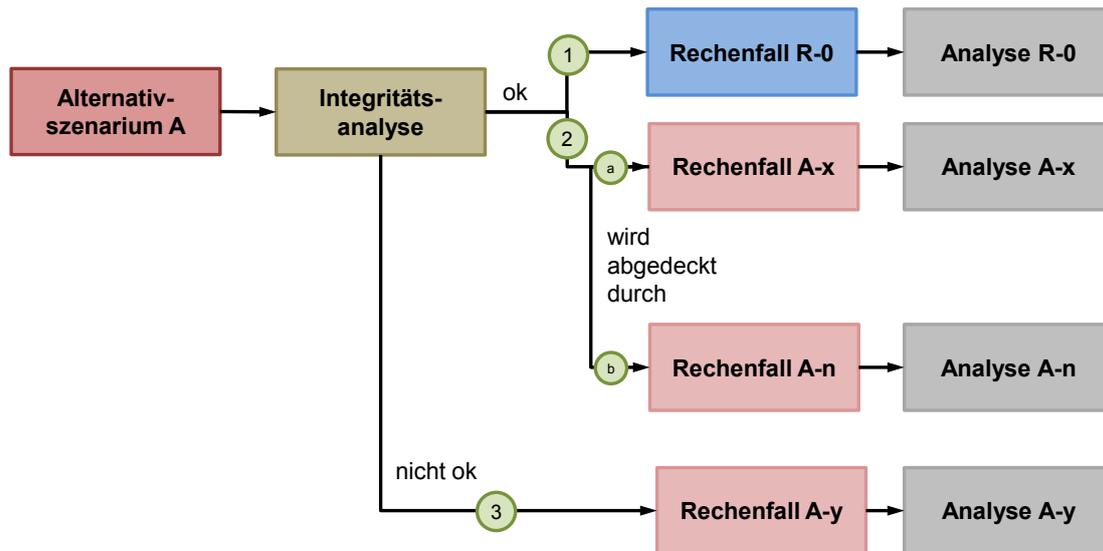


Abb. 3.4 Fallunterscheidungen zur Umsetzung von Alternativszenarien in Rechenfälle

Im Folgenden werden die Alternativszenarien der VSG an diesem Schema geprüft, um einen Satz von Rechenfällen für die radiologische Konsequenzenanalyse zu erhalten. Integritätsanalysen sind nicht Gegenstand des Vorhabens ISIBEL. Es wird unterstellt, dass die Analyse keine Integritätsverletzung ergibt, die die Ableitung der Rechenfälle beeinflusst, also der Fall 1 eintritt.

3.2.1 Alternative Betrachtungen zu spezifischen Annahmen

Die Alternativszenarien aus den alternativen Betrachtungen zu spezifischen Annahmen sind in Tabelle 2.7 zusammengestellt. Diese werden gemäß der in Kapitel 3.2 skizzierten Vorgehensweise wie folgt in Rechenfälle umgesetzt:

A1a1: Alternativszenarien zur Rinnenbildung können nach /BEU 12/ maximal zu einer Erosionsleistung im Salzstock von 50 m beitragen. Berücksichtigt man (voraussetzende) Subrosion, können lokal 200 bis 250 m des Salzes abgetragen werden; es bleiben noch Mächtigkeiten von mindestens 300 m. Rechenfall: **Referenzfall (R-0)**; Auswirkungen auf Wirtsgestein sind in einer Integritätsanalyse zu prüfen.

A1a2: Ein alternativer Rechenfall ergibt sich aus der Annahme, dass der Schachtverschlüsse bei einer Rinne mit einer Erosionsleistung im Lockergestein von 600 m nach ca. 480.000 Jahren komplett erodiert wird und damit keine Widerstände gegenüber ei-

nem Lösungszutritt aufweist, siehe Tabelle 3.22. **Rechenfall: A1a2-1**, wird in diesem Bericht nicht berechnet, da die Annahmen zur Ausprägung der Schachtverschlussentwicklung im Rechenfall zu Szenarium A1w1 ungünstiger sind.

Tab. 3.22 Zeitpunkt des Totalversagens des Schachtverschlusses (A1a2)

Parameter	Best Estimate	Untere Grenze	Obere Grenze	Verteilung
Zeitpunkt „Totalversagen“ Schachtverschluss [a]	480.000	n.a.	n.a.	n.a.

A1a3/A1a4: Die Verringerung des Sicherheitsabstands zu den potenziell lösungsführenden Gesteinen (Planung 50 m) aufgrund von fehlinterpretierten Erkundungsergebnissen im Übergangsbereich z2/ z3 und eventuell vereinzelt, unentdeckte offene Klüfte werden durch eine höhere initiale Lösungsmenge im Infrastrukturbereich berücksichtigt. **Rechenfall: A1a3a4-1**, wird durch den Rechenfall zur weniger wahrscheinlichen Ausprägung der Fluidvorkommen im Wirtsgestein (A1i6-1) abgedeckt.

A1a5: Zwischen der Erkundungssohle und der Einlagerungssohle bestehen aufgrund von Spannungsänderungen Wechselwirkungen, die die Entwicklung des Endlagersystems beeinflussen. Mehrere Auswirkungen sind denkbar, vor allem aber Auswirkungen auf die Konvergenz. **Rechenfall: A1a5-1**, wird durch den Rechenfall zur weniger wahrscheinlichen Ausprägung der Konvergenz (A1i3-1) abgedeckt.

3.2.2 Weniger wahrscheinliche Ausprägungen der Initial-FEP

A1i1: Alternativszenarien zur Rinnenbildung können maximal zu einer Erosionsleistung im Salzstock von 50 m beitragen. Berücksichtigt man (voraussetzende) Subrosion, können lokal 200 bis 250 m des Salzes abgetragen werden; es bleiben noch Mächtigkeiten von mindestens 300 m. Der Rechenfall **A1i1** wird vom **Referenzfall (R-0)** abgedeckt. Die Auswirkungen auf Wirtsgestein sind in einer Integritätsanalyse zu prüfen.

A1i2: Obwohl die POLLUX-Behälter eine zu gewährleistende Funktionsdauer von 500 Jahren haben, muss bei allen Fertigungs- und Prüfverfahren eine Fehlerquote unterstellt werden. Für das Referenzszenarium wird in /BEU 12/ in Anlehnung an Untersuchungen in anderen Endlagerprojekten eine Fehlerquote von 0,1 % angenommen. Unter Berücksichtigung der eingelagerten Anzahl von POLLUX-Behältern wird für die

weniger wahrscheinliche Ausprägung der initiale Ausfall von sechs POLLUX- und drei CASTOR-Behältern mit unentdeckten Defekten unterstellt. Welche Behälter betroffen sind, kann nicht angegeben werden, so dass zahlreiche (n) Rechenfälle aus dieser Annahme resultieren und dementsprechend in einer Sicherheitsanalyse geprüft werden müssen. Diese Auswertung ist nicht Gegenstand des Vorhabens ISIBEL-II und wurde in den weiteren Rechnungen nicht berücksichtigt. **Rechenfälle: A1i2-n.**

A1i3: In einer zum Referenzszenarium alternativen Betrachtung zur Konvergenz muss der Einfluss einer in weniger wahrscheinlicher Ausprägung vorliegenden Kriechklasse auf die potenzielle Freisetzung von Radionukliden untersucht werden. Hierzu kann entweder eine verlangsamte Konvergenz oder eine beschleunigte Konvergenz betrachtet werden. Wie in Kapitel 3.1.2 bereits ausgeführt, ist für jede Rechnung mit einer geänderten Konvergenz ein kompletter Parameter-Fit erforderlich, um die Eingangsparameter der integrierten Analysen an die Ergebnisse gebirgsmechanischer Rechnungen anzupassen. Es reicht zum Beispiel nicht aus, nur die Trockenkonvergenzrate in einer Bandbreite zu variieren. Es liegt derzeit noch kein erprobtes Vorgehen vor, wie die Bandbreiten der Gesteinseigenschaften in eine Bandbreite der Modellparameter überführt werden können. Daher konnte für dieses Alternativszenarium keine Rechnung durchgeführt werden. In zukünftigen Analysen müsste untersucht werden, wie die Rechnungen parametrisiert werden können, um einer probabilistischen Umsetzung von Szenarien gerecht zu werden. **Rechenfall: A1i3-1.**

A1i4: Durch die stärkere Korrosion der Metalle ergeben sich eine stärkere Gasbildung von Wasserstoff und eine Volumenzunahme der korrodierten Metalle durch Korrosionsprodukte. Bei der Korrosion aktivierter Metallteile kommt es weiterhin zu einer verstärkten Radionuklidmobilisierung. Im Falle der Korrosion von Brennelement-Behältern kann es zu vermehrten Behälterausfällen als im Referenzszenarium kommen. Die Sorption und Desorption sowie das geochemische Milieu im Grubengebäude können beeinflusst werden. Aus den weniger wahrscheinlichen Ausprägungen der Metallkorrosion lassen sich mehrere Rechenfälle konstruieren, die mit dem Behälterausfall und der Mobilisierung zusammenhängen. Beide Fragestellungen wurden Rahmen der Arbeiten von ISIBEL-II nicht untersucht. **Rechenfälle: A1i4-n.**

A1i5: Die Ausprägung der Spannungsänderung und Spannungsumlagerung wird in geomechanischen Rechnungen ermittelt. Die weniger wahrscheinliche Ausprägung des FEP ergibt sich aus den weniger wahrscheinlichen Ausprägungen seiner auslösenden und beeinflussenden FEP, die für das Referenzszenarium im Anhang A be-

schrieben sind. Für die auslösenden und beeinflussenden FEP, die Initial-Barrieren direkt beeinträchtigen, wie z. B. Fluiddruck, Konvergenz oder Glaziale Rinnenbildung, sind die weniger wahrscheinlichen Ausprägungen in den entsprechenden Abschnitten beschrieben. Für die Eisauflast ist keine weniger wahrscheinliche Ausprägung zu betrachten, da im Referenzszenarium R1 bereits ein repräsentativer Bereich bis 1.500 m berücksichtigt wird. Von den anderen FEP werden die klimatischen FEP mit Inlandvereisung und die Thermische Expansion und Kontraktion als Folge der Wärmeproduktion als maßgeblich für eine weniger wahrscheinliche Ausprägung des FEP Spannungsänderung und Spannungsumlagerung angesehen. Dabei sind weniger wahrscheinliche Randbedingungen zur Temperaturentstehung zu betrachten. Der Rechenfall **A1i5** wird vom **Referenzfall (R-0)** abgedeckt. Die Auswirkungen auf Wirtsgestein und geotechnische Barrieren sind in einer Integritätsanalyse zu prüfen.

A1i6: Im Referenzszenarium werden als wahrscheinliche Ausprägung einzelne Lösungsvorkommen im z3 mit maximal 5.100 m³ Volumen angenommen. Es wird in /BEU 12/ als weniger wahrscheinliche Ausprägungen angenommen, dass entweder zwei Fluidvorkommen mit der Größe der wahrscheinlichen Ausprägung als verbunden betrachtet werden können oder zwei Fluidvorkommen mit der Größe der wahrscheinlichen Ausprägung an unterschiedlicher Stelle zum Infrastrukturbereich zutreten können. Aufgrund beider Annahmen ergibt sich als weniger wahrscheinliche Ausprägung, dass insgesamt eine Lösungsmenge von 10.200 m³ in den Infrastrukturbereich zutritt. Da es sich bei der Änderung um den Zutritt aus einem zweiten Bereich handelt, wird hier ein Repräsentativwert verwendet. In den Modellrechnungen wird dies durch ein Flüssigkeitsvolumen von 10.200 m³ umgesetzt, das sich von Beginn an im Infrastrukturbereich befindet (siehe Tabelle 3.23). Rechenfall: **A1i6-1**

Tab. 3.23 Erhöhtes Lösungsvolumen im Infrastrukturbereich (A1i6)

Parameter	Wert
Lösungsvolumen in INFRA-B zu Beginn [m ³]	10.200

A1i7: Als weniger wahrscheinliche Ausprägung des FEP Thermochemische Sulfatreduktion wird unter Berücksichtigung der weniger wahrscheinlichen Ausprägung des FEP Kohlenwasserstoffvorkommen im Wirtsgestein angenommen, dass größere Anteile der im Salzgestein vorhandenen Sulfatmengen thermochemisch umgewandelt werden können. **Referenzfall (R-0)**; Auswirkungen auf Wirtsgestein und geotechnische Barrieren sind in einer Integritätsanalyse zu prüfen.

A1i8: Als weniger wahrscheinliche Ausprägung des FEP Druckgetriebene Infiltration von Fluiden in das Salzgestein wird betrachtet, dass die Gasinfiltration bereits bei einem niedrigeren Druck als dem lithostatischen Druck in das Salzgestein hinein möglich ist. Als Schwellwert für den Beginn der Gasinfiltration wird ein Wert von 2 MPa unterhalb des lokalen lithostatischen Drucks angenommen. **Referenzfall (R-0);** Auswirkungen auf Wirtsgestein und geotechnische Barrieren sind in einer Integritätsanalyse zu prüfen.

A1i9: Als weniger wahrscheinliche Ausprägung wird angenommen, dass sich die Subrosion nicht mit der zunehmenden Tiefenlage des Salzspiegels verlangsamt, und es wird eine gesamte Subrosion von 100 m bis 200 m in einer Million Jahren angesetzt. Eine eventuelle selektive Ablaugung leichtlöslicher Minerale (voraussetzende Subrosion) ist in Zukunft nur zu erwarten, wenn und während es zur Bildung tiefer Rinnen kommt, die den Salzspiegel erreichen. **Referenzfall (R-0);** Auswirkungen auf Wirtsgestein und geotechnische Barrieren sind in einer Integritätsanalyse zu prüfen.

3.2.3 Weniger wahrscheinliche Ausprägung der Radionuklidmobilisierung und des Radionuklidtransportes

Aus den Alternativszenarien, die sich aus den weniger wahrscheinlichen Ausprägungen der Radionuklidmobilisierung und des Radionuklidtransportes ergeben, lassen sich mehrere Rechenfälle (A1m1-n) ableiten, siehe Tabelle **3.27**. Darunter sind andere Löslichkeiten von Radioelementen und andere Mobilisierungsraten. Auf diese Alternativszenarien wird in diesem Bericht nicht eingegangen, weil bereits eine ausreichende Anzahl von Szenarien untersucht wird, um das Instrumentarium zu testen. **Rechenfälle: A1m1-n.**

3.2.4 Weniger wahrscheinliche FEP

A1w1: Das Szenarium A1w1 geht von einem frühen Versagen des Gesamtsystems „Schachtverschluss“ aus. In Bezug auf das Versagen bleibt der Aufbau des Schachtverschlusses, bestehend aus einer Reihe von Komponenten wie Widerlager und Dichtelemente, unberücksichtigt. Durch das Versagen des Schachtverschlusses werden die hydraulischen Verhältnisse und damit der Lösungszutritt ins Grubengebäude beeinflusst. Das Alternativszenarium kann daher durch eine bereits zu frühen Zeitpunkten erhöhte integrale Permeabilität eines Schachtverschlusses abgebildet werden. Als

mögliche Werte der dabei anzusetzenden Permeabilität können solche für Auflockerungszonen, für Risse oder für poröse Medien mit größerer Porosität herangezogen werden. Falls das frühe Versagen des Schachtverschlusses durch eine erhöhte Durchlässigkeit der Auflockerungszone oder durch das Entstehen einer Auflockerungszone abgebildet wird, ist auch das Verheilen dieser Auflockerungszone zu betrachten.

Je nach beeinflussendem FEP kann ein Schachtverschluss zu frühen oder späten Zeiten versagen. Daher sind in diesem Alternativszenarium zwei Versagenszeitpunkte zu betrachten. Die Variante mit frühem Versagen – zu Beginn der Nachverschlussphase – ist dabei für die meisten Entwicklungsmöglichkeiten abdeckend, da ein frühes Zutreten von Lösungen in den Infrastrukturbereich die Wahrscheinlichkeit erhöht, dass die Lösungen bis in die Einlagerungsfelder vordringen. In Tabelle 3.24 sind die Parameterwerte für den Fall des frühen Versagens eines Schachtverschlusses angegeben.

Da die Auswirkungen eines späten Versagens anders sein können als bei frühem Versagen (z. B. aufgrund des Aufbaus von Gaspolstern im Grubengebäude), ist prinzipiell auch eine Variante zu betrachten, bei der der Schachtverschluss spät, aber noch vor dem Ende der vorgesehenen Funktionsdauer, versagt. Dies wird in der vorliegenden Studie aber nicht betrachtet. Es wird unterstellt, dass das frühe Versagen des Schachtverschlusses hinsichtlich der radiologischen Konsequenzen abdeckend ist. **Rechenfall: A1w1-1.**

A1w2: Für das frühe Versagen eines Streckenverschlusses gelten die gleichen Aussagen wie für einen Schachtverschluss. Es besteht die Möglichkeit, dass das Versagen des Streckenverschlusses an jenes des Schachtverschlusses gekoppelt ist, z. B. durch die vorliegenden hydrochemischen Verhältnisse. In diesem Fall wären die Parameterverteilungen für den Versagenszeitpunkt des Streckenverschlusses abhängig von jenem des Schachtverschlusses. Hier wurden die beiden Verteilungen der Parameterwerte jedoch unabhängig gewählt. In Tabelle 3.24 sind die Parameterwerte für den Fall des frühen Versagens des Streckenverschlusses RS-VO angegeben. **Rechenfall: A1w2-1.**

Tab. 3.24 Frühes Versagen von Abdichtungen (A1w1 und A1w2)

Parameter	untere Grenze	obere Grenze	Verteilung
Zeitpunkt des Versagens, Schachtverschluss [a]	0	10.000	gleich
Zeitpunkt des Versagens, Streckenverschluss [a]	0	10.000	gleich

3.3 What-if-Rechenfälle

Wie in Kapitel 2.3 ausgeführt, dienen die What-if-Rechenfälle dazu, das Verhalten des Endlagersystems besser zu verstehen, indem Parameterwerte und -konstellationen angenommen werden, die außerhalb realistischer Bandbreiten liegen, z. B. aufgrund von Randbedingungen, die sich bei der Szenarienanalyse als nicht plausibel darstellen. Als Beispiele werden folgende Rechenfälle untersucht:

- WIF-1: Rechenfall mit allen Parameteränderungen aus den Rechenfällen zu den Alternativszenarien A1i6-1, A1w1-1 und A1w2-1,
- WIF-2: geringerer Wert des Diffusionskoeffizienten,
- WIF-3: gemeinsames frühes Versagen von Schacht- und Streckenverschlüssen (d.h. Kombination A1w1-1 und A1w2-1) sowie die

Für WIF-2 wurde ein sehr kleiner Wert für den Diffusionskoeffizienten verwendet, der nicht auf Untersuchungen beruht, siehe Tabelle 3.25.

Tab. 3.25 Bandbreite des Diffusionskoeffizienten im Rechenfall WIF-2

Parameter	untere Grenze	obere Grenze	Verteilung
Diffusionskoeffizient [m ² /s]	1·10 ⁻¹¹	5·10 ⁻¹¹	gleich

Für WIF-3 werden die Parameterwerte für die beiden Alternativszenarien „frühes Versagen des Schachtverschlusses“ und „frühes Versagen der Streckenverschlüsse“ gemeinsam variiert.

3.4 Klassischer Ansatz

Die Ableitung von Szenarien mit definierten Wahrscheinlichkeitsklassen und deren Umsetzung in Rechenfälle ist eine neue Vorgehensweise bei der Durchführung von Sicherheitsanalysen und setzt die probabilistischen Werkzeuge anders ein als das in bisherigen Analysen der Fall war: Während nach dem neuen Ansatz einzelne, bezüglich der Wahrscheinlichkeit bereits klassifizierte, Szenarien untersucht und an den in den Sicherheitsanforderungen vorgegebenen Kriterien gemessen werden, 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 (siehe zum Beispiel /STO 88/). Mit einem solchen „globalen“ Rechenfall können Wahrscheinlichkeiten aus den Konsequenzen abgeleitet werden. Dieser Rechenfall wird im Folgenden als „klassischer“ Ansatz bezeichnet. Er wird zusätzlich zu den bereits beschriebenen Rechenfällen untersucht. Der Vergleich der Ergebnisse soll veranschaulichen, welche Unterschiede zum hier getesteten neuen Vorgehen auftreten. In Tabelle 3.26 sind die angenommenen Bandbreiten der Parameterwerte und die zugehörigen Verteilungsfunktionen angegeben. Gegenüber den Rechenfällen des Referenzszenariums und der Alternativszenarien sind die Bandbreiten meistens größer und es werden auch Dreiecks-, Normal- und logarithmische Verteilungen verwendet. Die Ergebnisse mit dem klassischen Ansatz ermöglichen weitere Einschätzungen, wie zuverlässig die mit der hier verfolgten Vorgehensweise erzielten Ergebnisse sind.

Tab. 3.26 Parameterverteilungen für den klassischen Ansatz mit gleichzeitiger Variation aller unabhängigen Variablen

Parameter	Untere Grenze	Obere Grenze	Verteilung
Zeitpunkt Versagen des Schachtverschlusses [a]	0	60.000 * 50.000	Dreieck
Zeitpunkt Versagen der Streckenverschlüsse [a]	0	60.000 * 50.000	Dreieck
Anfangs-Feuchtigkeit in Versatz (Richtstrecken) [%]	0,3	0,7 %	gleich
Endwert der Porosität in versetzten Strecken	0,007	0,03	gleich
Trockenkonvergenzrate [a ⁻¹]	0,002	0,018	gleich
Erhöhung der Konvergenz durch Feuchte (Faktor * x _F)	0,7	1,3	gleich
Löslichkeitsgrenzen (Faktor)	0,5	2,0	gleich
Diffusionskoeffizient [m ² /s]	2 · 10 ⁻¹⁰	5 · 10 ⁻⁹	log. normal
Vorfaktor in PPB	1 · 10 ⁻⁹	3 · 10 ⁻⁹	gleich
Behälterlebensdauer Pollux [a]	250	600	gleich
Mobilisierungsrate LWR-BE, Metall [a ⁻¹]	2,5 · 10 ⁻³	4,7 · 10 ⁻³	gleich
Mobilisierungsrate LWR-BE, Brennstoff-Matrix [a ⁻¹]	1 · 10 ⁻⁷	1 · 10 ⁻⁵	log. gleich
Reaktionsrate Glas [kg/m ² /a]	0,3	0,43	gleich
Länge der Abdichtungen [m]	140	160	gleich
Permeabilität Abdichtungen [m ²]	2 · 10 ⁻¹⁸	5 · 10 ⁻¹⁷	log. gleich

* Spitze der Dreiecksverteilung

3.5 Zusammenfassung

Aus den Szenarien der VSG lassen sich viele Rechenfälle ableiten, die es in einer Sicherheitsanalyse zu untersuchen gilt. In Tabelle 3.27 sind die Rechenfälle angegeben, die sich aus den 17 in Kapitel 3.2 angesprochenen Alternativszenarien ergeben. Bei einigen Rechenfällen ist durch Integritätsanalysen zu begründen, dass sie durch den Referenzfall (R-0) abgedeckt werden. Es zeigt sich, dass mindestens folgende Rechenfälle in einer radiologischen Konsequenzenanalyse betrachtet werden müssen:

1. **A1i2-n**: Initialer Ausfall von Brennelementbehältern
2. **A1i3-n**: Änderung des Konvergenzverhaltens
3. **A1i6-1**: Erhöhtes Lösungsvolumen im Infrastrukturbereich
4. **A1m1-n**: Veränderung der Radionuklidmobilisierung
5. **A1w1-1**: Erhöhte Permeabilität des Schachtverschlusses (Frühes Versagen)
6. **A1w2-1**: Erhöhte Permeabilität des Streckenverschlusses (Frühes Versagen)

Insbesondere die Fragestellungen zum Ausfall von Behältern mit initialen Defekten, der Mobilisierung von Radionukliden sowie der Konvergenz benötigen eine Vielzahl von Rechenfällen und beinhalten z. T. Fragestellungen mit starken Abhängigkeiten zwischen den Parametern, die detailliert untersucht werden müssen. Da im Vorhaben ISIBEL-II die Methodik zur Umsetzung von Szenarien in Rechenfälle im Vordergrund steht, beschränkt sich die Analyse der Szenarien auf folgende Rechenfälle:

- Deterministisch: **Basisfall** inkl. Varianten (Kap. 4.1.1),
- Probabilistisch:
 - **Referenzfall R-0** inkl. Varianten (Kap. 4.1.2),
 - alternativer **Rechenfall A1w1-1** (Kap. 4.2.1),
 - alternativer **Rechenfall A1w2-1** (Kap. 4.2.2),
 - alternativer **Rechenfall A1i6-1** (Kap. 4.2.3),
 - **What-if WIF-1** (Kap. 4.3.1),
 - **What-if WIF-2** (Kap. 4.3.2)
 - **What-if WIF-3** (Kap. 4.3.3) und
- **Klassischer Ansatz** (Kap. 3.4).

Tab. 3.27 Übersicht der abgeleiteten Rechenfälle

Kürzel Szenarium		Kürzel Rechenfall	Beschreibung des Rechenfalls
A1a1	Abstraktion	R-0	Integritätsanalyse
A1a2		A1a2-1 → A1w1-1	Erosion des Schachtverschlusses zur nächsten Kaltzeit Typ „Elster“
A1a3		A1a3a4-1 → A1i6-1	Lösungsvolumen einer Anhydritscholle fließt innerhalb des Infrastrukturbereiches zu
A1a4		A1a3a4-1 → A1i6-1	
A1a5		→ A1i3-1	Wechselwirkung Erkundungssohle und Einlagerungssohle →verlangsamte Konvergenz
A1i1		R-0	Integritätsanalyse
A1i2		A1i2-n	Erhöhte Anzahl an initial ausgefallenen Brennelement-Behältern
A1i3		A1i3-1	Verlangsamte Konvergenz (Kriechklassen -1)
		A1i3-2	Beschleunigte Konvergenz (Kriechklassen +1)
A1i4		A1i4-n → A1m1-3 → A1i2-n	Erhöhung der Mobilisierungsrate aus Metallteilen, Erhöhung der Gasbildungsrate, Erhöhung der Anzahl der Behälter, die vorzeitig versagen
A1i5		R-0	Nur Integritätsanalyse
A1i6		A1i6-1	Erhöhter initialer Lösungszutritt im Infrastrukturbereich
A1i7		R-0	Integritätsanalyse
A1i8		R-0	Integritätsanalyse
A1i9		R-0	Integritätsanalyse
A1m1		A1m1-1	Löslichkeiten im niedrigeren pH-Bereich
		A1m1-2	Löslichkeiten im höheren pH-Bereich
		A1m1-3	Erhöhung der Mobilisierungsraten
		A1m1-4	Erhöhung des IRF-Anteils
A1w1		A1w1-1	Erhöhung der Permeabilität des Schachtverschlusses um bis zu drei Größenordnungen (Zeitpunkt: 0 bis 10.000 Jahre)
A1w2		A1w2-1	Erhöhung der Permeabilität RS-VO um bis zu drei Größenordnungen (Zeitpunkt: 0 bis 10.000 Jahre)
-		WIF-1	A1w1-1 + A1w2-1 + A1i6-1
-		WIF-2	Geringer Wert des Diffusionskoeffizienten
-		WIF-3	Erhöhung der Permeabilität um bis zu drei Größenordnungen (Zeitpunkt: 0 bis 10.000 Jahre)
-		Klassischer Ansatz	Gleichzeitige Variation aller unabhängigen Parameter

Grau hinterlegt = Rechenfälle nicht mit RepoTREND umgesetzt, Begründungen siehe Text

4 Ergebnisse

Wie im vorangegangenen Kapitel erläutert, erfolgt die Umsetzung für das Referenzszenarium deterministisch (Basisfall, B) und probabilistisch (Referenzfall, R), für die Alternativszenarien nur probabilistisch.

4.1 Referenzszenarium

Auch wenn das Referenzszenarium letztlich mit einem probabilistischen Rechenlauf (dem Referenzfall, siehe Kap. 4.1.2) bewertet werden muss, sind Ergebnisse der deterministischen Rechnungen sinnvoll, insbesondere um ein Verständnis für das Systemverhalten zu bekommen bzw. Grundlagen für die Diskussion der Ergebnisse der probabilistischen Rechnungen zu schaffen.

Basierend auf den in ISIBEL und der VSG erzielten Ergebnissen /BUH 08/, /BUH 10/, /LAR 13/ wurden neben dem Basisfall (Kap. 4.1.1) mehrere Varianten deterministisch gerechnet, um das Systemverständnis zu verbessern. Zunächst wurde der Einfluss der Konvergenz untersucht, indem die Bandbreite der wahrscheinlichen Entwicklungen mit Hilfe der beiden Parameterdatensätze der „langsamen“ und „schnellen“ Konvergenz umgesetzt wurde, siehe Kapitel 3.1.1.1. Als Variante 2 (B-Var2) wurde der Einfluss der Ortsdiskretisierung untersucht. Die Rechnungen wurden für die „langsame“ und die „schnelle“ Konvergenz durchgeführt. Wegen des deutlicheren Unterschieds zum Basisfall werden hier die Ergebnisse basierend auf der „schnellen“ Konvergenz gezeigt. Die übrigen Varianten basieren auf der „langsamen“ Konvergenz.

1. Einfluss der Konvergenz: **B-Var1** (Kap. 4.1.1.1)
2. Einfluss der Ortsdiskretisierung: **B-Var2** (Kap. 4.1.1.2)
3. Einfluss des Diffusionskoeffizienten: **B-Var3** (Kap. 4.1.1.3)
4. Einfluss der Größe des ewG: **B-Var4** (Kap. 4.1.1.4)
5. Einfluss des Endlagerkonzeptes: **B-Var5** (Kap. 4.1.1.5)

Die Zielrichtung der Variationsrechnungen ist unterschiedlich: Zum Teil geht es darum, das Systemverhalten zu testen, z. B. bei der Betrachtung der Konvergenz, und zum anderen um Fragen der Modellbildung (z. B. bei der Ortsdiskretisierung).

In Analogie zum deterministischen Fall wurden auch in den probabilistischen Rechnungen neben dem Referenzfall mehrere Varianten betrachtet, um das Systemverständnis zu verbessern:

1. Einfluss der Ortsdiskretisierung **R-0-Var1** (Kap. 4.1.2.1 und Kap. 4.1.2.3)
2. Einfluss des Endlagerkonzeptes **R-0-Var2 und R-0-Var3** (Kap. 4.1.2.2 und Kap. 4.1.2.3)
3. Einfluss der Größe des ewG **R-0-Var4** (Kap. 4.1.2.4)
4. Einfluss der Konvergenz **R-0-Var5** (Kap. 4.1.2.5)

4.1.1 Basisfall der deterministischen Rechnungen

Der Basisfall der deterministischen Rechnungen wurde mit den Eingabedaten aus Kapitel 3.1.1 durchgeführt. Die Ergebnisse werden in der Regel für das Zeitintervall von 1 Million Jahren dargestellt. Falls zur Erläuterung von Details erforderlich, wird z. B. für den RGI ein Zeitintervall von 10 Millionen Jahren dargestellt.

Die Temperaturdaten gemäß Tabelle 3.13 und Abbildung 3.3 führen zu den in den Abbildungen 4.1 und 4.2 dargestellten Temperaturverläufen an ausgewählten Stellen des Grubengebäudes. Für die Glasmobilisierung wird ein Temperaturverlauf verwendet, der im Maximum zu einer Temperatur von ca. 460 K führt, siehe Abbildung 4.1.

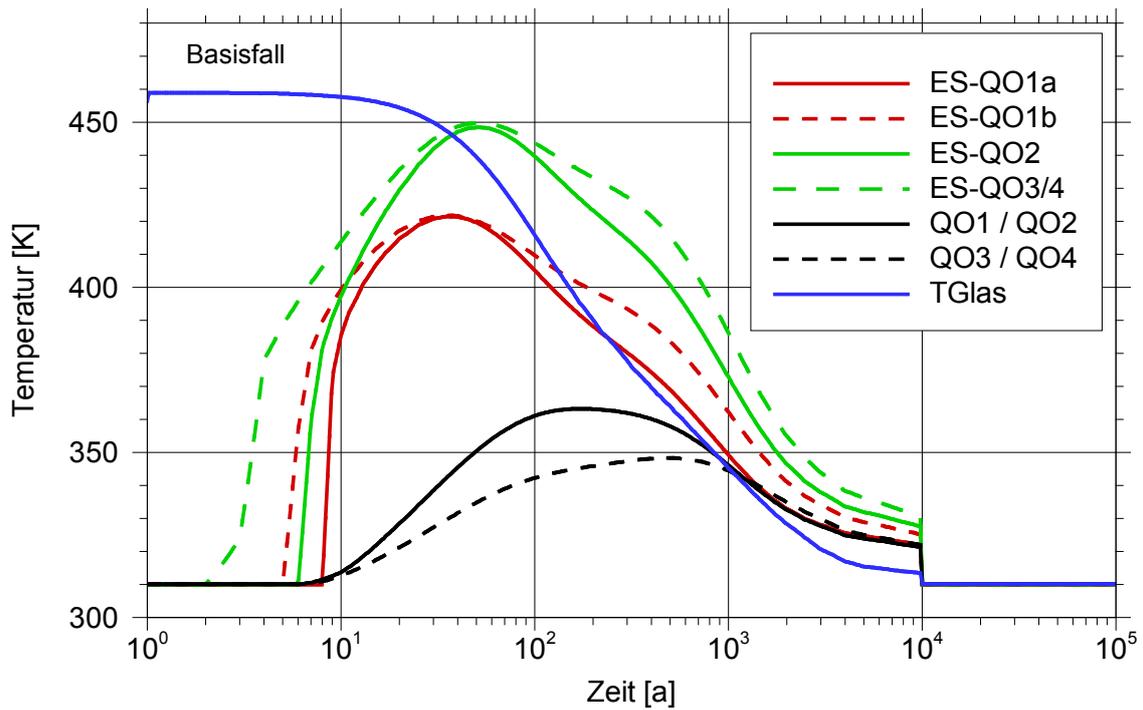


Abb. 4.1 Temperaturverläufe in den östlichen Einlagerungsfeldern; Basisfall

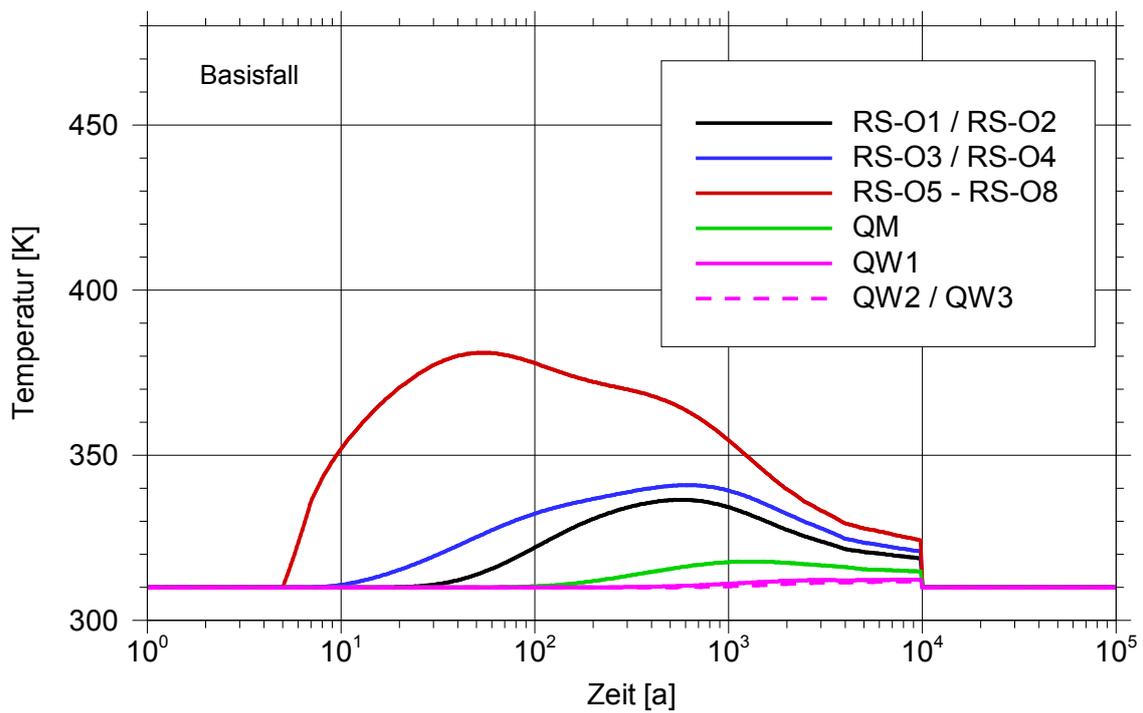


Abb. 4.2 Temperaturverläufe in den östlichen Richtstrecken und Querschlägen sowie im westlichen Bereich; Basisfall

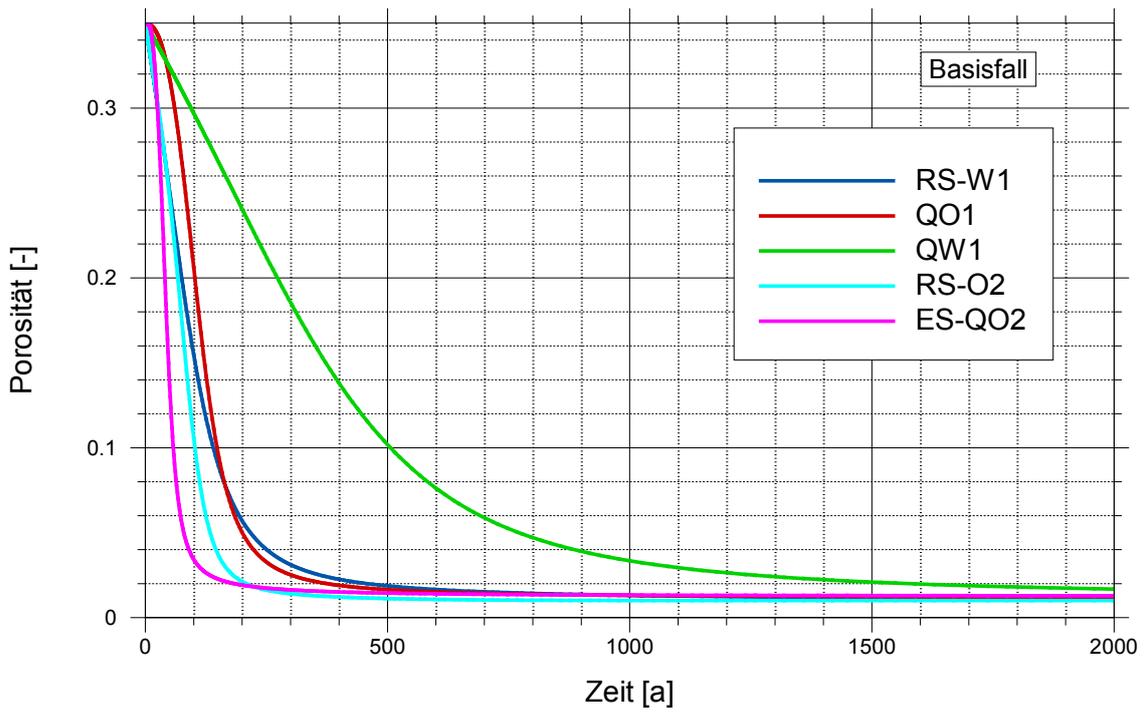


Abb. 4.3 Porositätsverläufe für fünf ausgewählte Grubenbereiche; Basisfall

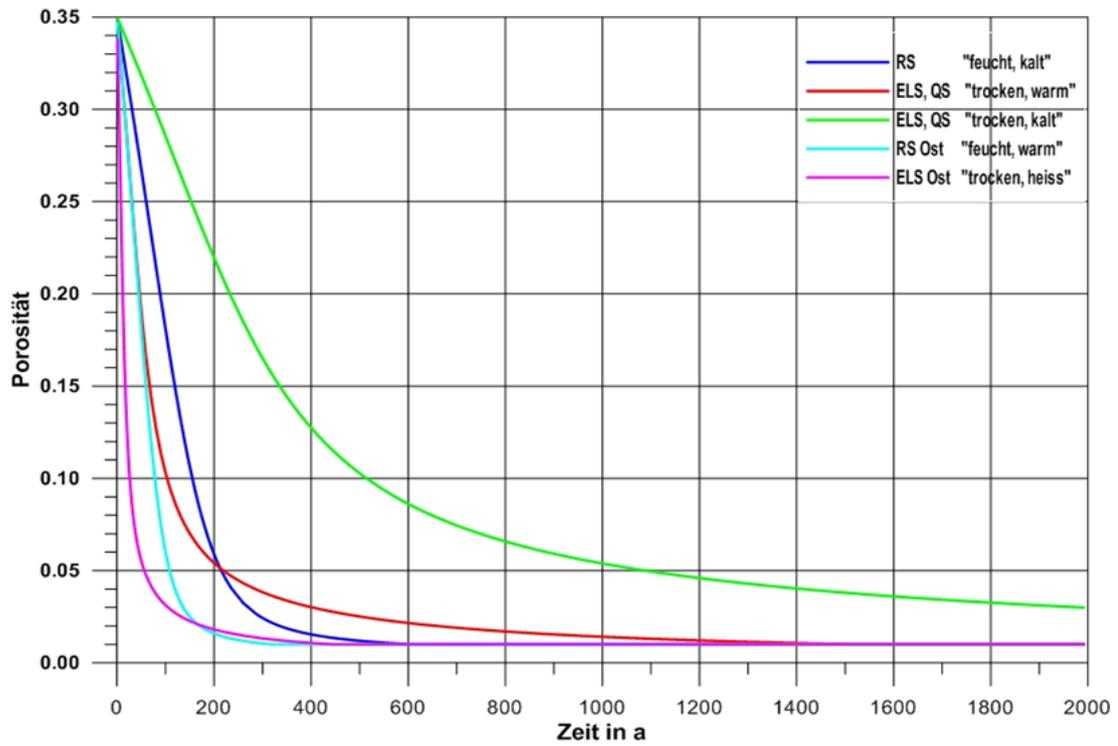


Abb. 4.4 Porositätsverläufe aus dem Vorhaben VSG /LAR 13/

In der Variante B-Var1 mit „schneller“ Konvergenz wurde für die Einlagerungsstrecke ES-QO1b der gleiche Temperaturverlauf wie für ES-QO2 angenommen (höhere Temperatur und daher schnellere Konvergenz).

Durch das plastische Verhalten des Steinsalzes werden die mit Salzgrus verfüllten Grubenbaue im Lauf der Zeit verschlossen. Dieser Prozess hängt stark von der Temperatur und der Feuchte ab. In Abbildung 4.3 sind Beispiele für die zeitlichen Entwicklungen der Porositäten in ausgewählten Grubenbereichen dargestellt. Die Konvergenzraten für diese Grubenbereiche sind in Anlehnung an /LAR 13/ so parametrisiert worden, dass die Porositätsentwicklungen mit den entsprechenden Kurvenverläufen in /LAR 13/ (in Abbildung 4.4 wiedergegeben) weitgehend übereinstimmen. Abbildung 4.5 zeigt die Porositätsverläufe für die Anpassung an die schnelle Konvergenz im Vergleich zu den Werten aus dem Vorhaben VSG in logarithmischer Darstellung der Zeitachse.

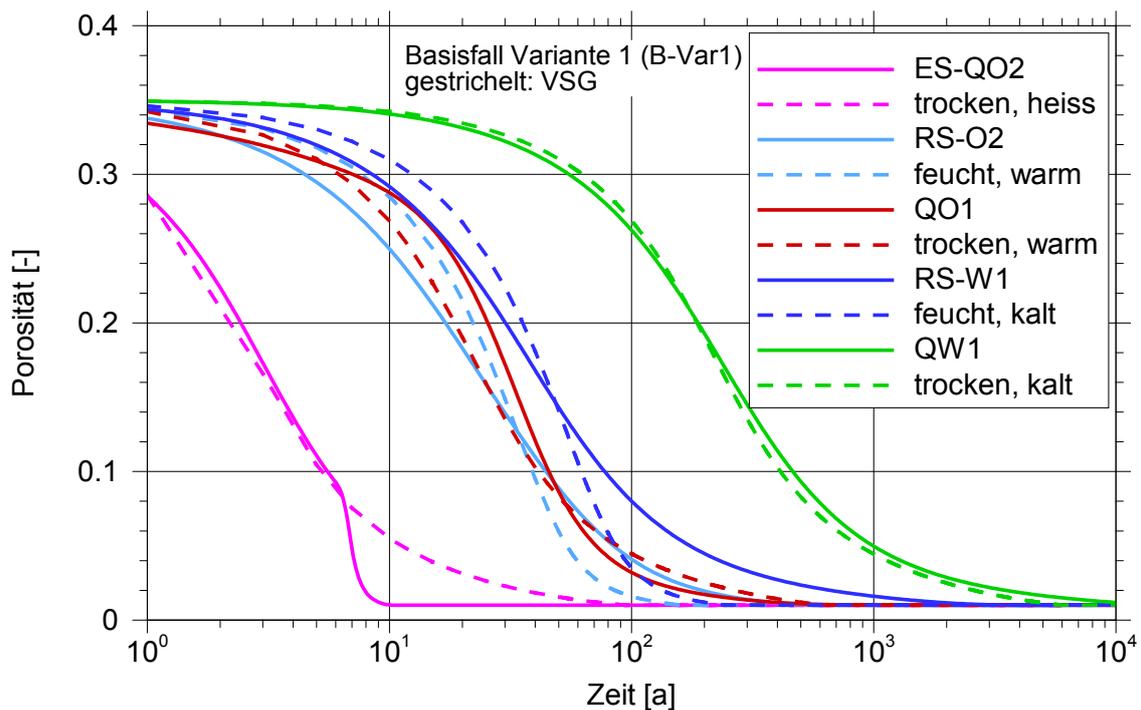


Abb. 4.5 Porositätsverläufe bei „schneller“ Konvergenz und Vergleich mit dem Vorhaben VSG /LAR 13/

Bei den Modellrechnungen hat sich gezeigt, dass die in den Richtstrecken während der Betriebsphase eingebrachten Lösungsmengen („Feuchte“) ausreichen, um in die angrenzenden Querschläge und von dort in die Einlagerungstrecken weitertransportiert zu werden. Diesen Weitertransport können auch die Abdichtungen in den Querschlägen nicht verhindern, die mit einer Permeabilität von $1 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ bei 10 m Länge angenommen wurden. In Abbildung 4.6 ist ein Beispiel gezeigt, wie sich die Pegelhöhen der Lösungen in diesen Bereichen zeitlich entwickeln (alle Segmente haben die gleiche Höhe von 3,6 m).

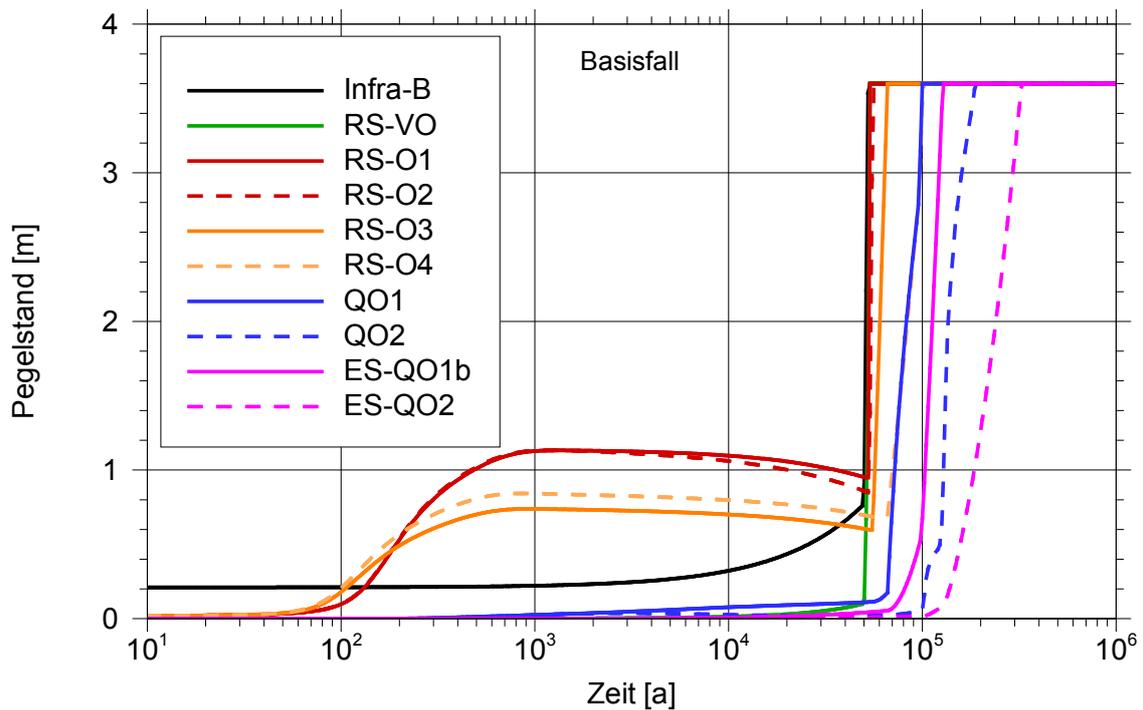


Abb. 4.6 Pegelhöhen in Segmenten des östlichen Bereichs; Basisfall

Im Infrastrukturbereich führt die anfangs vorhandene Lösungsmenge von 5.100 m^3 zu einer Pegelhöhe von ca. 20 cm. Diese erhöht sich langsam durch den Zufluss über den Schacht, bis nach 50.000 Jahren der Schachtverschluss versagt und der Bereich schnell vollläuft. In den Verschluss RS-VO dringt wegen des hohen Strömungswiderstands bis 50.000 Jahre kaum Lösung ein. Für die Querschläge beginnt der Zufluss etwas eher, weil der Lösungspegel in den Richtstrecken höher, die Abdichtungen in den Querschlägen kürzer und der Strömungswiderstand geringer sind. In den Richtstrecken steigt der Pegel anfangs rasch an, weil der Versatz in ihnen während der Betriebsphase angefeuchtet wurde, sich durch die Konvergenz die Porenräume rasch schließen und die eingeschlossene Luft verdrängt wird.

Nach ca. 100.000 Jahren sind erhebliche Lösungsmengen in die Einlagerungsstrecken des Segments ES-QO1b gelangt, so dass ein durchgehender Transportpfad von den dort eingelagerten Abfällen bis zum Infrastrukturbereich existiert. Obwohl gemäß Abbildung 4.3 die Konvergenzprozesse bis dahin in vielen Grubenbauen nahezu abgeschlossen sind, findet noch ein sehr geringer advektiver Transport statt, dem ein diffusiver Transport überlagert ist⁸.

Abbildung 4.7 zeigt die zeitliche Entwicklung des Fluiddrucks im östlichen Bereich des Grubengebäudes. Auch hier ist deutlich zu erkennen, dass der Lösungsdruck erst nach Versagen der Schachtabdichtung und der Streckenabdichtungen RS-VO stark ansteigt. In den Richtstrecken, im Querschlag und in den Einlagerungsstrecken steigt der Druck in Sprüngen an, die jeweils vom Volllaufen eines weiteren Segments im Grubengebäude hervorgerufen werden. Erst wenn die gesamte Grube mit Lösung gefüllt ist, erreicht der Druck in allen Segmenten den Maximalwert von 11,5 MPa.

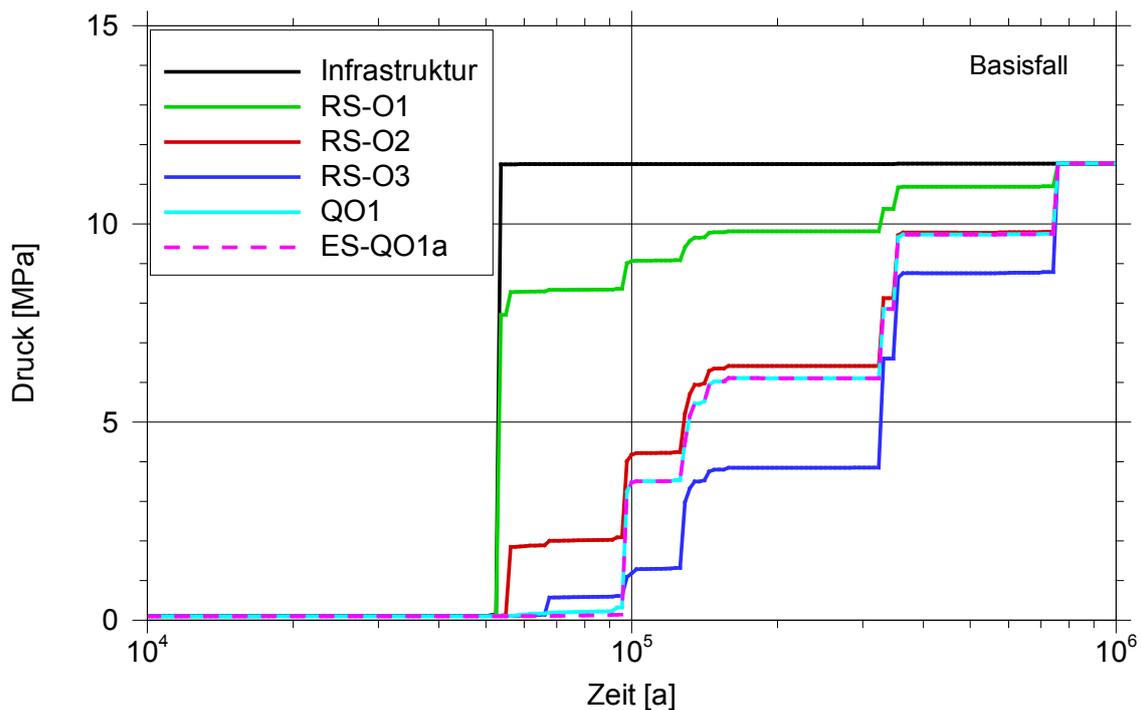


Abb. 4.7 Fluiddruck in Segmenten des östlichen Bereichs; Basisfall

⁸ Der diffusive Transport beruht auf der Modellannahme von LOPOS, dass Diffusion immer möglich ist, d. h. auch bei sehr kleinen Porositäten.

In dem Modell für die Mobilisierung von Radionukliden aus den Abfallgebinden wird angenommen, dass der Behälterausfall und die Freisetzung aus den Abfallmatrices mit dem ersten Lösungskontakt beginnen. Da bereits zu frühen Zeiten (sehr geringe) Lösungsmengen in die Einlagerungsstrecken vordringen, ist die Mobilisierung aus den Abfallgebinden rechnerisch bereits abgeschlossen, wenn die Abdichtungen nach 50.000 Jahren versagen. Obwohl zu diesem Zeitpunkt zunächst nur die Lösungen in den Einlagerungsstrecken kontaminiert sind, breiten sich die Radionuklide durch advectiven und diffusiven Transport rasch bis in alle Richtstrecken und über den Infrastrukturbereich bis in den Schacht aus. Abbildung 4.8 zeigt am Beispiel von Sn-126, wie sich die Konzentration in den Einlagerungsstrecken im östlichen Bereich zeitlich entwickelt. Dabei ist zu beachten, dass bis 50.000 Jahre die Lösungsmengen in diesen Strecken sehr gering sind, siehe Abbildung 4.6.

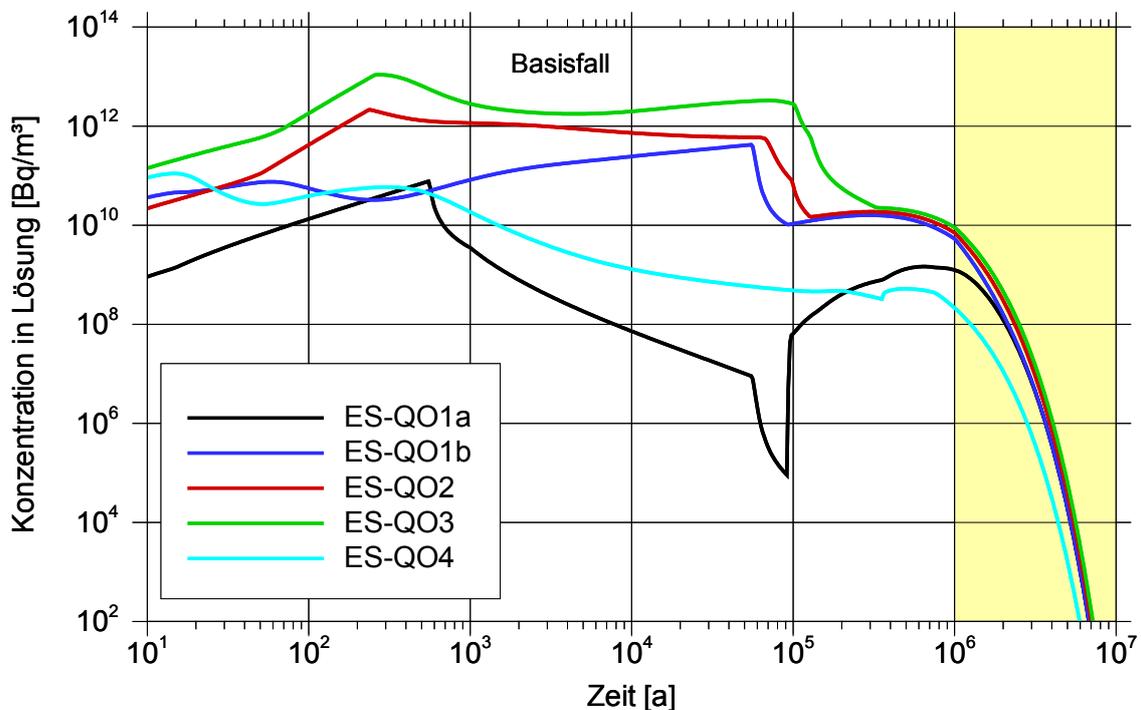


Abb. 4.8 Konzentrationen von Sn-126 in den Einlagerungsstrecken des östlichen Bereichs; Basisfall

Die Konzentrationen steigen zu Beginn als Folge des Behälterausfalls (Standzeiten 500 Jahre) und der Mobilisierung aus den einzelnen Abfallmatrices an. In ES-QO1a sind die Strukturteile eingelagert, für die eine kurze Mobilisierungsdauer angesetzt wird. Folglich sinkt hier die Konzentration nach 500 Jahren wieder durch den advectiven und diffusiven Abtransport in den Querschlag. Nach 90.000 Jahren steigt die Konzentration wieder an, weil Radionuklide mit höherer Konzentration aus ES-QO1b über

den Querschlag transportiert werden. In den Strecken mit direkt endgelagerten Brennelementen schwankt die Konzentration wegen der unterschiedlichen Mobilisierungsdauern aus den einzelnen Bereichen der Brennelemente.

Nach der Freisetzung aus den Einlagerungsstrecken gelangen die Radionuklide in die Querschläge und schließlich in den Infrastrukturbereich, siehe Abbildung 4.9. In der Abbildung sind die Konzentrationen für den Rechenlauf mit feiner Ortsdiskretisierung zusätzlich eingezeichnet. In dem dargestellten Zeitbereich bis 10 Millionen Jahre ist zu erkennen, dass der Transport in Richtung Infrastrukturbereich deutlich verzögert wird.

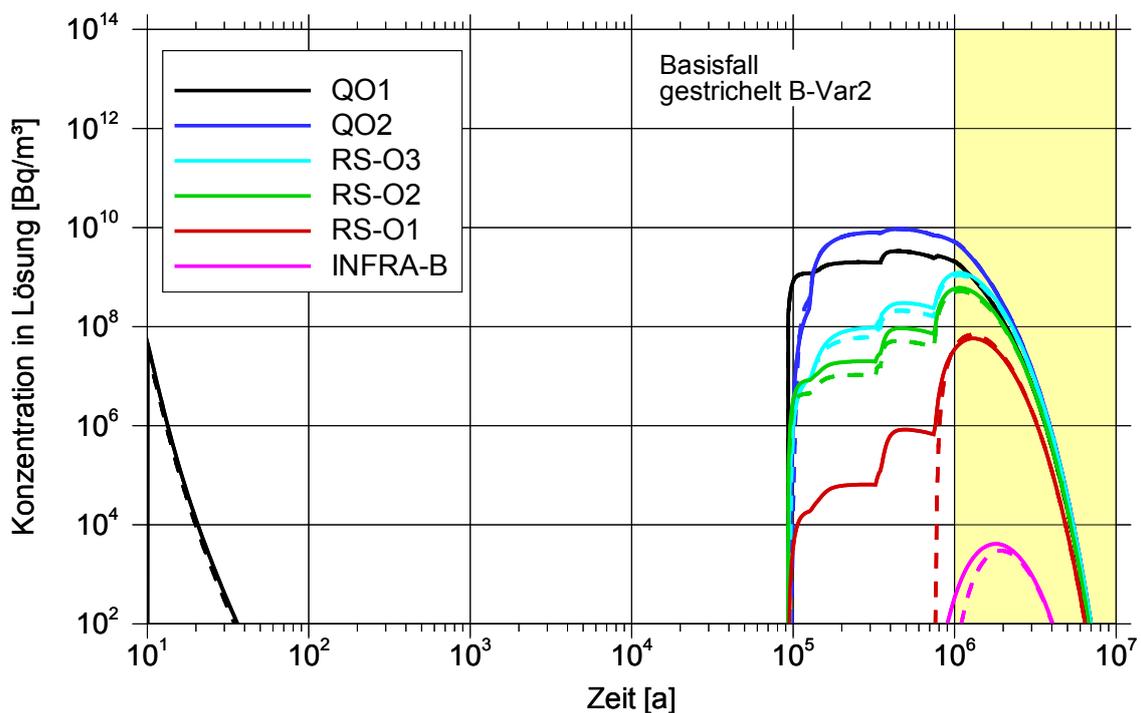


Abb. 4.9 Konzentrationen von Sn-126 in Querschlägen und Richtstrecken des östlichen Bereichs; Basisfall

Der Transport in den Richtstrecken beginnt erst nach ca. 90.000 Jahren. Die frühen Konzentrationswerte im Querschlag QO1 stammen aus den Einlagerungsstrecken mit den Strukturteilen, die etwas kälter als die anderen Strecken sind und daher zu Beginn einen etwas größeren Zufluss von Lösungen aufweisen.

Im Gegensatz zu den Modellen, die den Rechnungen in /LAR 13/ zugrunde liegen, wird angenommen, dass auch nach Erreichen der Porosität von 0,01 in den Strecken ein hydraulisch verbundener Porenraum zwischen den Einlagerungsstrecken und den Schächten existiert. Durch diesen Porenraum können sich nach diesem Modell Radio-

nuklide diffusiv ausbreiten. Dies führt dazu, dass an den Abdichtungen und an den Schächten Radionuklidströme auftreten, die nach ca. 90.000 Jahren einsetzen. In Abbildung 4.10 ist als Beispiel der zeitliche Verlauf des Nuklidstroms von Sn-126 von den Querschlägen über die Richtstrecken Richtung Schacht dargestellt. Der wesentliche Beitrag zum Nuklidinventar im Infrastrukturbereich stammt aus dem östlichen Bereich des Grubengebäudes.

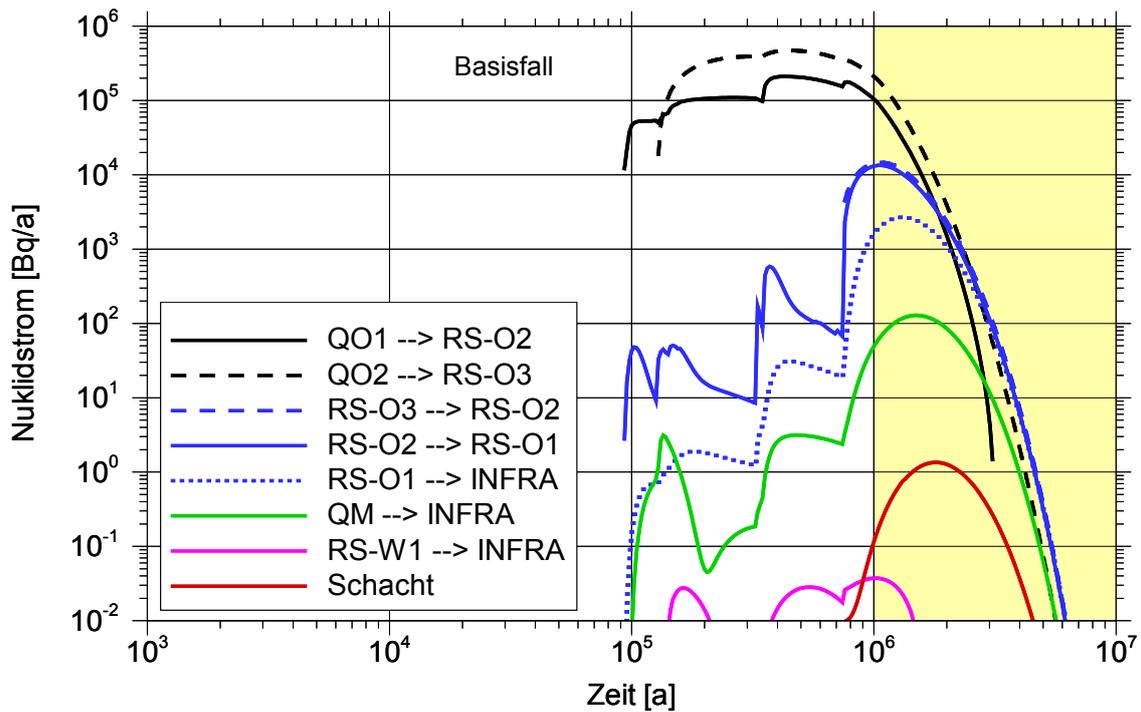


Abb. 4.10 Nuklidstrom von Sn-126 am Schacht und in Richtstrecken; Basisfall

Der aus dem Schacht austretende Radionuklidstrom verursacht einen RGI am Rand des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs für den Fall, dass dieser Rand am Ausgang des Schachtverschlusses angenommen wird. In Abbildung 4.11 sind die berechneten Werte des RGI dargestellt.

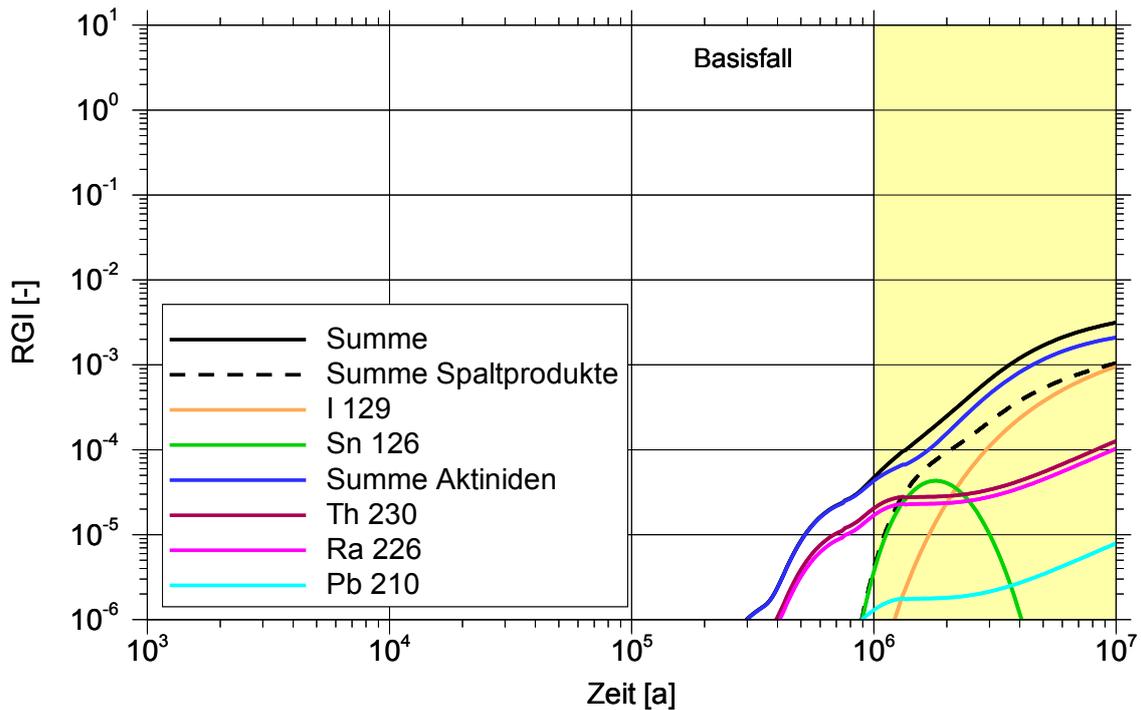


Abb. 4.11 Radiologische Konsequenz (RGI) im Basisfall

Die Werte des RGI liegen für alle Radionuklide und die Summe über alle Radionuklide weit unter eins, d. h. für diese Auslegung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs ist der Nachweis über eine vereinfachte radiologische Langzeitaussage für die deterministische Rechnung erbracht.

4.1.1.1 Schnelle Konvergenz

In den Modellrechnungen der VSG wurden zwei unterschiedliche Modellierungen der Konvergenzrate angegeben und als langsame oder schnelle Konvergenz bezeichnet /LAR 13/. Die im vorliegenden Bericht hauptsächlich verwendete Parametrisierung bezieht sich auf die langsame Konvergenz. Um den Einfluss der Konvergenzparametrisierung zu untersuchen, wurde die Variante mit schneller Konvergenz (B-Var1) betrachtet. Hierzu wurden alle Konvergenzparameter für die verschiedenen Grubenbereiche neu gefittet, siehe die Angaben in den Tabellen 3.11 und 3.12.

Der hauptsächliche Unterschied besteht darin, dass alle Grubenbaue durch die schnelle Konvergenz innerhalb von ca. 10.000 Jahren ihre Endporosität erreichen. Zusätzlich wurde für das Segment ES-QO1b ein anderer Temperaturverlauf verwendet, der durch höhere Temperaturen die Konvergenz dort beschleunigt. In Abbildung 4.12 werden als Endergebnis die RGI-Werte für beide Fälle dargestellt. Die schnelle Konvergenz führt

dazu, dass sich die Porenräume in den kompaktierenden Segmenten schneller schließen, wodurch weniger Lösung in das Gesamtsystem einströmt und der advective Radionuklidtransport geringer wird. Die Auswirkungen auf den RGI sind marginal.

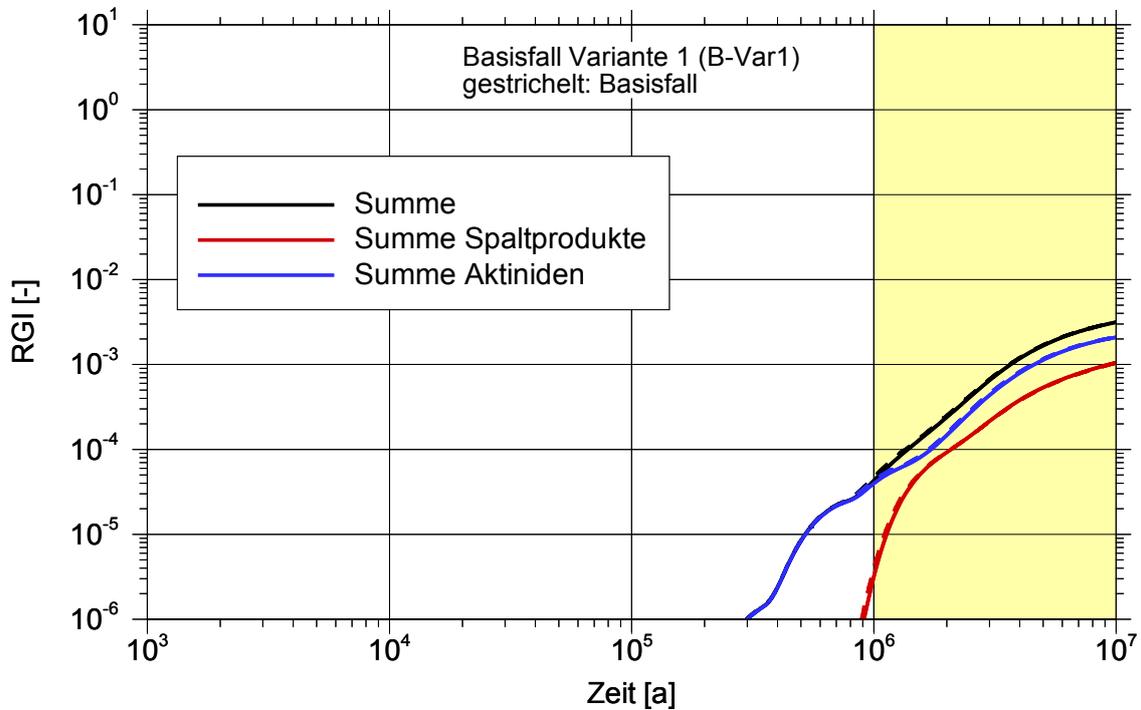


Abb. 4.12 Radiologische Konsequenz (RGI) im Basisfall, Variante 1 (B-Var1)

4.1.1.2 Einfluss der Ortsdiskretisierung

In dieser Variante (B-Var2) wurde die Ortsdiskretisierung der Segmente für die Richtstrecken und Querschläge verfeinert. Als Ausgangsvariante wurde der Basisfall mit schneller Konvergenz gewählt, weil in dieser Variante die Auswirkungen der Ortsdiskretisierung deutlicher zu sehen sind als im Vergleich zum Basisfall mit langsamer Konvergenz. Es wurde eine Blocklänge von ca. 20 Metern angesetzt gegenüber einer Blocklänge, die im Basisfall jeweils der Gesamtlänge des Segments entspricht. Durch diese feinere Ortsdiskretisierung wird die Hydraulik des Systems nicht verändert, sie hat nur einen Einfluss auf den Transport der Radionuklide. Eine noch feinere Diskretisierung ist mit den derzeitigen Modellen in LOPOS nicht möglich.

In Abbildung 4.13 ist der räumliche Verlauf der Konzentration von Sn-126 in der östlichen Richtstrecke (Süd) zum Endzeitpunkt der Rechnungen (1 Million Jahre) dargestellt. Der Nullpunkt der x-Achse liegt an der Kontaktstelle von RS-O1 zur Abdichtung RS-VO. Gestrichelt sind die Konzentrationen zum Zeitpunkt 500.000 Jahre eingezeichnet.

net. Es ist jeweils ein Maximum in der Mitte der Segmente RS-O2, RS-O3 und RS-O4 zu erkennen, das von dem Radionuklideintrag aus den jeweiligen Querschlägen hervorgerufen wird. Die Querschläge münden gemäß der LOPOS-Modellierung jeweils im Segmentmittelpunkt ein. In Richtung zum Infrastrukturbereich nimmt die Konzentration um fast drei Größenordnungen ab. In Richtung Osten stellt sich ein Konzentrationsgleichgewicht ein, das ca. eine Größenordnung unter dem Maximalwert liegt. Aus dem Querschlag QO4 an der Richtstrecke RS-O6 treten kaum Radionuklide zu (gemäß dem geringeren Inventar von Sn-126 im verglasten Abfall in ES-QO4), so dass dort kein Konzentrationsmaximum zu erkennen ist.

Die Konzentrationen zum Zeitpunkt 500.000 Jahre sind ca. eine Größenordnung kleiner mit Ausnahme der Richtstrecke RS-O5, in der die Konzentration durch den Zutritt aus ES-QO3 noch sehr hoch ist. Der Weitertransport in die noch weiter östlich gelegenen Richtstreckenteile (RS-O6, RS-O7, ...) erfolgt sehr langsam. Durch den zu diesem Zeitpunkt noch sehr schnellen Transport in Richtung Infrastrukturbereich sind keine Maxima in den Segmenten RS-O2, RS-O3 und RS-O4 zu erkennen; vielmehr nimmt in diesen Segmenten die Konzentration in x-Richtung jeweils sehr steil ab.

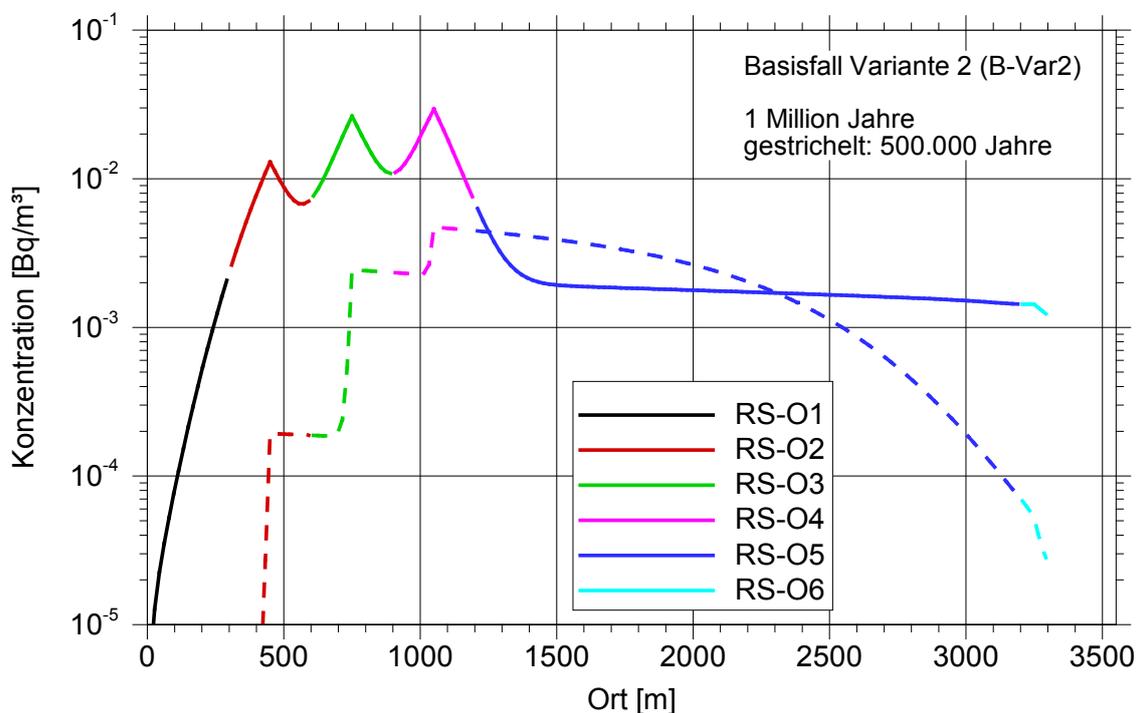


Abb. 4.13 Räumlicher Konzentrationsverlauf von Sn-126 in der Richtstrecke Ost; Basisfall, Variante mit schneller Konvergenz und feiner Ortsdiskretisierung (B-Var2)

In Abbildung 4.14 sind die zeitlichen Verläufe der Konzentrationen in der östlichen Richtstrecke (Süd) dargestellt. Durch den langsamen Transport infolge der feinen Ortsdiskretisierung nehmen die Radionuklidkonzentrationen in Richtung Infrastrukturbereich kontinuierlich ab. Im Infrastrukturbereich ist im dargestellten Intervall nur noch eine sehr geringe Konzentration zu erkennen. Nach 1 Million Jahre nehmen die Konzentrationsverläufe dann wegen der Halbwertszeit von Sn-126 generell zeitlich ab (nicht dargestellt). Für den Basisfall („langsame“ Konvergenz) ist das Verhalten ähnlich, siehe Abbildung 4.9.

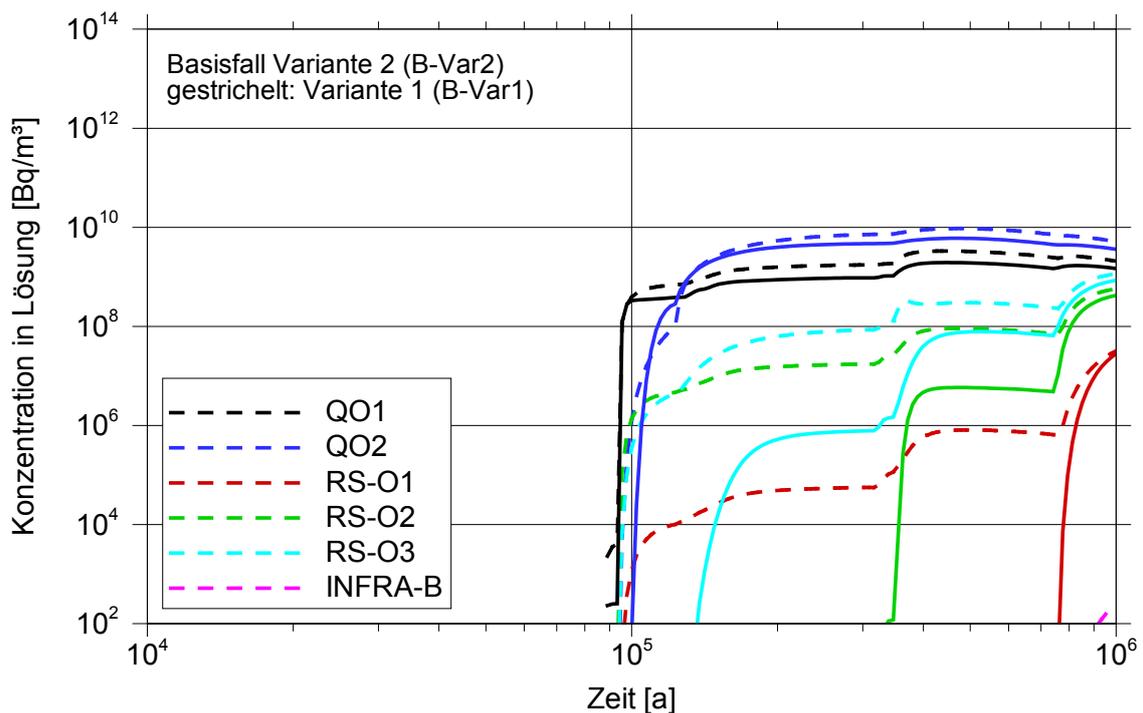


Abb. 4.14 Zeitlicher Verlauf der Konzentrationen von Sn-126 in der Richtstrecke Ost; Basisfall, Variante mit schneller Konvergenz und feiner Ortsdiskretisierung (B-Var2)

In Abbildung 4.15 sind die Auswirkungen der feinen Ortsdiskretisierung auf den RGI-Wert zu sehen. Mit feiner Ortsdiskretisierung ist der RGI bis etwa 1 Million Jahre mindestens eine Größenordnung kleiner. Zu Zeiten größer 10^6 Jahren gleichen sich die Werte an (nicht dargestellt); d. h. bei feiner Ortsdiskretisierung geht der Transport – wie zu erwarten – langsamer als im Basisfall, führt aber zu vergleichbaren Maximalwerten.

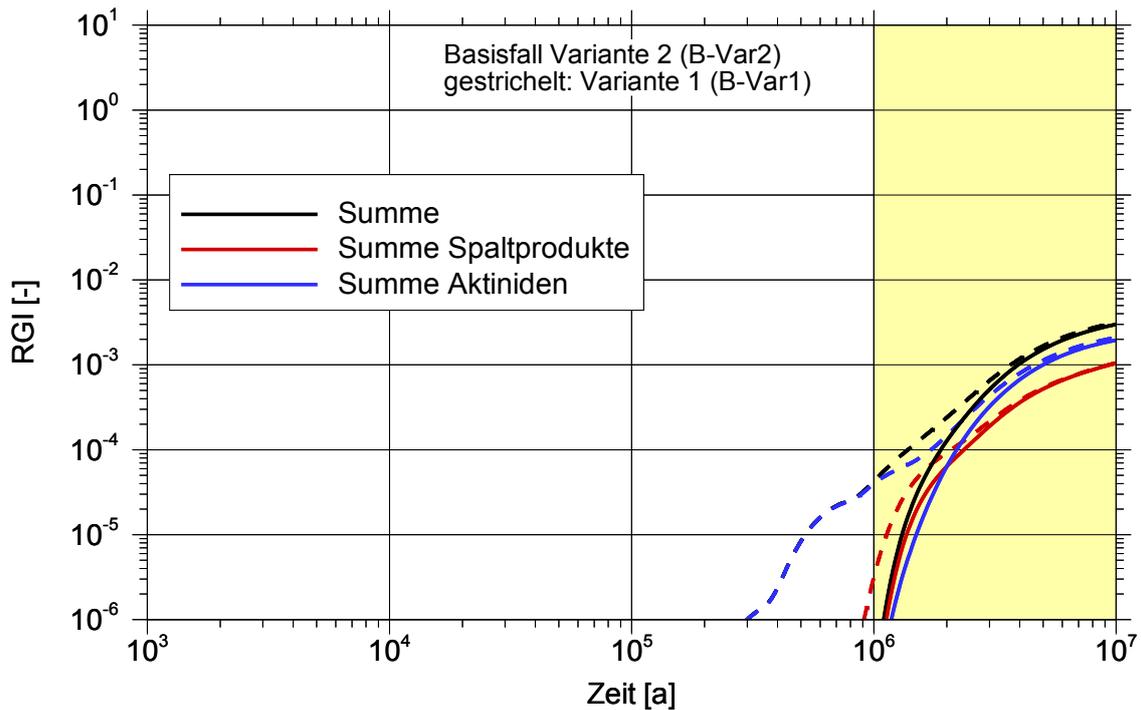


Abb. 4.15 RGI am Schacht; Basisfall, Variante mit schneller Konvergenz und feiner Ortsdiskretisierung (B-Var2)

4.1.1.3 Einfluss des Diffusionskoeffizienten

In dieser Variante (B-Var3) wurde zusätzlich zu der feinen Ortsdiskretisierung bei schneller Konvergenz (siehe Kapitel 4.1.1.2) der Diffusionskoeffizient auf $1 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ verkleinert (entsprechend der unteren Grenze in WIF-2), um den Einfluss der Diffusion auf die Rechenergebnisse abschätzen zu können. In diesem Fall wird keine Abbildung für den RGI angegeben, weil die Werte im gerechneten Zeitintervall Null sind.

4.1.1.4 Einfluss der Größe des ewG

Diese Variante (B-Var4) wurde mit den gleichen Eingabeparametern gerechnet wie der Basisfall mit feiner Ortsdiskretisierung. Der RGI wurde jedoch nicht aus den Radionuklidströmen aus dem Schacht berechnet, sondern aus den Strömen, die aus der Abdichtung RS-VO in den Infrastrukturbereich gelangen. Als Ergebnis wird nur der RGI betrachtet. Um mit dem Basisfall vergleichen zu können, werden die Ergebnisse hier für den Betrachtungszeitraum von 10 Millionen Jahren dargestellt.

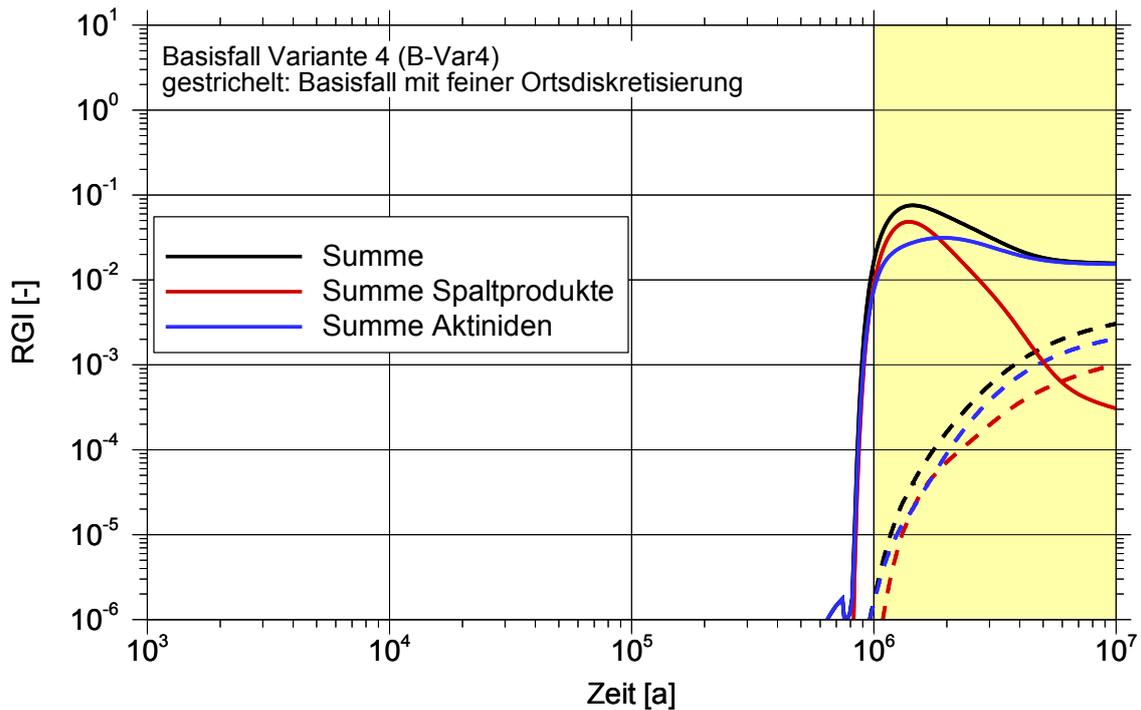


Abb. 4.16 RGI an der Abdichtung RS-VO; Basisfall, Variante mit feiner Ortsdiskretisierung (B-Var4)

Das Maximum des RGI wird zu früheren Zeiten erreicht und ist etwa eine Größenordnung größer als im Referenzfall mit feiner Ortsdiskretisierung (dort wird der RGI für den Ausgang am Schacht berechnet), bleibt jedoch kleiner als 0,1. Bereits zu frühen Zeiten (ab ca. 100.000 Jahren; in der Abbildung nicht sichtbar) tritt ein geringer RGI auf, der während der Auffüllphase durch geringe Lösungsströme im Grubengebäude hervorgerufen wird. Dieser RGI wird auch am Schacht beobachtet, jedoch mit noch kleineren Werten. Es ist bemerkenswert, dass der RGI zum Zeitpunkt des Maximums von den Spaltprodukten (Sn-126) dominiert wird und nicht von den Aktiniden.

4.1.1.5 Einfluss des Endlagerkonzepts: Längere Richtstrecke im Osten

Diese Variante (B-Var5) wurde mit den gleichen Eingabeparametern gerechnet wie der Basisfall mit feiner Ortsdiskretisierung. Es wurde angenommen, dass die Längen der Richtstrecken RS-O1 und RN-O1 jeweils von 300 m auf 1.000 m vergrößert sind. Um einen zusätzlichen deutlichen Effekt der Transportverzögerung zu erhalten, wurden die Richtstreckensegmente jeweils in fünf Teile (a bis e) geteilt und diese Teile wiederum für den Radionuklidtransport intern jeweils in 99 Blöcke von ca. 2 m Länge unterteilt.

Die veränderte Länge hat auf den Lösungsstrom einen vernachlässigbar geringen Einfluss, da sich die interne Diskretisierung im Rechenmodell nur auf den Radionuklidtransport auswirkt.

Für den Radionuklidtransport ergibt sich eine merkliche Verzögerung, die sich letztendlich auch auf den RGI auswirkt, siehe die Abbildungen 4.17 und 4.18. Bei den Konzentrationen in der Richtstrecke RS-O1 sind durch die feine Ortsdiskretisierung (99 Blöcke je Segment) eine deutliche Verzögerung und damit eine zerfallsbedingte Abnahme für Sn-126 zu beobachten. Teil a der Richtstrecke grenzt dabei an die Abdichtung RS-VO an. Die Konzentration im Infrastrukturbereich nimmt um fast drei Größenordnungen ab. Die Darstellung erfolgt über 10 Millionen Jahre, um die unterschiedlichen RGI-Werte in den einzelnen Bereichen der Strecke darstellen zu können.

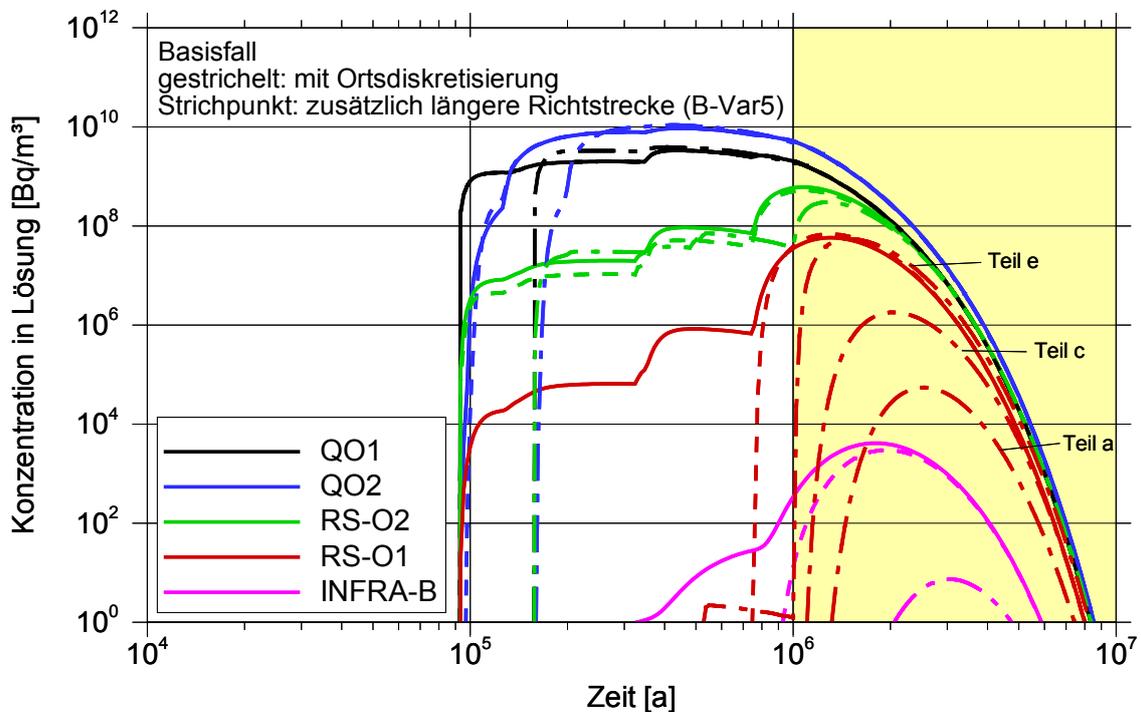


Abb. 4.17 Basisfall; Konzentrationen von Sn-126; Variante mit feiner Ortsdiskretisierung und längerer Richtstrecke RS-O1 (B-Var5)

Für den RGI ergibt sich eine generelle Verzögerung und Abnahme um etwa einen Faktor 5 zum Ende des Betrachtungszeitraumes. Eine Verlängerung der Richtstrecke RS-O1 (und parallel dazu RN-O1) bewirkt also eine deutliche Verlangsamung des Radionuklidtransports bis zu den Schachtverschlüssen.

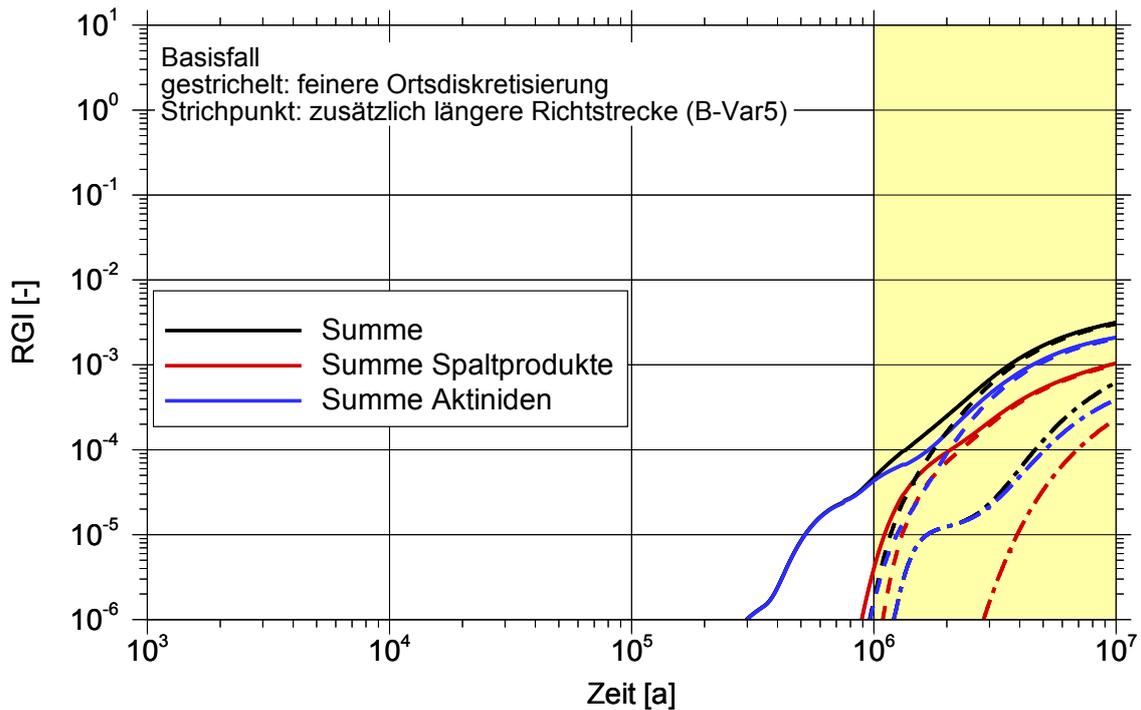


Abb. 4.18 Basisfall; RGI am Schacht; Variante mit feiner Ortsdiskretisierung und längeren Richtstrecken RS-O1 und RN-O1 (B-Var5)

4.1.2 Referenzfall der probabilistischen Rechnungen

Die probabilistischen Rechnungen für das Referenzszenarium wurden mit den Bandbreiten der unabhängigen Variablen gemäß Tabelle 3.21 durchgeführt. Dabei wurden wie in Kapitel 3.1 dargelegt nur Gleichverteilungen der Parameterwerte innerhalb ihrer wahrscheinlichen Intervalle angenommen. Es wurden 1.000 Realisationen aus den Verteilungen erzeugt und gerechnet.

In den folgenden Kapiteln werden für jeden Rechenfall drei statistische Auswertungen gezeigt:

- Zeitlicher Verlauf der statistischen Kenngrößen (Median, Quantile, Maximum, usw.)
- Histogramm der relativen Häufigkeit des RGI in Zeitbereichen
- Komplementäre kumulative Häufigkeit (CCDF) für mehrere Zeitpunkte

Als Rand des ewG wird der Schachtausgang verwendet. In einem Rechenfall (siehe Kapitel 4.1.1.4) wird untersucht, wie die Ergebnisse aussehen, wenn der Rand des ewG am Ausgang der Abdichtung RS-VO angenommen wird.

In den folgenden Abbildungen wurde der gemäß den Sicherheitsanforderungen geforderte Betrachtungszeitraum von 1 Million Jahre dargestellt. Da bei diffusiver Freisetzung in einigen Fällen das absolute Maximum der Strahlenexposition erst nach Ende des Nachweiszeitraumes auftritt, wurde zum besseren Verständnis der Systementwicklung der Darstellungszeitraum auf 10^7 Jahre verlängert. Wird auch in 10^7 Jahren das absolute Maximum nicht erreicht, wird der bis dahin erreichte Maximalwert angegeben und statistisch ausgewertet. Dieser Maximalwert liegt dann meistens am Rand des Zeitintervalls bei 10 Millionen Jahren.

In Abbildung 4.19 sind die zeitlichen Verläufe der statistischen Kenngrößen für den Referenzfall über einen Betrachtungszeitraum von 10 Millionen Jahren dargestellt. Auch hier steigen die Kurven auf Grund des langsamen diffusiven Transports bis zum Ende des dargestellten Zeitraumes an. Für den Maximalwert aller berechneten Maxima des RGI ist zu erwarten, dass er in diesem Rechenfall nach einigen zehn Millionen Jahren erreicht wird und geringfügig über 0,01 liegt. Der Maximalwert des Medians beträgt etwa ein Drittel bis die Hälfte dieses Wertes. Der Median entspricht mit ca. $5 \cdot 10^{-3}$ etwa dem maximalen RGI, der mit der deterministischen Rechnung in Kapitel 4.1.1 ermittelt wurde ($3 \cdot 10^{-3}$).

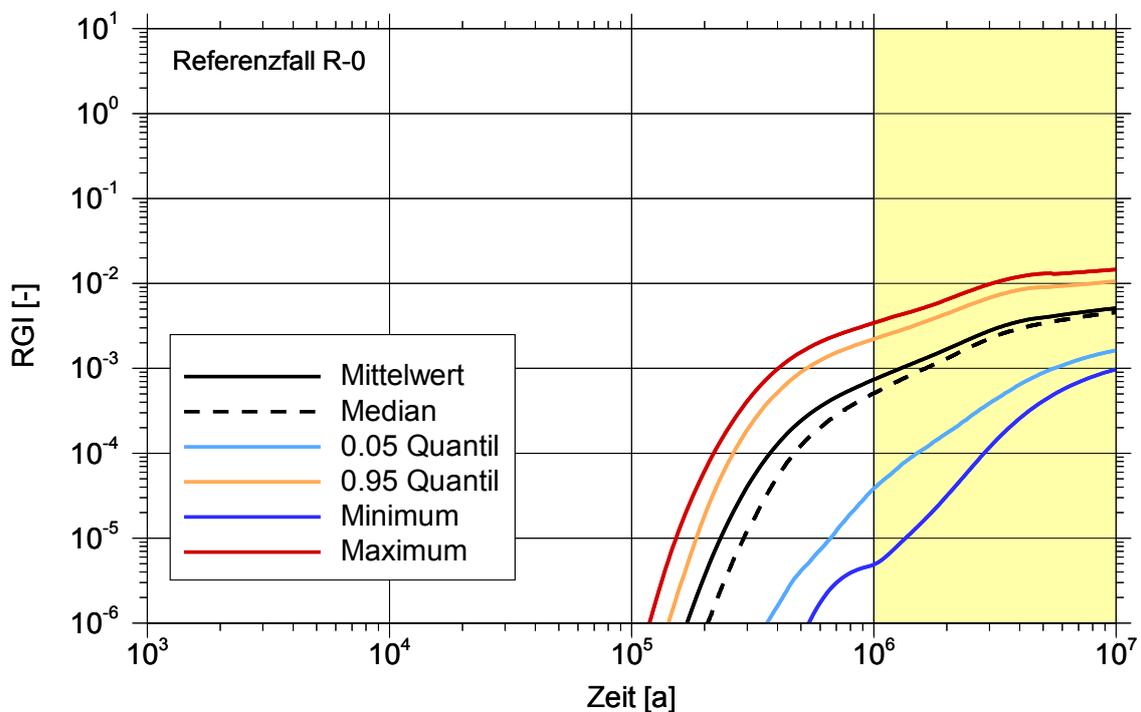


Abb. 4.19 Zeitlicher Verlauf der statistischen Kenngrößen des RGI; Referenzfall R-0

Das Histogramm für die Maxima des RGI in Abbildung 4.20 ist relativ schmal. Dies entspricht auch den in der Abbildung angegebenen Werten der statistischen Kenngrößen für diese Stichprobe. Mit einem Median von ca. $5 \cdot 10^{-3}$ liegen die berechneten Werte des RGI deutlich unterhalb von Eins.

Die komplementären kumulativen Häufigkeitsverteilungen für verschiedene Zeitpunkte sind in Abbildung 4.21 dargestellt. Wie aus Abbildung 4.19 zu erwarten, sind die Maxima aller RGI-Werte für Zeiten kleiner als 50.000 Jahre Null oder nahezu Null. Nach 500.000 Jahren liegen die Maxima der RGI-Werte im Bereich von $1 \cdot 10^{-6}$ bis circa 10^{-2} .

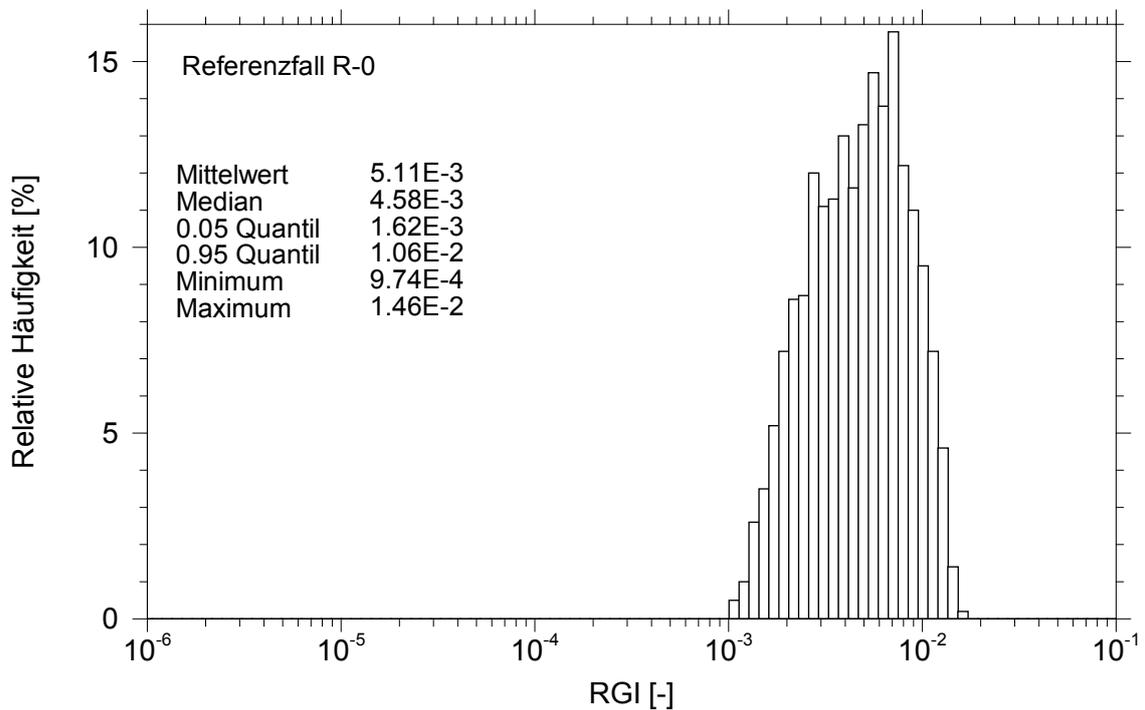


Abb. 4.20 Häufigkeitsdichte der Maximalwerte des RGI; Referenzfall R-0

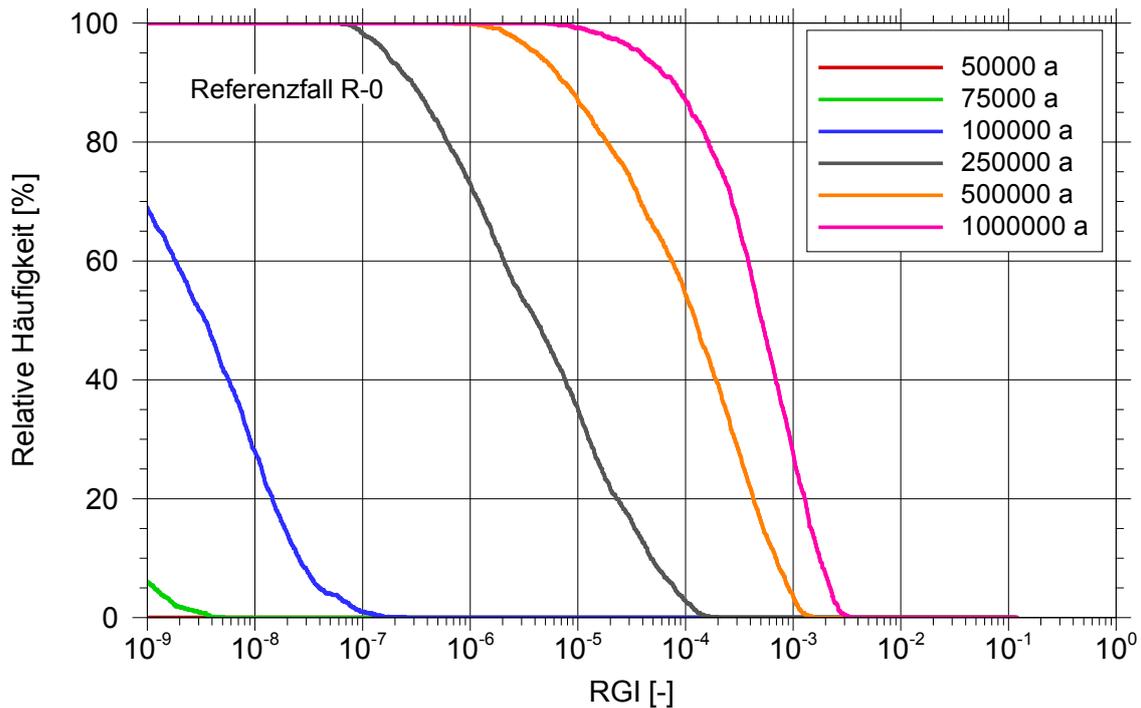


Abb. 4.21 Komplementäre kumulative Häufigkeit des RGI; Referenzfall R-0

4.1.2.1 Feine Ortsdiskretisierung

Basierend auf dem Referenzfall wird der Einfluss einer feineren Ortsdiskretisierung auf die Rechenergebnisse untersucht. Hierzu werden die Richtstrecken- und Querschlag-Segmente intern in Blöcke von ca. 20 m Länge aufgeteilt. Diese Blöcke beeinflussen nur den Radionuklidtransport, aber nicht die hydraulischen Verhältnisse.

Wie bereits bei den deterministischen Rechnungen festgestellt (Kapitel 4.1.1.2), zeigt die feine Ortsdiskretisierung, dass die Radionuklide langsamer durch die Grube transportiert werden als im Referenzfall berechnet und dass der RGI zu späteren Zeiten verschoben ist. Dies ist an den Kurven in Abbildung 4.22 gegenüber Abbildung 4.19 zu erkennen.

Die errechneten Maxima des RGI sind bei feiner Ortsdiskretisierung geringfügig kleiner, vgl. die Abbildungen 4.23 und 4.20.

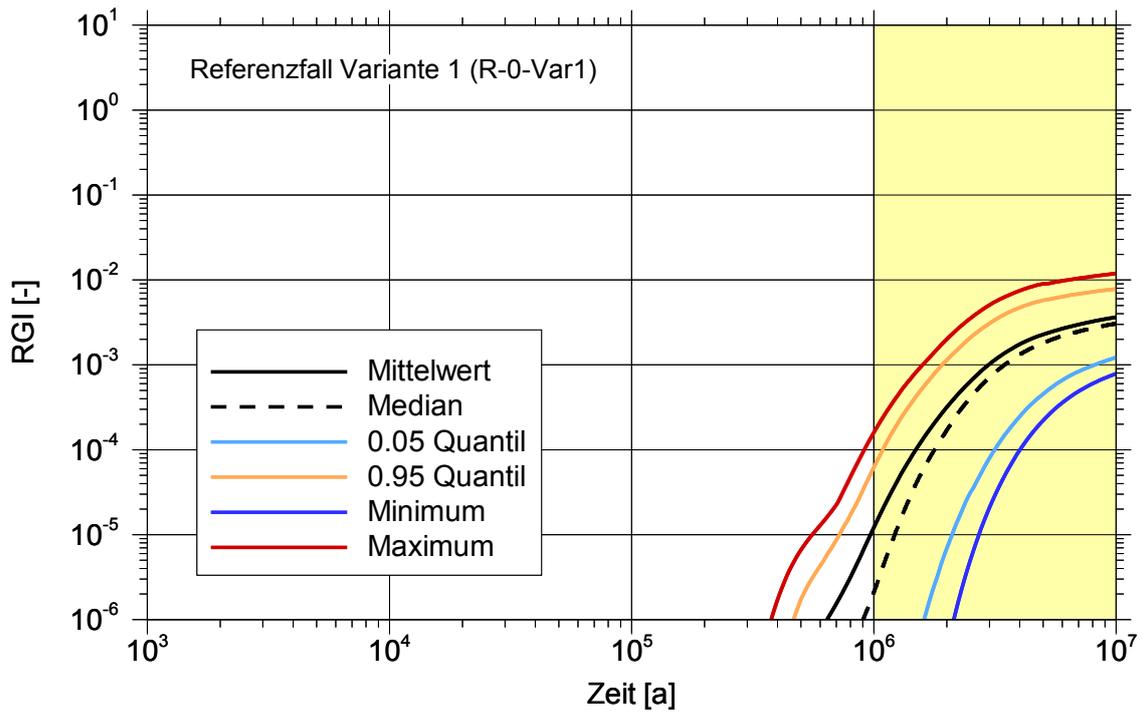


Abb. 4.22 Zeitlicher Verlauf der statistischen Kenngrößen des RGI am Schacht; Referenzfall, feine Ortsdiskretisierung

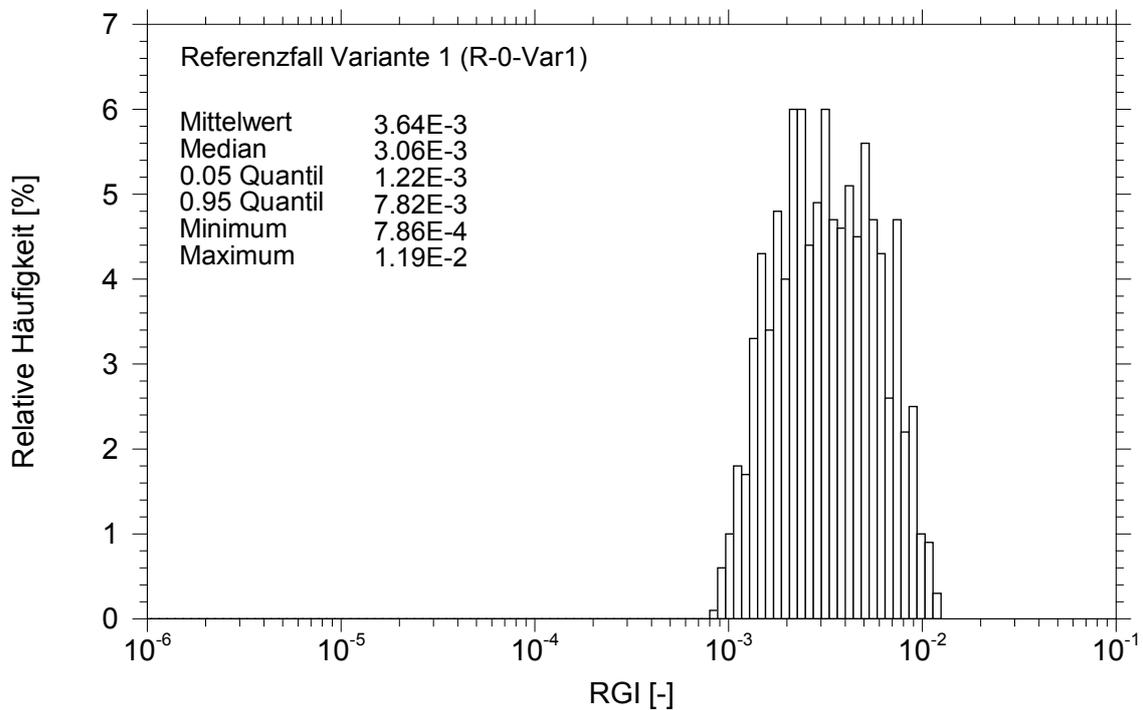


Abb. 4.23 Häufigkeitsdichte der Maximalwerte des RGI am Schacht; Referenzfall, feine Ortsdiskretisierung

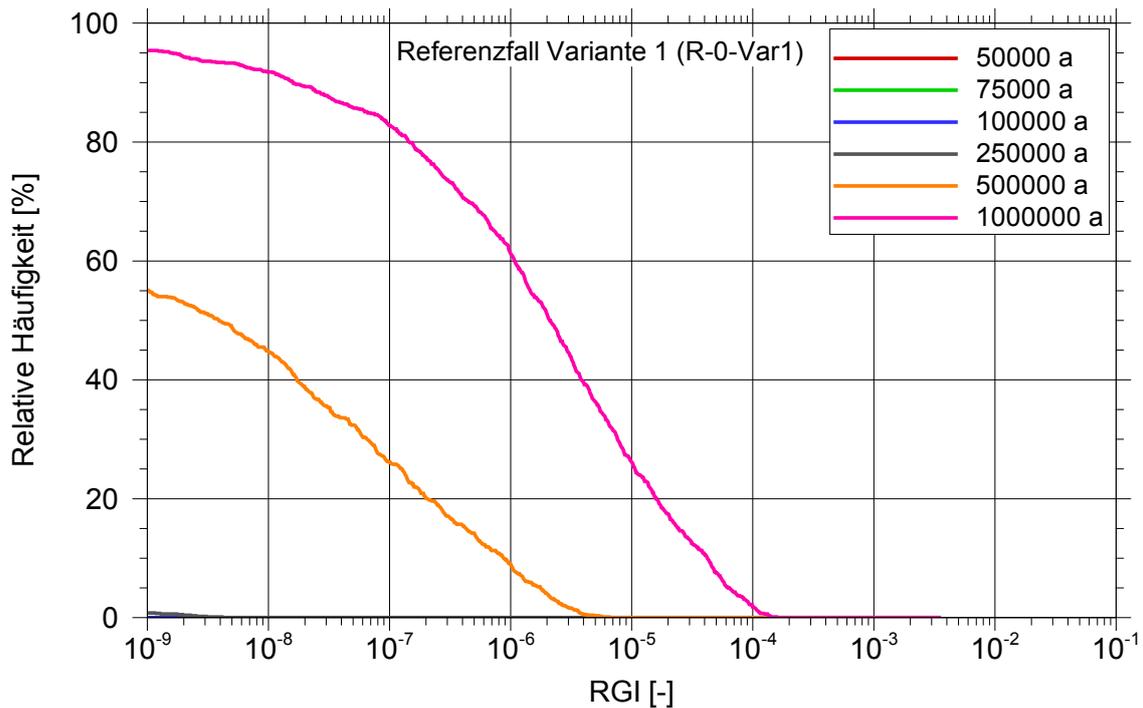


Abb. 4.24 Komplementäre kumulative Häufigkeit des RGI am Schacht; Referenzfall, feine Ortsdiskretisierung

4.1.2.2 Länge der Richtstrecke

Basierend auf der in Kapitel 4.1.2.1 behandelten Variante des Referenzfalls (Einfluss einer feinen Ortsdiskretisierung) wird untersucht, welchen Einfluss die Länge der Richtstrecke RS-O1 hat. Dieser Variante R-0-Var2 liegt die Überlegung zu Grunde, dass der diffusive Transport aus den Einlagerungsfeldern im östlichen Einlagerungsbereich in Richtung Schacht verzögert werden kann, wenn die an den Infrastrukturbereich angrenzende Transportstrecke länger ist. In dieser Variante wird angenommen, dass die Richtstrecke RS-O1, die sonst eine Länge von 300 m hat, in 5 Teile von jeweils 200 m Länge geteilt wird. Diese Teile werden zunächst nicht weiter in Blöcke unterteilt. Eine Unterteilung in Blöcke von ca. 20 m bzw. 2 m Länge wird in Kapitel 4.1.2.3 behandelt.

Die Verlängerung der Richtstrecke RS-O1 in Kombination mit der groben Diskretisierung (200 m Blocklänge) bewirkt, eine deutliche Verschiebung des Transportes eines Großteils der Radionuklide. Dabei ist zu beachten, dass die feine Diskretisierung außer für den Richtstreckenteil RS-O1 (bzw. RN-O1) für alle anderen Richtstreckenteile unverändert ist.

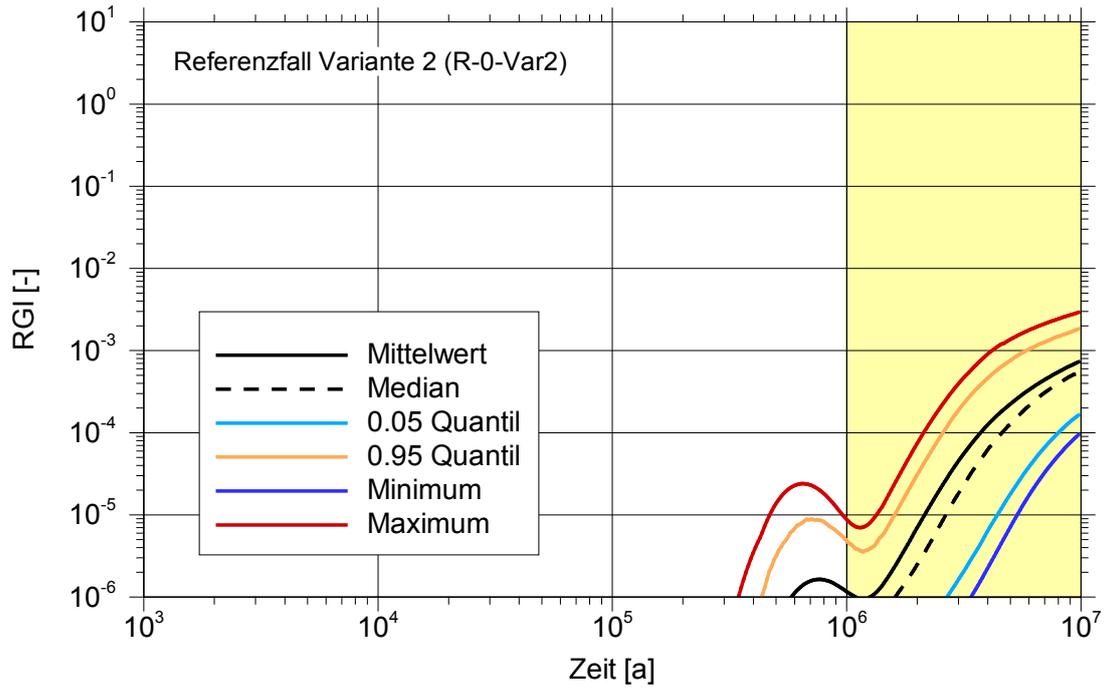


Abb. 4.25 Zeitlicher Verlauf der statistischen Kenngrößen des RGI am Schacht; Referenzfall, RS-O1 verlängert, aber nicht intern diskretisiert

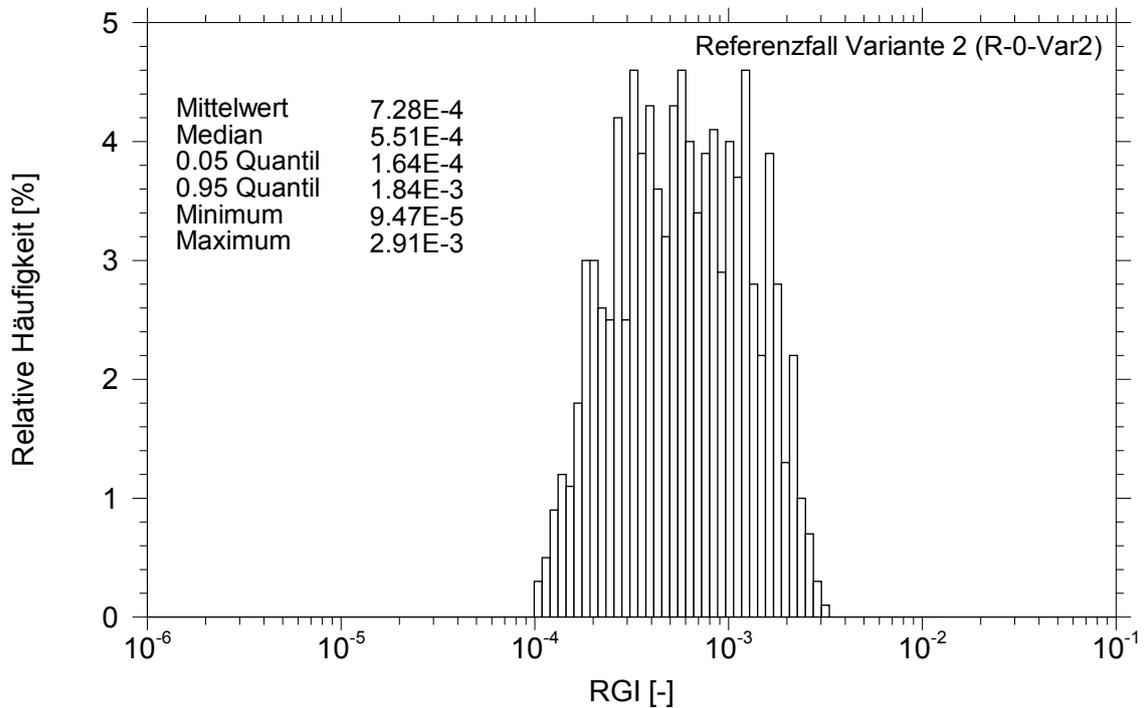


Abb. 4.26 Häufigkeitsdichte der Maximalwerte des RGI am Schacht; Referenzfall, RS-O1 verlängert, aber nicht intern diskretisiert

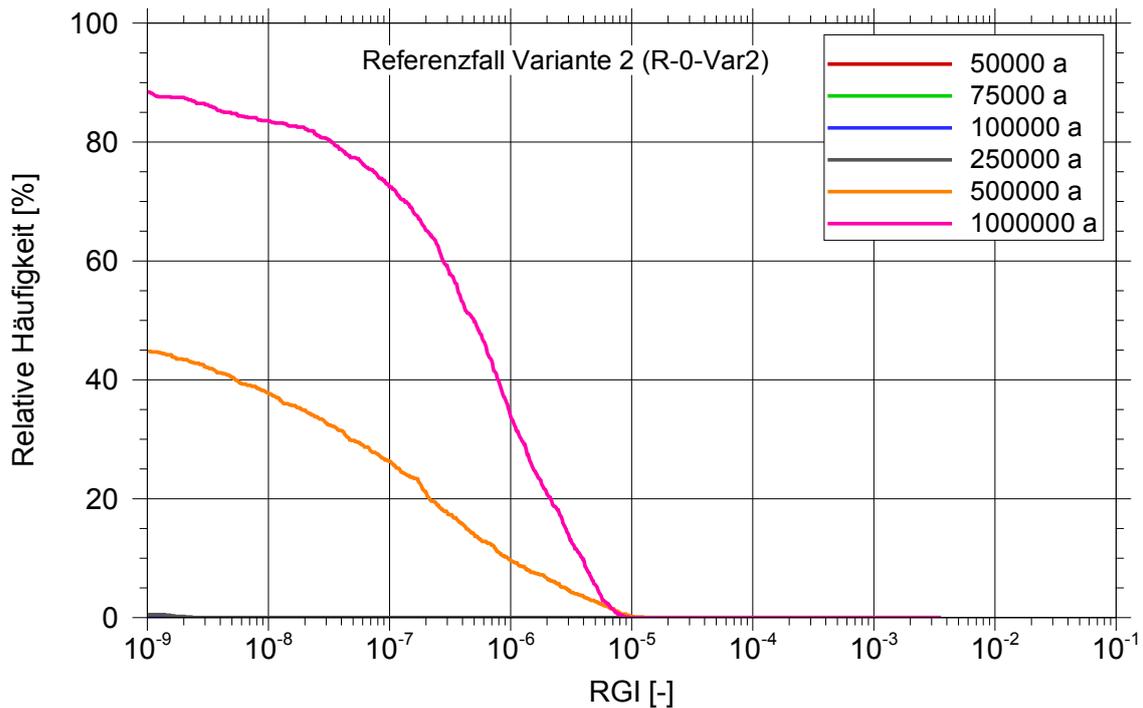


Abb. 4.27 Komplementäre kumulative Häufigkeit des RGI am Schacht; Referenzfall, RS-O1 verlängert, aber nicht intern diskretisiert

4.1.2.3 Geänderte Diskretisierung der verlängerten Richtstrecke

Basierend auf der in Kapitel 4.1.2.2 behandelten Variante des Referenzszenariums (Einfluss einer verlängerten Richtstrecke RS-O1) wird untersucht, welchen Einfluss die räumliche Diskretisierung der einzelnen Teile der Richtstrecke RS-O1 auf die Rechnergebnisse hat. Hierzu werden die Teile jeweils in $2n+1$ Blöcke unterteilt, d. h. in 11 Blöcke ($n=5$) bzw. 99 Blöcke ($n=49$) mit Blocklängen von $200/11 \approx 18$ m bzw. $200/99 \approx 2$ m. Beide Rechnungen werden als Variante R-0-Var3 bezeichnet.

Auf die statistischen Kenngrößen hat die interne Diskretisierung von RS-O1 praktisch keine Auswirkungen. Dies ist an den Kurven in Abbildung 4.28 gegenüber Abbildung 4.25 zu erkennen. Auch die Verteilungsfunktionen des RGI und die komplementären kumulativen Häufigkeitsverteilungen sind kaum unterschiedlich. Für die Variante mit 99 Blöcken sind die Ergebnisse nahezu identisch und werden hier nicht dargestellt.

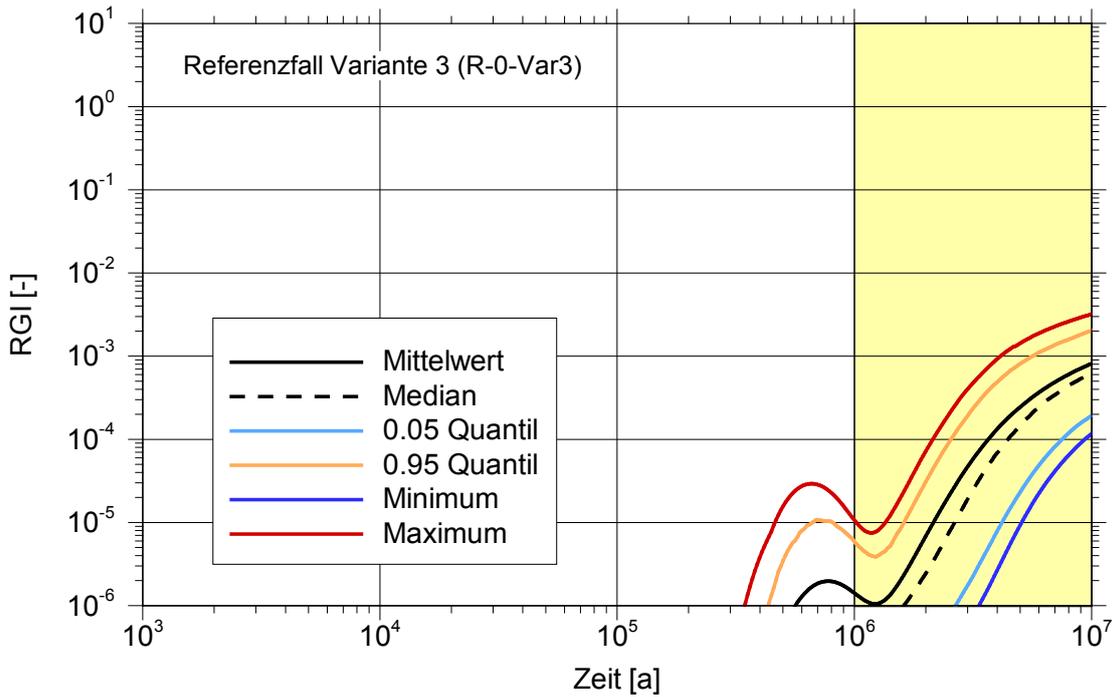


Abb. 4.28 Zeitlicher Verlauf der statistischen Kenngrößen des RGI am Schacht; Referenzfall, RS-O1 verlängert; Blocklänge 18 m (R-0-Var3)

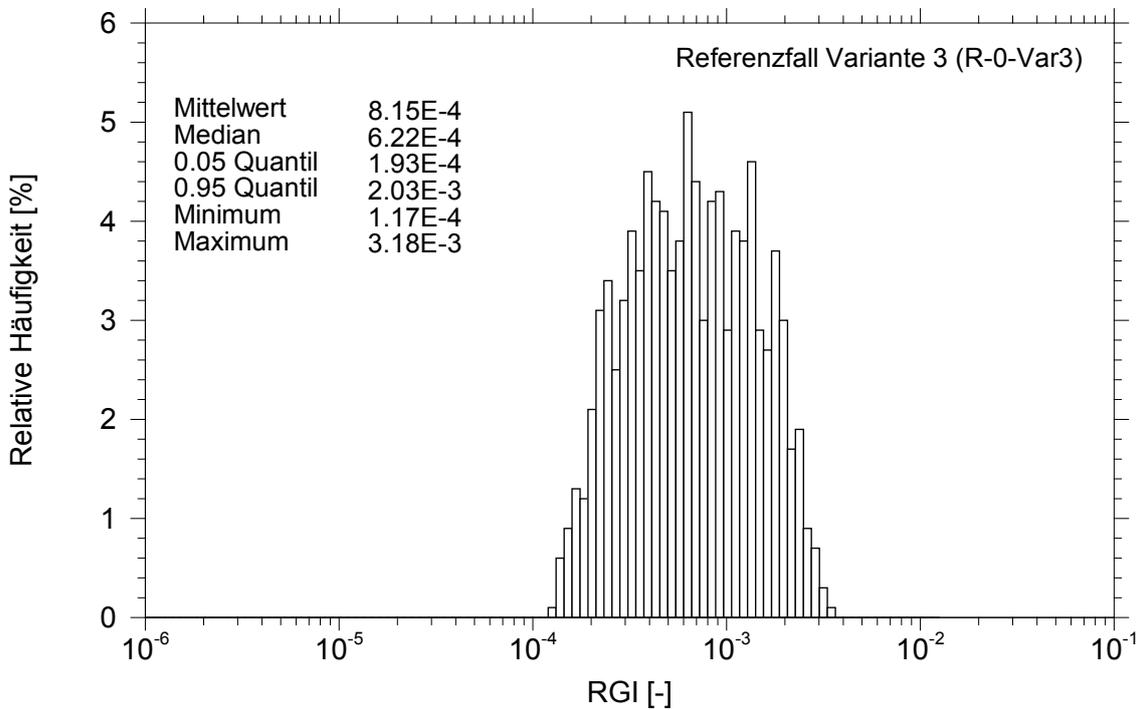


Abb. 4.29 Häufigkeitsdichte der Maximalwerte des RGI am Schacht; Referenzfall, RS-O1 verlängert; Blocklänge 18 m (R-0-Var3)

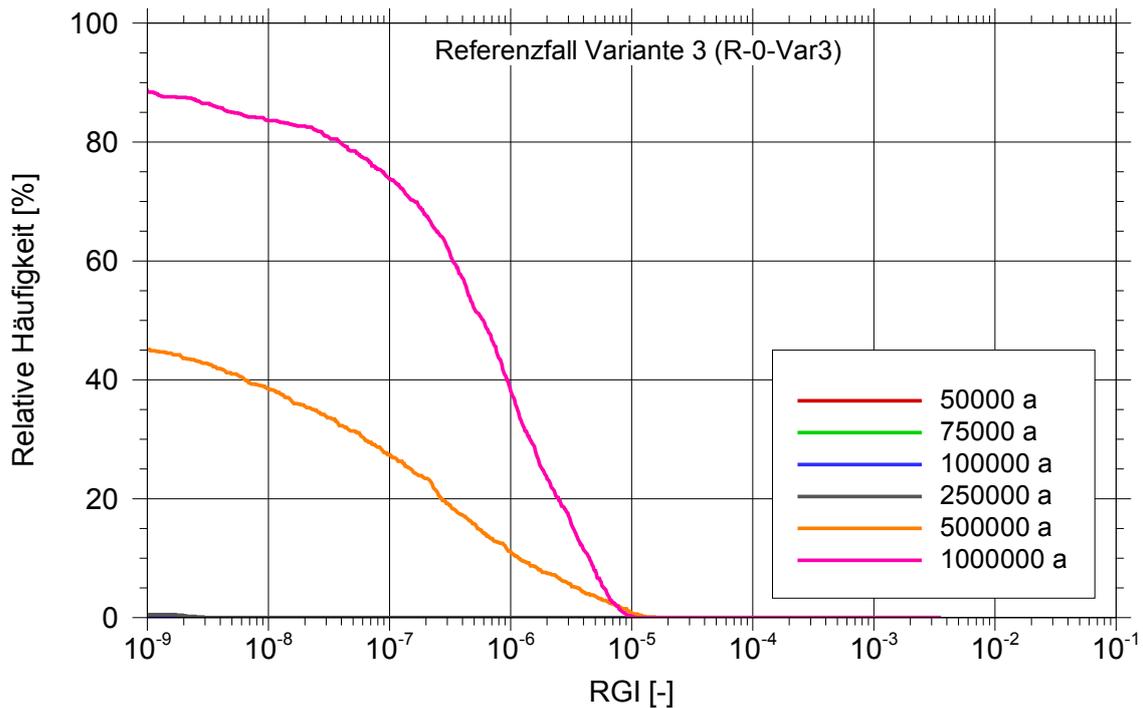


Abb. 4.30 Komplementäre kumulative Häufigkeit des RGI am Schacht; Referenzfall, RS-O1 verlängert, Blocklänge 18 m (R-0-Var3)

4.1.2.4 Verkleinerung des ewG

Im Vorhaben VSG wurde als Rand des ewG der Austrittsort des Streckenverschlusses zum Infrastrukturbereich gewählt. Um die hier erzielten Ergebnisse mit den VSG-Ergebnissen vergleichen zu können, wurde eine Rechnung durchgeführt, bei der der Rand des ewG nicht am Schacht, sondern am Streckenverschluss zur Richtstrecke RS-O1 liegt (R-0-Var4).

Bei den Maximalwerten des berechneten RGI ist zu beachten, dass die Skala gegenüber dem Referenzfall um zwei Größenordnungen verschoben ist (vgl. Abbildung 4.31), d. h. der maximale RGI ist etwa 2 Größenordnungen größer als am Rand eines ewG, der sich am Schacht befindet (Abbildung 4.19).

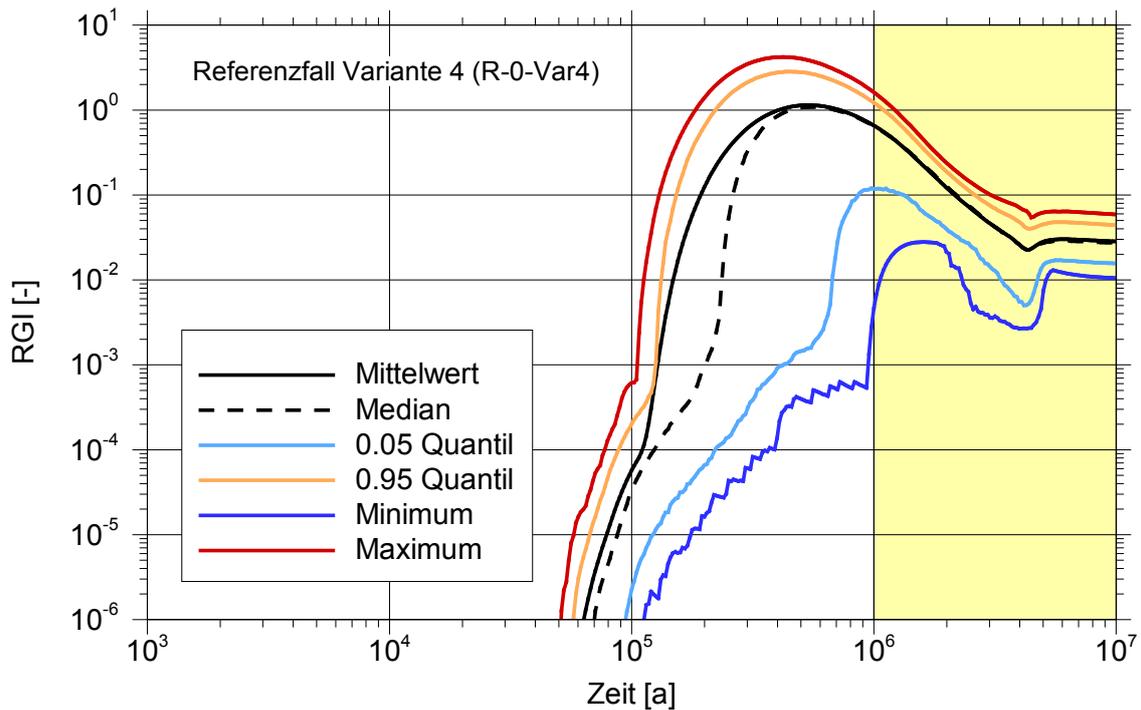


Abb. 4.31 Zeitlicher Verlauf der statistischen Kenngrößen des RGI am Streckenverschluss; Referenzfall, Rand des ewG an RS-VO

In den hier vorgelegten Rechnungen sind die RGI-Werte stets größer als im Vorhaben VSG. Dies ist die Konsequenz aus der unterschiedlichen Modellierung des Verhaltens von Salzgrus bei sehr kleinen Porositäten. Während in der VSG angenommen wurde, dass unterhalb eines Grenzwertes der Porosität kein Transport stattfindet, wird hier angenommen, dass ein Transport (vor allem diffusiv) weiterhin möglich ist.

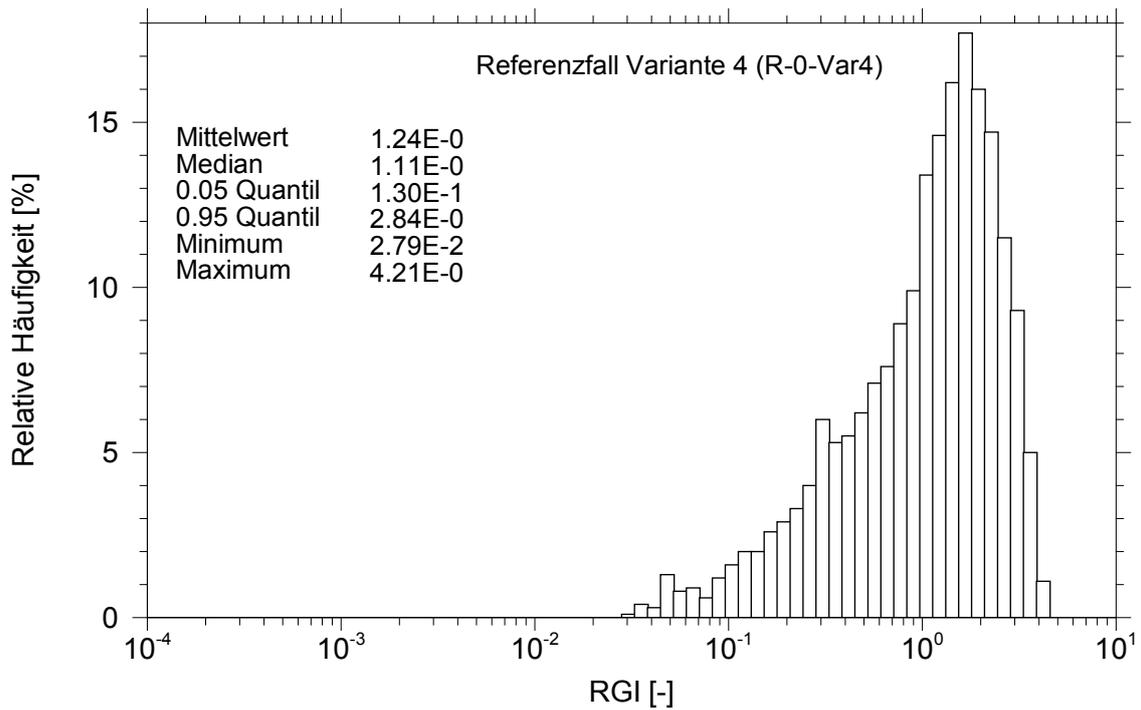


Abb. 4.32 Häufigkeitsdichte der Maximalwerte des RGI am Streckenverschluss; Referenzfall, Rand des ewG an RS-VO

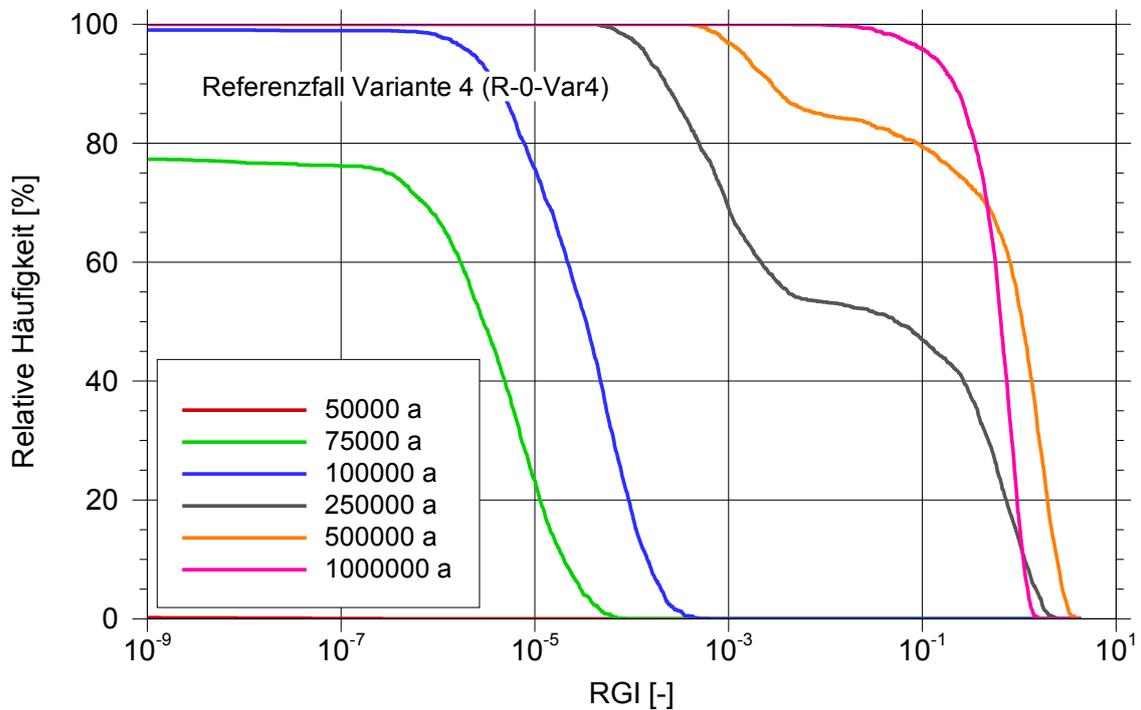


Abb. 4.33 Komplementäre kumulative Häufigkeit des RGI am Streckenverschluss; Referenzfall, Rand des ewG an RS-VO

4.1.2.5 Schnelle Konvergenz

Die Variante R-0-Var5 des Referenzfalls wurde mit der Konvergenzparametrisierung „schnell“ gemäß VSG gerechnet. Die berechneten RGI-Werte sind ähnlich denjenigen mit der Konvergenzparametrisierung „langsam“. Die statistischen Kennwerte in Abbildung 4.34 unterscheiden sich kaum von denjenigen in Abbildung 4.19.

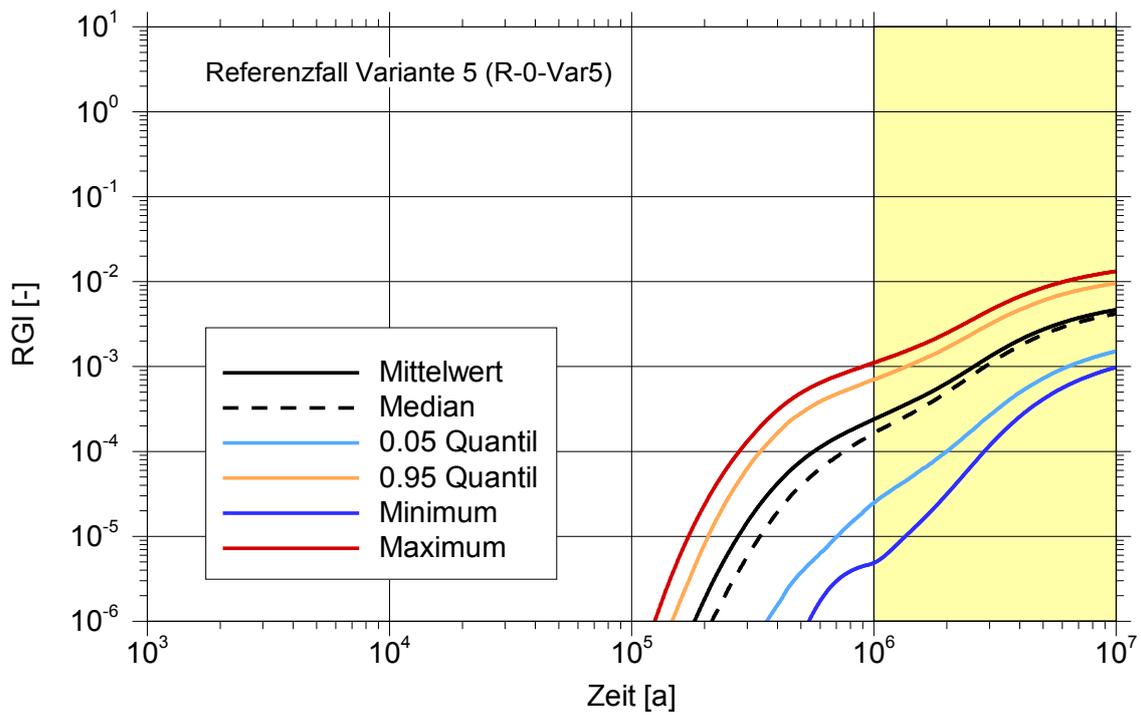


Abb. 4.34 Zeitlicher Verlauf der statistischen Kenngrößen des RGI am Schacht; Referenzfall, schnelle Konvergenz

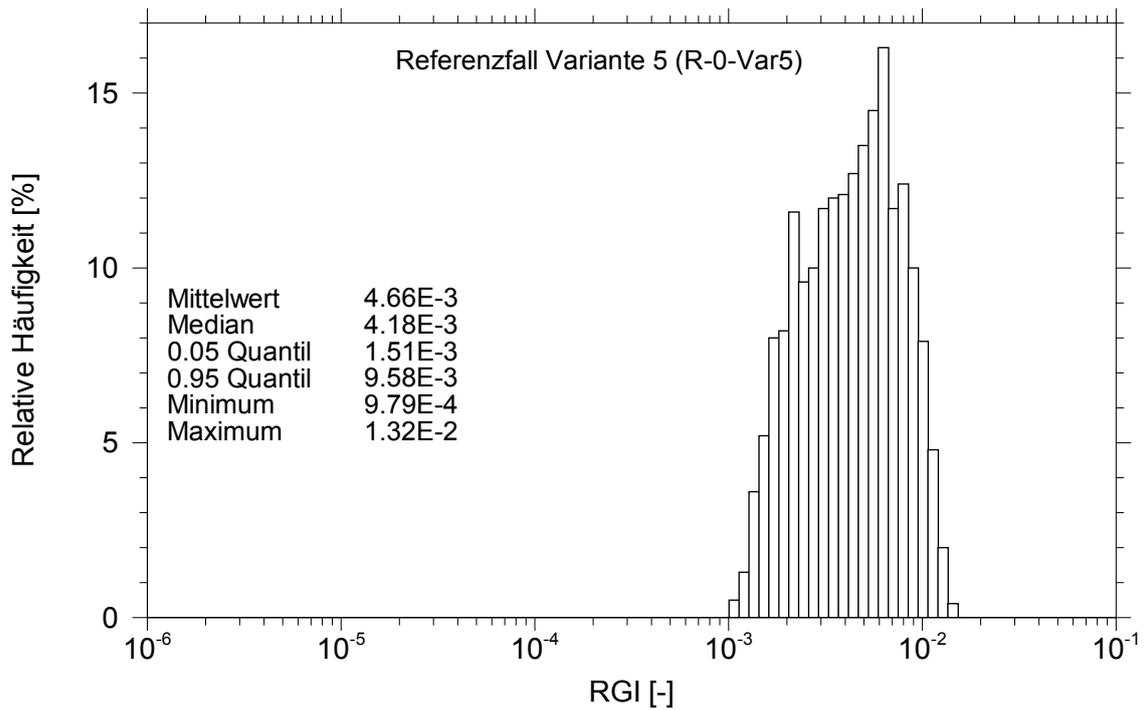


Abb. 4.35 Häufigkeitsdichte der Maximalwerte des RGI am Schacht; Referenzfall, schnelle Konvergenz

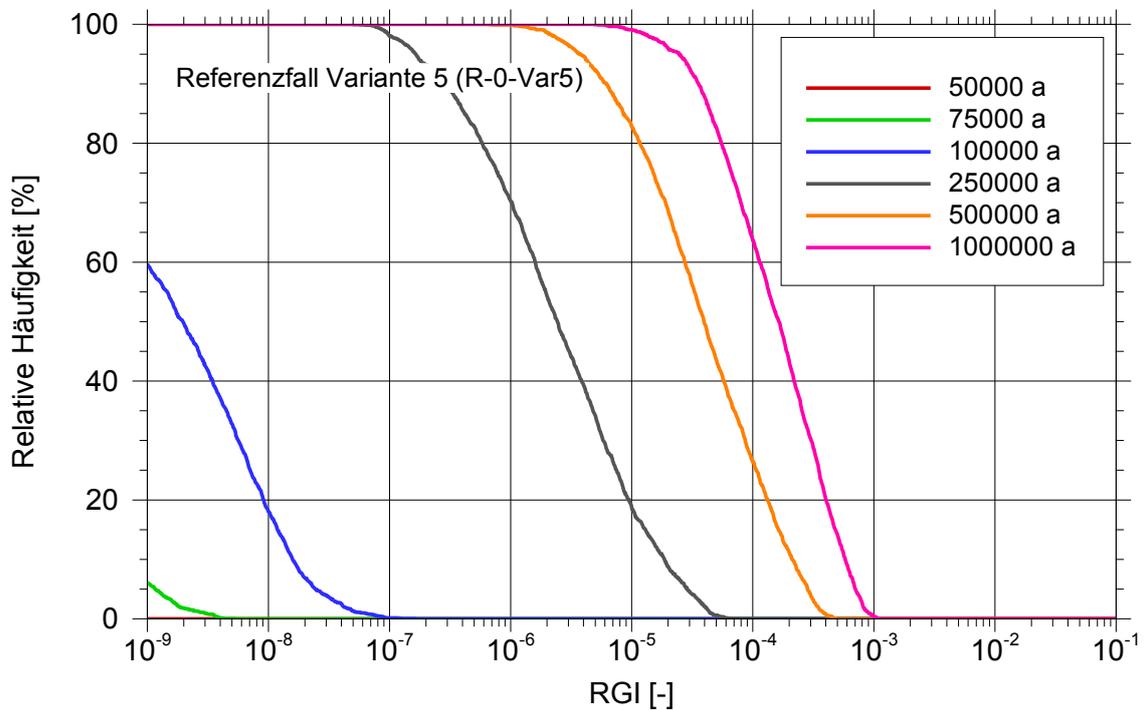


Abb. 4.36 Komplementäre kumulative Häufigkeit des RGI am Schacht; Referenzfall, schnelle Konvergenz

4.1.3 Sensitivitätsanalyse

Für den in Kapitel 4.1.2 diskutierten Referenzfall und die Variante mit feiner Ortsdiskretisierung (Kapitel 4.1.2.1) wurden Sensitivitätsanalysen durchgeführt, um die relevanten Parameter zu ermitteln. Die hier dargestellten Analysen basieren jeweils auf der Stichprobe der maximalen RGI-Werte.

4.1.3.1 Referenzfall

In Abbildung 4.37 ist für die unabhängigen Variablen der Verlauf des anteiligen Beitrags der nach Größe geordneten Werte zum Stichproben-Mittelwert (contribution to sample mean, CSM) dargestellt [BOL 09]. Aus den stärkeren Abweichungen der Kurven vom linearen Verlauf lässt sich ableiten, dass die Parameter „Diffusionskoeffizient“, „Grenzporosität“, und „Löslichkeitsgrenzen“ die größte Relevanz für den Transport der Radionuklide haben. Die meisten anderen unabhängigen Parameter sind nicht dargestellt, weil sie nur sehr geringe Abweichungen vom linearen Verlauf zeigen.

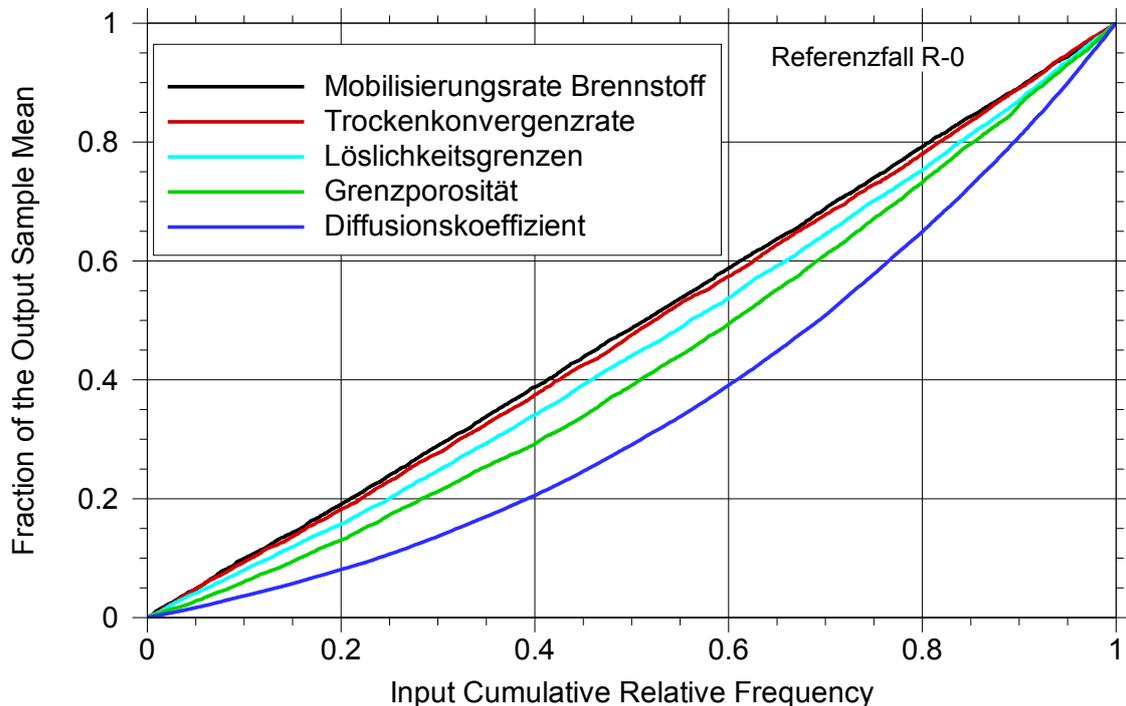


Abb. 4.37 Beitrag der unabhängigen Variablen zum Stichprobenmittel (CSM) für den Referenzfall

In einer anderen Auswertung über eine standardisierte Rang-Regression (SRRC) ergibt sich eine ähnliche Reihenfolge der wesentlichen unabhängigen Variablen, siehe

Abbildung 4.38. Für den Diffusionskoeffizienten (DiffC) ist der Koeffizient am höchsten, was auf die größte Bedeutung hinweist. Von kleinerer, aber noch relevanter Bedeutung sind die Grenzporosität (FinPor) und die Löslichkeitsgrenzen (SolLim).

Die Änderung der Inventarverteilung (InvM) wurde zur Kontrolle mit betrachtet. Diese unabhängige Variable wurde in den Rechnungen nicht variiert; ihre Bedeutung sollte also gegen Null gehen. Die Größe des Balkens in der Abbildung veranschaulicht damit den Wert des Rangkoeffizienten, der eigentlich als Null zu betrachten ist (d. h. die Variable ist ohne Bedeutung). Von geringer Bedeutung, aber ggf. noch zu betrachten sind danach die Variablen Mobilisierungsrate aus den Metallteilen (MobRateM), Versagen des Schachtverschlusses (TFail1), Länge der Abdichtungen in Strecken (LengSeal) und die Trockenkonvergenzrate (ConvDry).

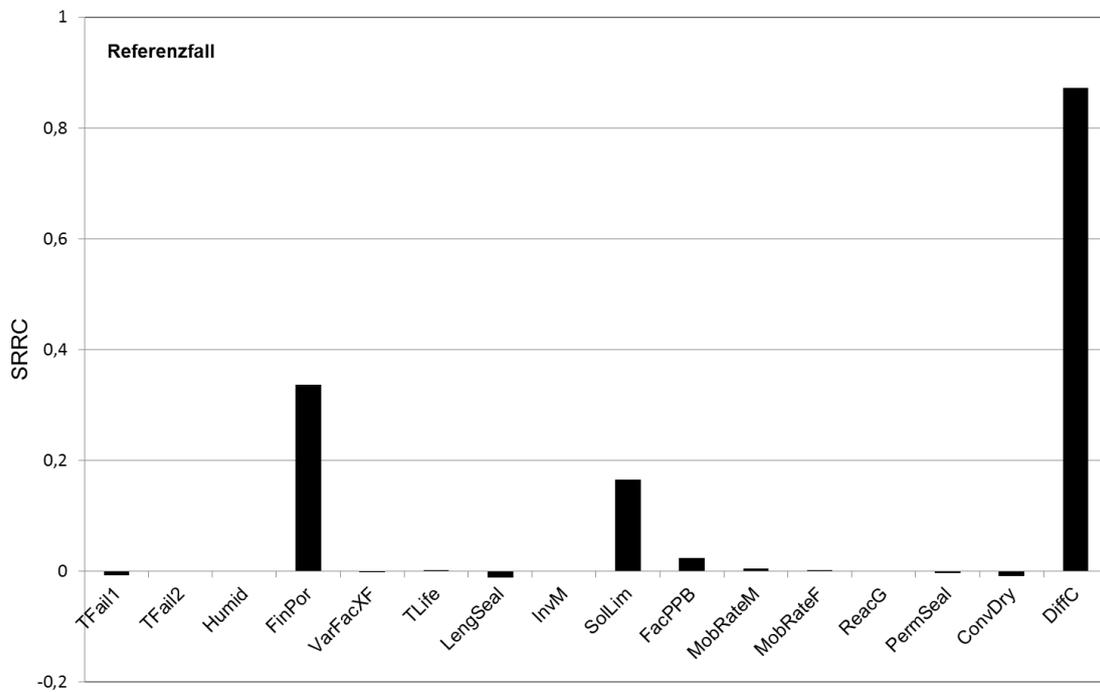


Abb. 4.38 Standardisierte Rangregressionskoeffizienten (SRRC) für den Referenzfall

Die beiden folgenden Abbildungen zeigen Scatterplots der wesentlichen Parameter „Diffusionskoeffizient“ und „Grenzporosität“. Aus der deutlichen Steigung der Punkteschar ist zu entnehmen, dass diese Parameter relevant sind. Ein großer Diffusionskoeffizient oder eine große Grenzporosität hat tendenziell einen großen RGI-Wert zur Folge.

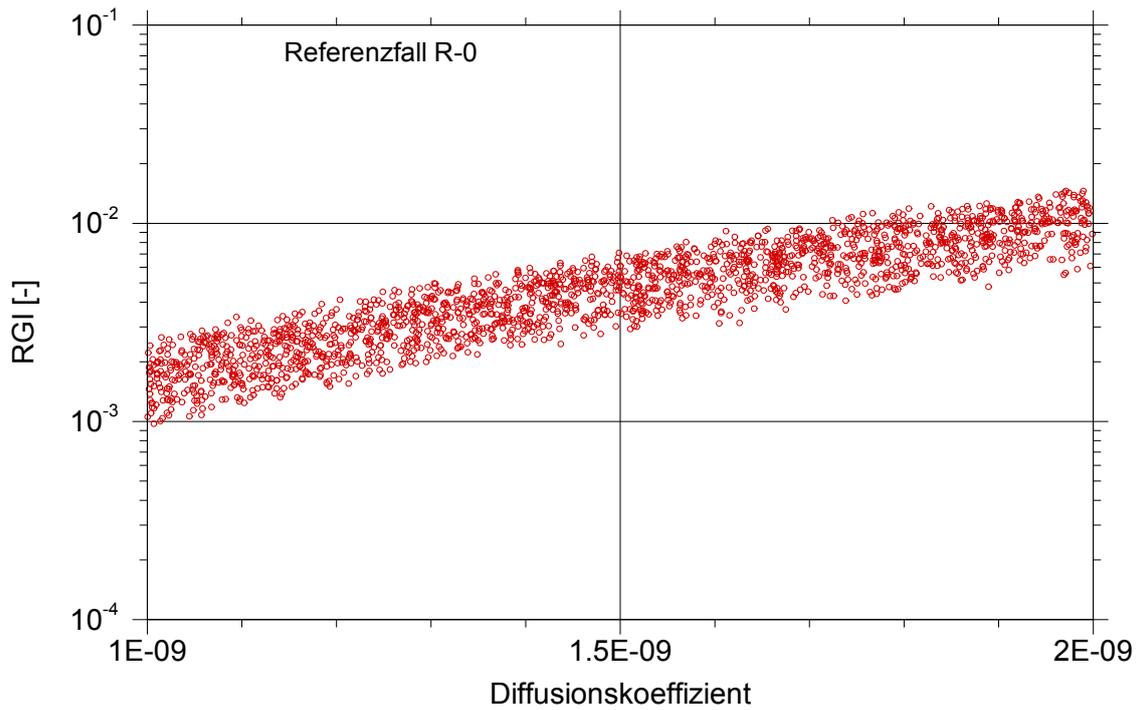


Abb. 4.39 Scatterplot für den Referenzfall: Diffusionskoeffizient

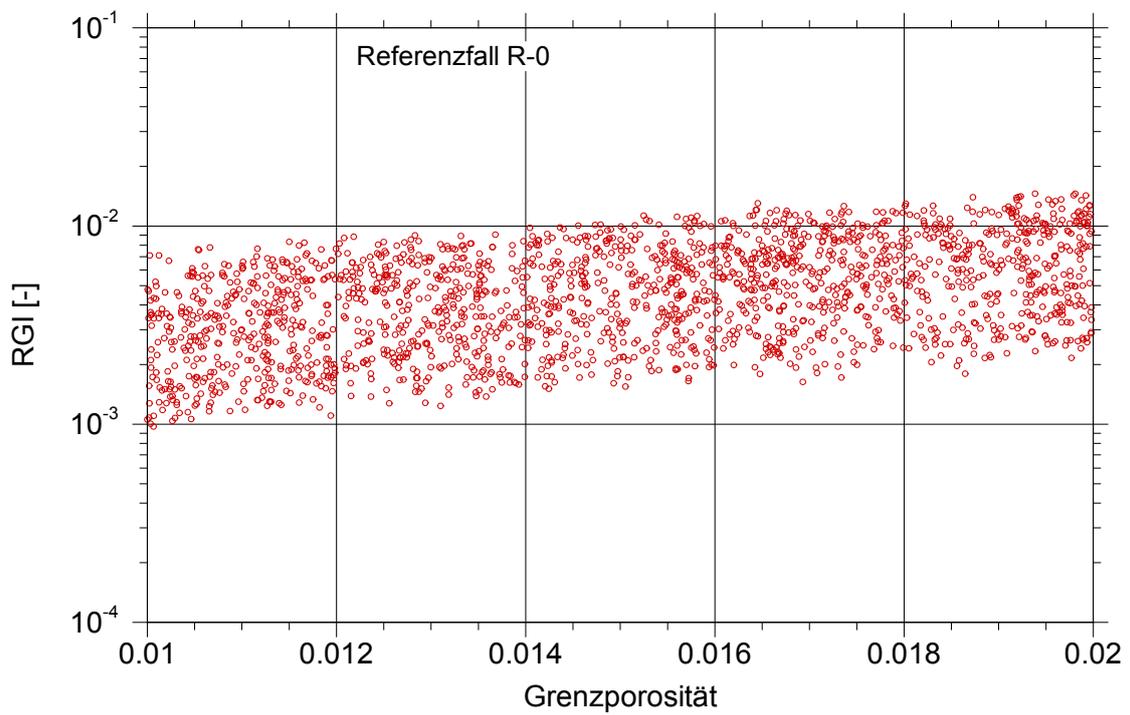


Abb. 4.40 Scatterplot für den Referenzfall: Grenzporosität

4.1.3.2 Variante mit feiner Ortsdiskretisierung

In dieser Variante sind die Richtstrecken in Blöcke von ca. 20 m Länge unterteilt. Dadurch wird der Radionuklidtransport verzögert und die berechneten RGI-Werte nehmen ab. Die Sensitivität der Parameter ist jedoch vergleichbar zum Referenzfall, siehe die Abbildungen 4.37 und 4.41.

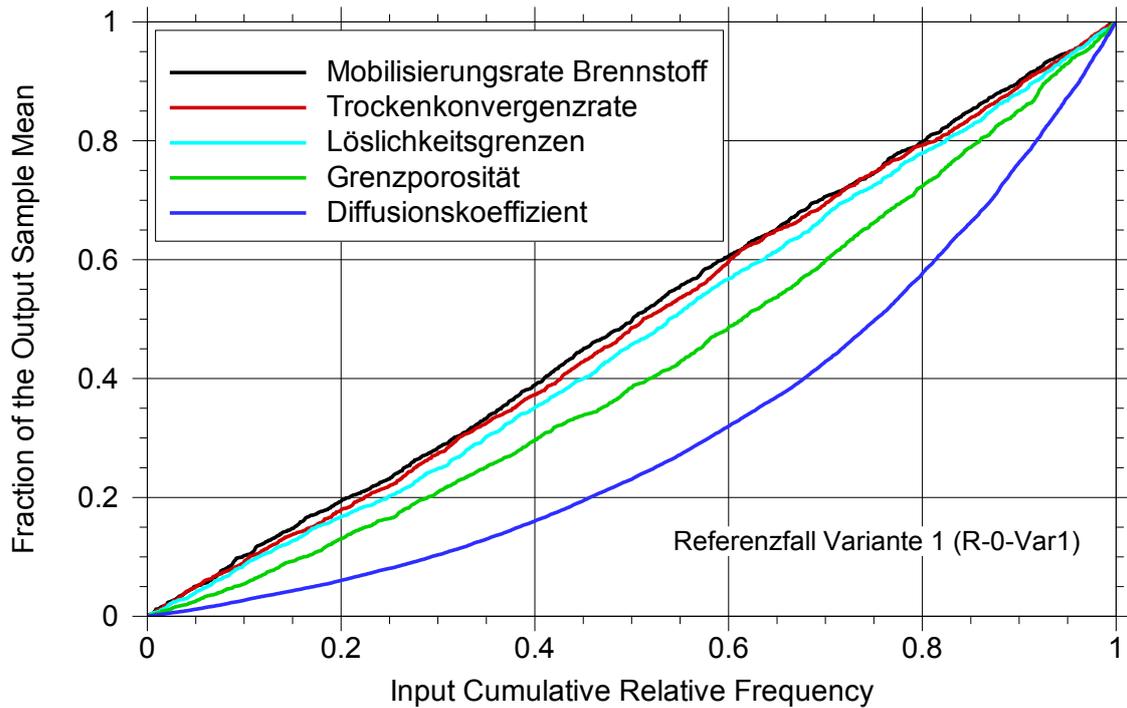


Abb. 4.41 Beitrag der unabhängigen Variablen zum Stichprobenmittel (CSM) für den Referenzfall, Variante mit feiner Ortsdiskretisierung

Die Standardisierten Rangregressionskoeffizienten sind in der Variante mit feiner Ortsdiskretisierung (Abbildung 4.42) auch vergleichbar mit dem Referenzfall, siehe Abbildung 4.38. Es ergeben sich wieder die gleichen Rangfolgen für die sensitivsten Parameter. Bei den weniger sensitiven Parametern gibt es geringe Abweichungen, diese sind aber unbedeutend.

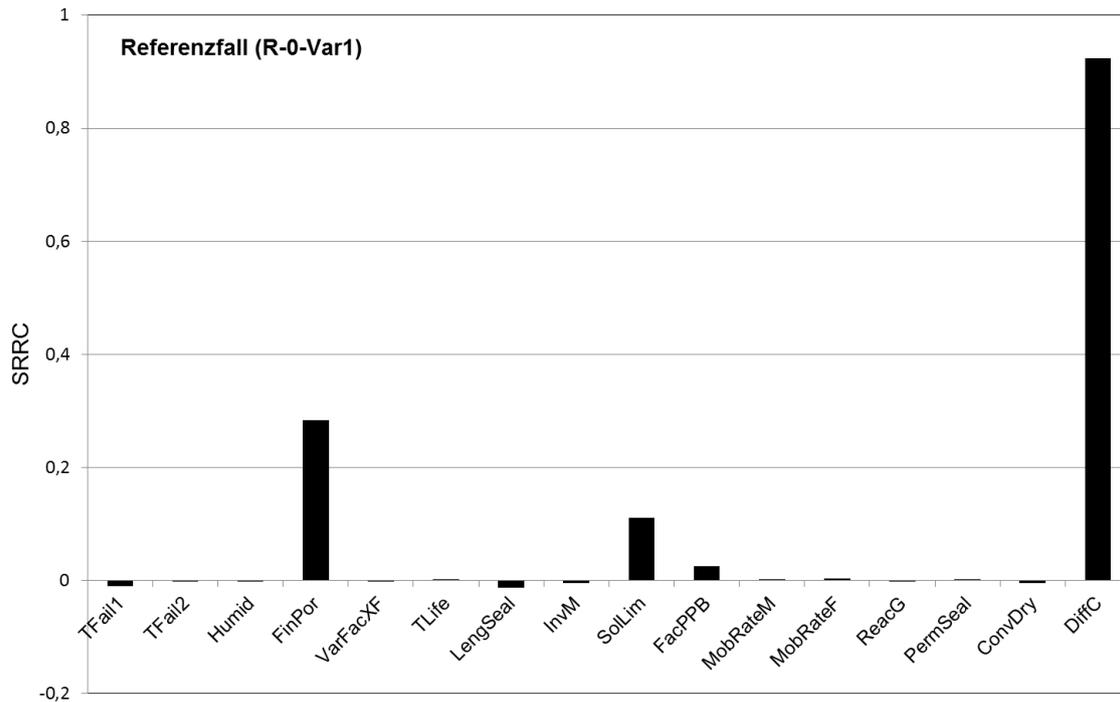


Abb. 4.42 Rangkoeffizienten gemäß SRRC für den Referenzfall, Variante mit feiner Ortsdiskretisierung (R-0-Var1)

In den folgenden Abbildungen sind Scatterplots, d. h. die Streuung der RGI-Werte in Abhängigkeit von jeweils einem Parameter, dargestellt. Für den sensitivsten Parameter, den Diffusionskoeffizienten, ist die Streuung der RGI-Werte geringfügig größer als im Referenzfall (siehe Abbildung 4.39). Für den etwas weniger sensitiven Parameter, die Grenzporosität des Versatzes, ist die Streuung etwas größer als im Referenzfall. In beiden Fällen steigt der RGI mit dem Parameterwert an, für die Grenzporosität etwas flacher als für den Diffusionskoeffizienten. Die RGI-Werte sind generell fast eine Größenordnung geringer als im Referenzfall.

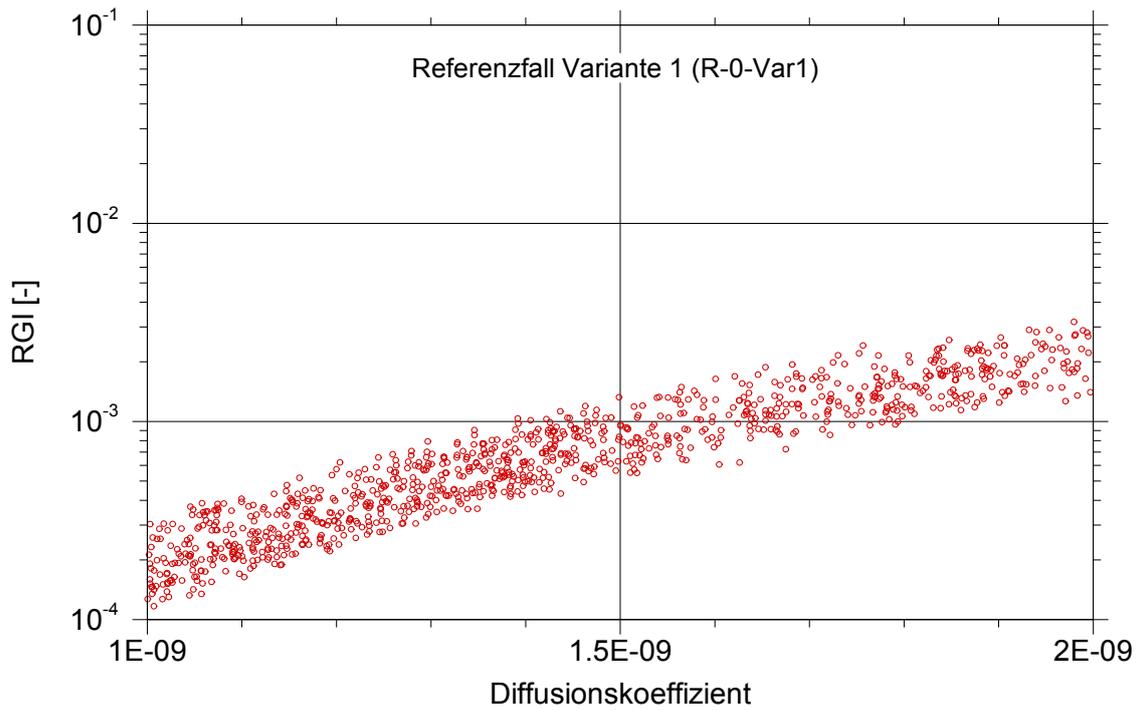


Abb. 4.43 Scatterplot für den Referenzfall, Variante mit feiner Ortsdiskretisierung: Diffusionskoeffizient

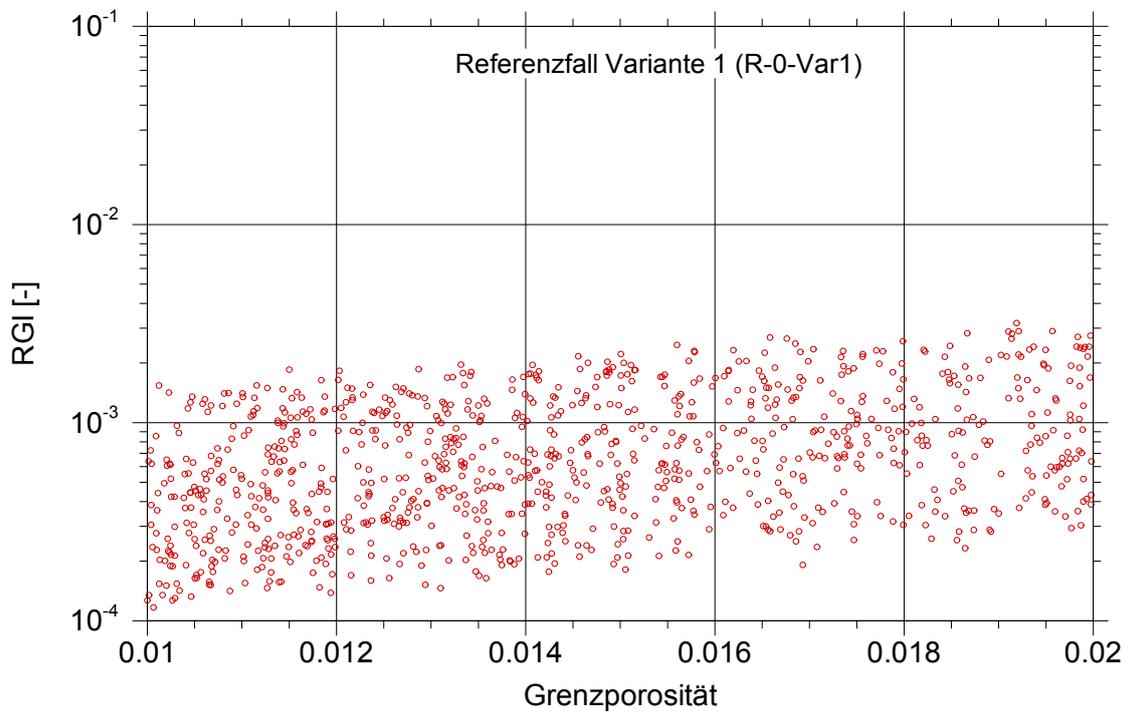


Abb. 4.44 Scatterplot für den Referenzfall, Variante mit feiner Ortsdiskretisierung: Grenzporosität

4.2 Alternativszenarien

Für die Alternativszenarien werden nur die Ergebnisse probabilistischer Rechnungen diskutiert. In einer Sicherheitsanalyse werden möglicherweise nicht alle in Frage kommenden Alternativszenarien berechnet werden können. Für eine beispielhafte Darstellung der Ergebnisse wurden im Folgenden drei Szenarien ausgewählt.

4.2.1 Frühes Versagen des Schachtverschlusses

Es ist nicht auszuschließen, dass ein Verschlussbauwerk eine geringere Standzeit hat als vorgesehen. In diesem Alternativszenarium wird angenommen, dass der Schachtverschluss zu frühen Zeiten (mit einer Bandbreite von 0 bis 10.000 Jahren) versagt, siehe Tabelle 3.24.

In Abbildung 4.45 sind die zeitlichen Verläufe der statistischen Kenngrößen zum Vergleich mit dem Referenzfall über einen Betrachtungszeitraum von 10 Millionen Jahren dargestellt. Die Kenngrößen unterscheiden sich praktisch nicht von denjenigen des Referenzfalls.

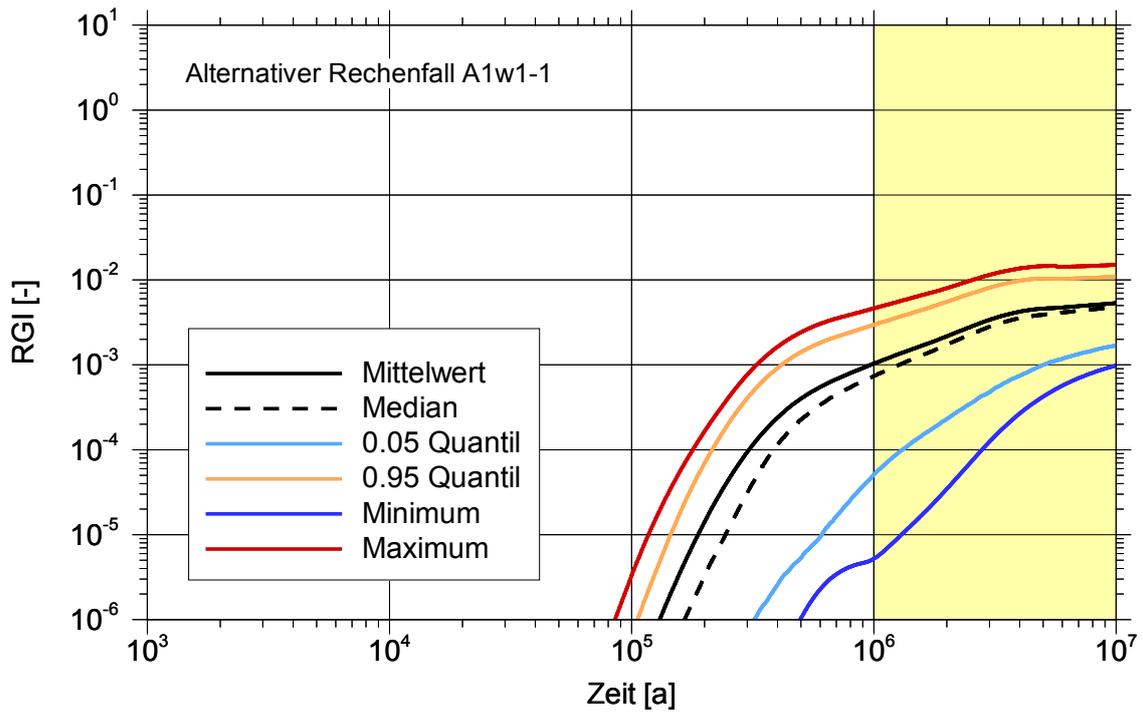


Abb. 4.45 Zeitlicher Verlauf der statistischen Kenngrößen des RGI am Schacht; alternativer Rechenfall: frühes Versagen des Schachtverschlusses

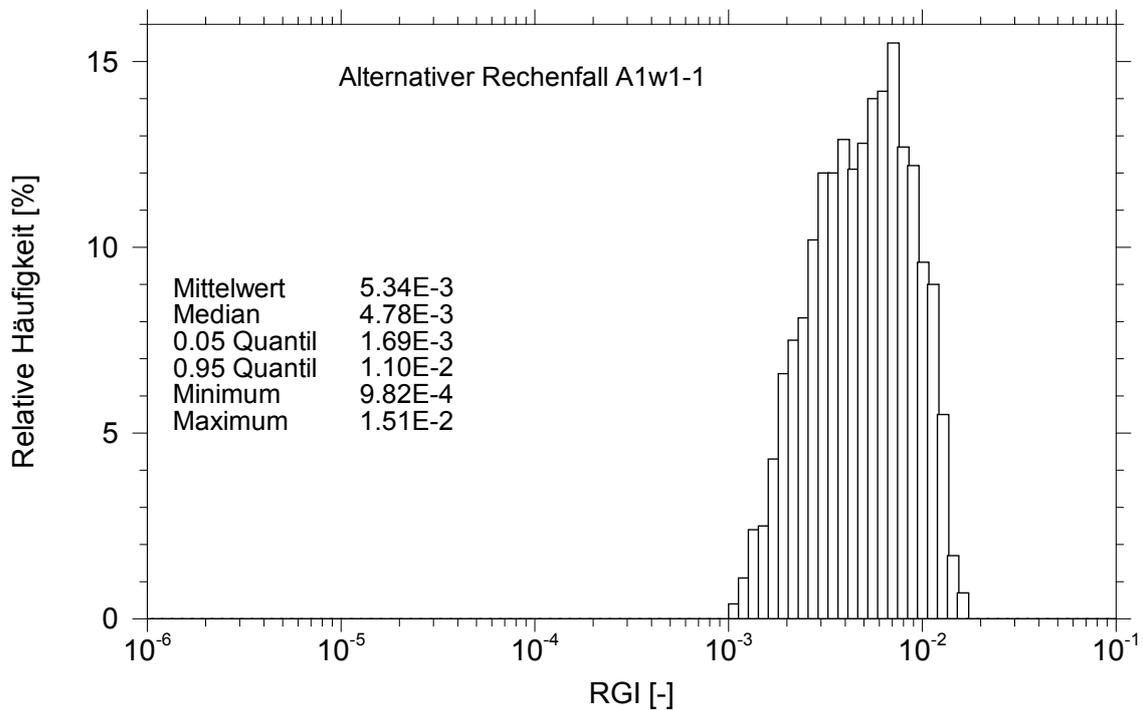


Abb. 4.46 Häufigkeitsdichte der Maximalwerte des RGI am Schacht; alternativer Rechenfall: Frühes Versagen des Schachtverschlusses

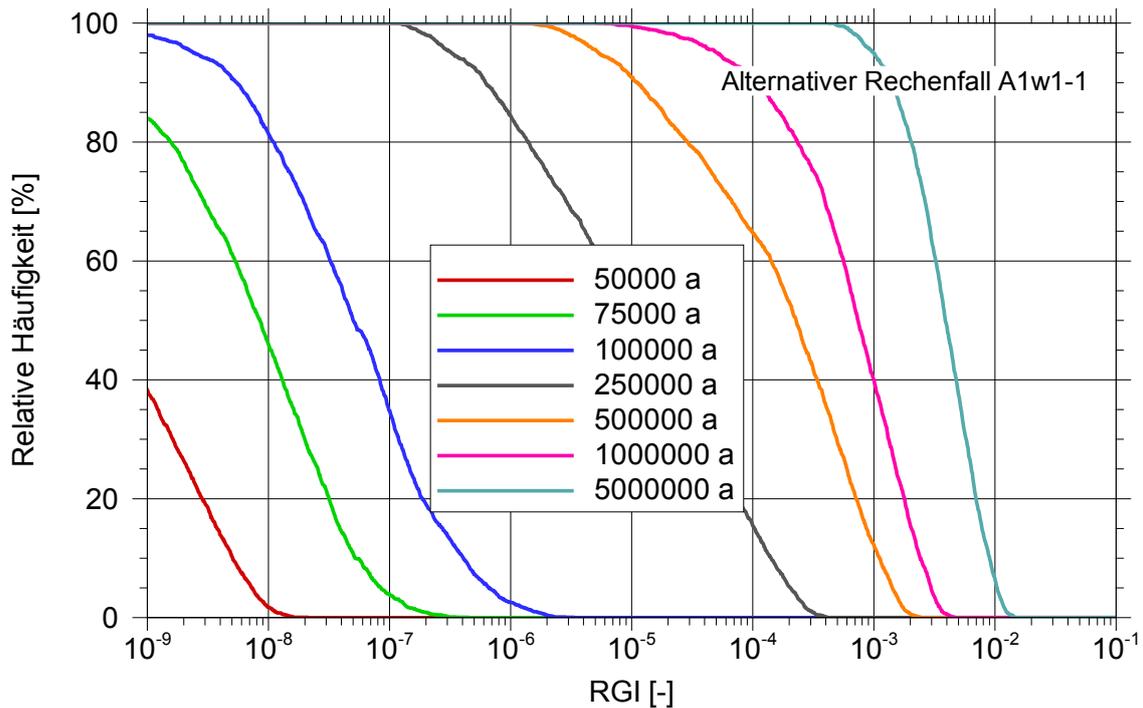


Abb. 4.47 Komplementäre kumulative Häufigkeit des RGI am Schacht; alternativer Rechenfall: Frühes Versagen des Schachtverschlusses

Ein frühes Versagen des Schachtverschlusses führt zu sehr geringen Änderungen der statistischen Kenngrößen, hat also keine Auswirkungen auf die radiologischen Konsequenzen.

4.2.2 Frühes Versagen des Streckenverschlusses

Wie beim Schachtverschluss (siehe Kapitel 4.2.1) ist nicht auszuschließen, dass ein Verschlussbauwerk in einer Strecke eine geringere Standzeit hat als vorgesehen. In diesem Alternativszenarium wird angenommen, dass der Streckenverschluss RS-VO zu frühen Zeiten (mit einer Bandbreite von 0 bis 10.000 Jahren) versagt.

In Abbildung 4.48 sind die zeitlichen Verläufe der statistischen Kenngrößen zum Vergleich mit dem Referenzfall über einen Betrachtungszeitraum von 10 Millionen Jahren dargestellt. Die Kenngrößen unterscheiden sich praktisch nicht von denjenigen des Referenzfalls.

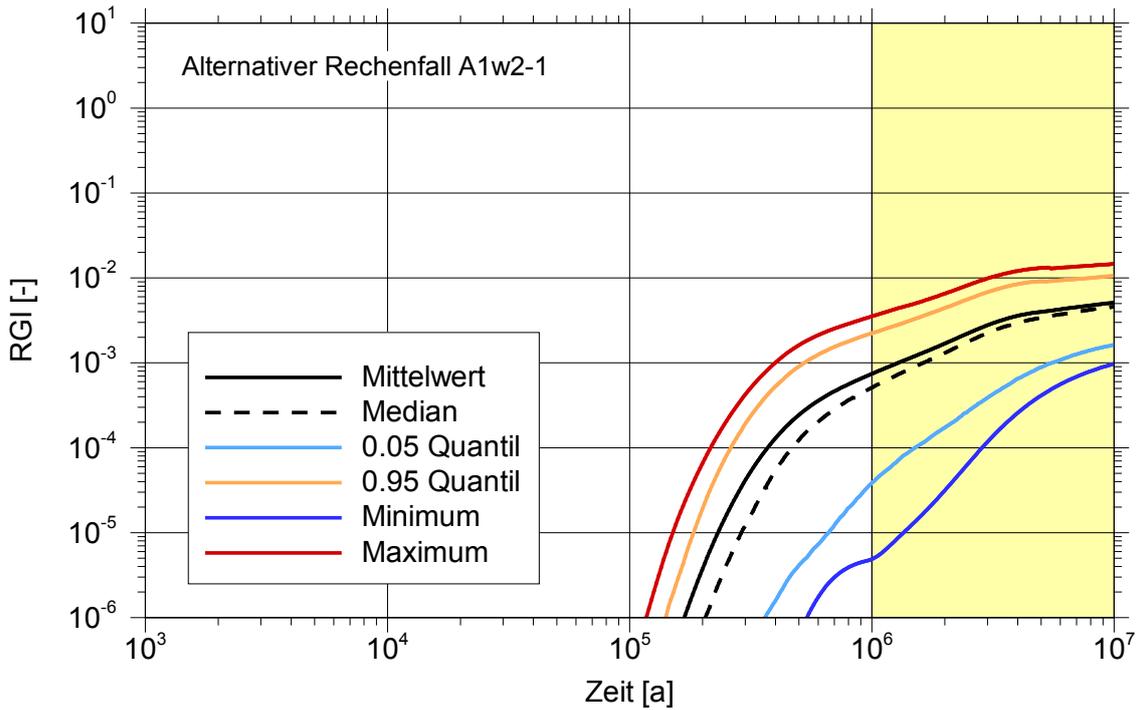


Abb. 4.48 Zeitlicher Verlauf der statistischen Kenngrößen des RGI am Schacht; alternativer Rechenfall: Frühes Versagen des Streckenverschlusses

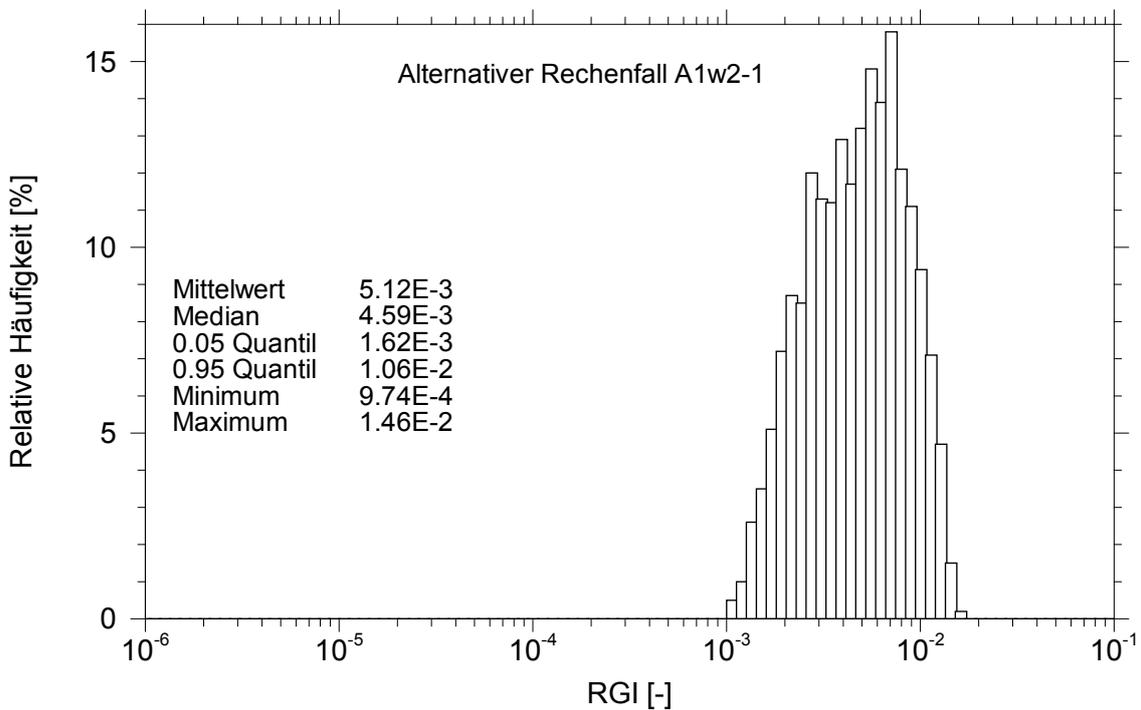


Abb. 4.49 Häufigkeitsdichte der Maximalwerte des RGI am Schacht; alternativer Rechenfall: Frühes Versagen des Streckenverschlusses

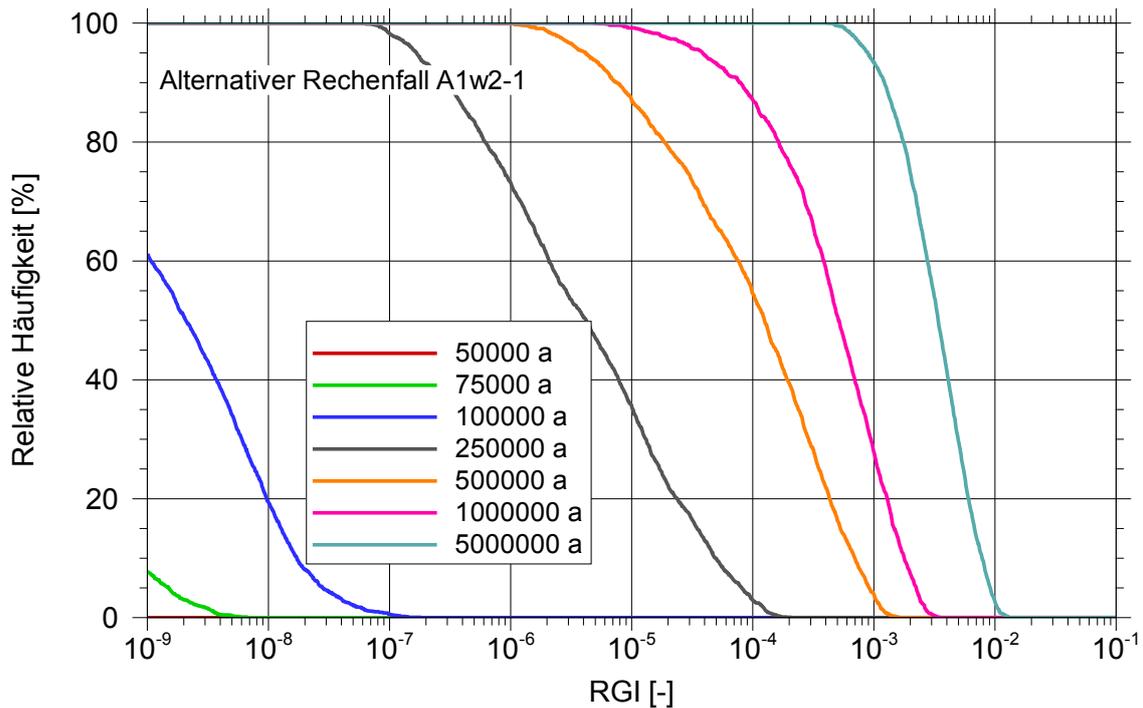


Abb. 4.50 Komplementäre kumulative Häufigkeit des RGI am Schacht; alternativer Rechenfall: Frühes Versagen des Streckenverschlusses

Ein frühes Versagen des Streckenverschlusses RS-VO führt zu sehr geringen Änderungen der statistischen Kenngrößen, hat also keine Auswirkungen auf die radiologischen Konsequenzen.

4.2.3 Größeres Anfangs-Lösungsvolumen im Infrastrukturbereich

Bei diesem alternativen Rechenfall A1i6-1 wird angenommen, dass das im Infrastrukturbereich anfangs vorhandene Lösungsvolumen größer ist als im Referenzfall. Hiermit wird der Fall simuliert, dass die aus dem Wirtsgestein in den Infrastrukturbereich zutretende Lösung aus einem größeren Reservoir stammt als im Referenzfall. Wie im Referenzfall wird das Lösungsvolumen nicht in einer Bandbreite variiert, sondern fest vorgegeben.

In Abbildung 4.51 sind die zeitlichen Verläufe der statistischen Kenngrößen zum Vergleich mit dem Referenzfall über einen Betrachtungszeitraum von 10 Millionen Jahren dargestellt. Die Kenngrößen unterscheiden sich praktisch nicht von denjenigen des Referenzfalls.

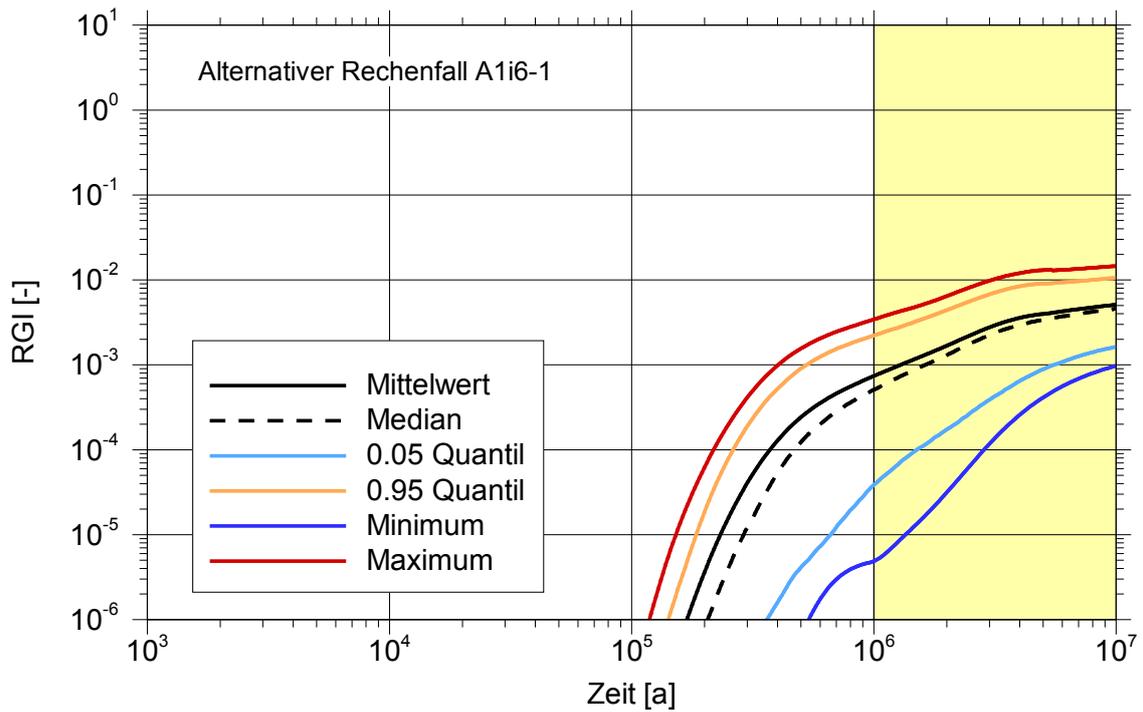


Abb. 4.51 Zeitlicher Verlauf der statistischen Kenngrößen des RGI am Schacht; alternativer Rechenfall: Lösungsvolumen INFRA-B

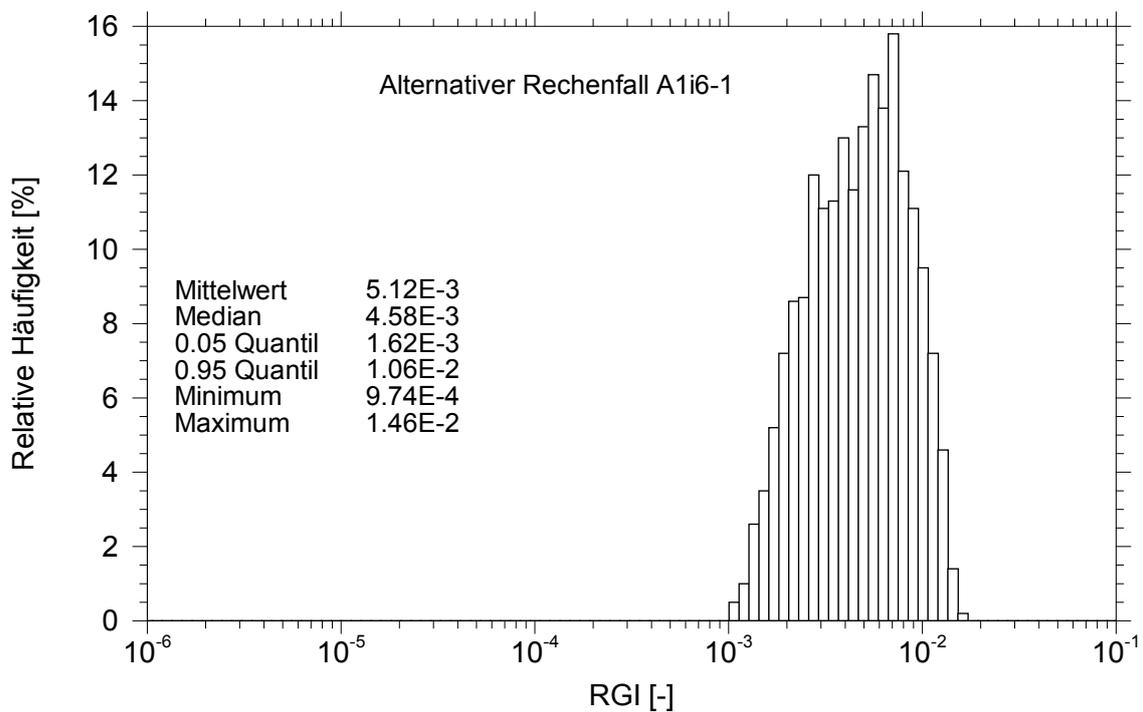


Abb. 4.52 Häufigkeitsdichte der Maximalwerte des RGI am Schacht; alternativer Rechenfall: Lösungsvolumen INFRA-B

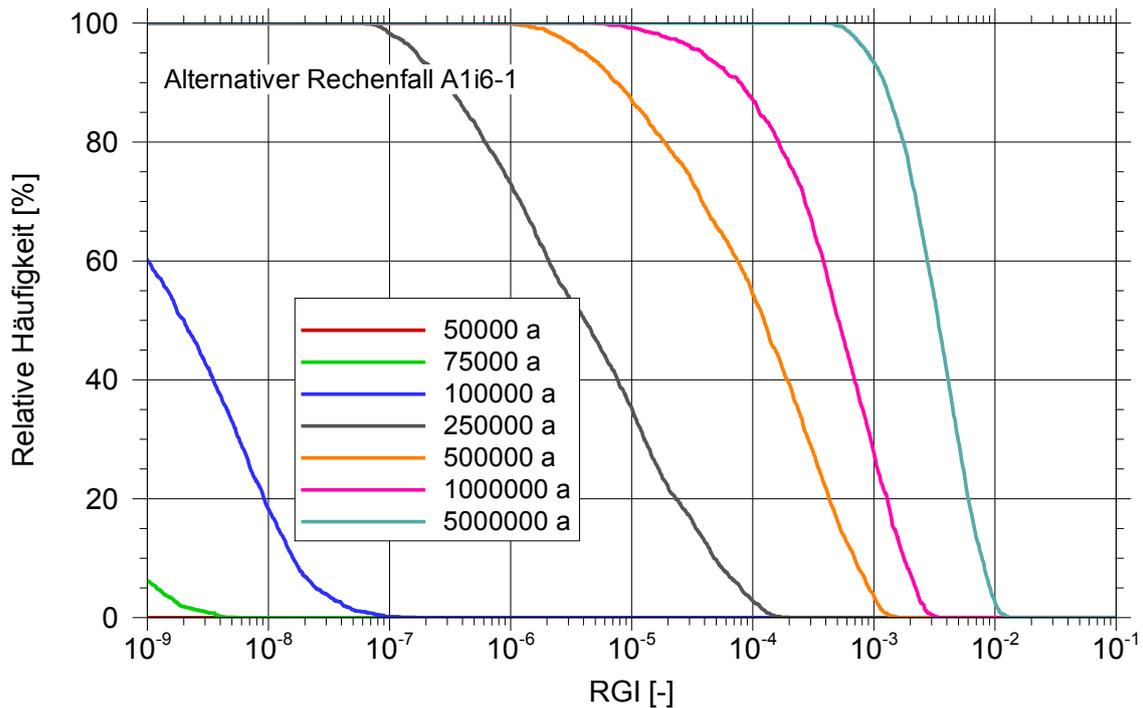


Abb. 4.53 Komplementäre kumulative Häufigkeit des RGI am Schacht; alternativer Rechenfall: Lösungsvolumen INFRA-B

Ein anfangs größeres Lösungsvolumen im Infrastrukturbereich führt zu sehr geringen Änderungen der statistischen Kenngrößen, hat also keine Auswirkungen auf die radiologischen Konsequenzen.

4.3 What-if-Rechenfälle

Wie in Kapitel 1 erläutert, werden mit What-if-Rechnungen keine Szenarien betrachtet. Im Folgenden werden extreme Bandbreiten von Parametern oder Kombinationen von Parameterwerten verwendet, um zu untersuchen, wie sich das Endlagersystem in diesen Fällen verhält. In einem Fall wird untersucht, wie sich die Ergebnisse für das früher verwendete Verfahren, alle unabhängigen Parameter gleichzeitig zu variieren, von den hier dargestellten Ergebnissen unterscheiden.

4.3.1 Einhüllende der untersuchten Alternativszenarien

In dem vorliegenden What-if-Rechenfall wird untersucht, welche Konsequenzen die gleichzeitige Variation der Parameterwerte der betrachteten Alternativszenarien haben kann. Es wird erwartet, dass sich aus den Ergebnissen der gemeinsamen Variation ei-

ne „Einhüllende“ für die Einzelergebnisse ergibt. Da nur drei Alternativszenarien untersucht wurden, ist zu erwarten, dass sich das Ergebnis nur geringfügig von demjenigen im What-if-Rechenfall mit Kombination von zwei Alternativszenarien (Kapitel 4.3.3) unterscheidet.

Das Alternativszenarium mit erhöhtem Lösungsvolumen im Infrastrukturbereich wurde mit einer diskreten Verteilung umgesetzt: in 10 % der Simulationen wird ein Volumen von 5.100 m³ angenommen, in 90 % der Simulationen ein Volumen von 10.200 m³.

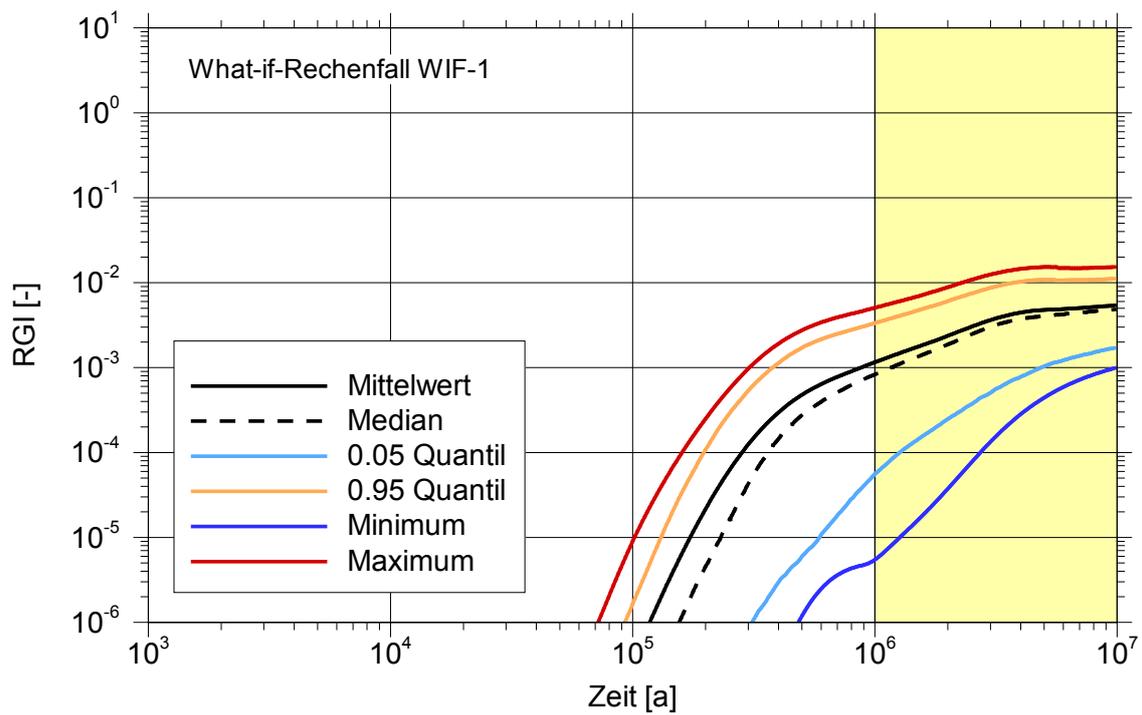


Abb. 4.54 Zeitlicher Verlauf der statistischen Kenngrößen des RGI am Schacht; What-if-Rechenfall: Einhüllende von drei Szenarien (WIF-1)

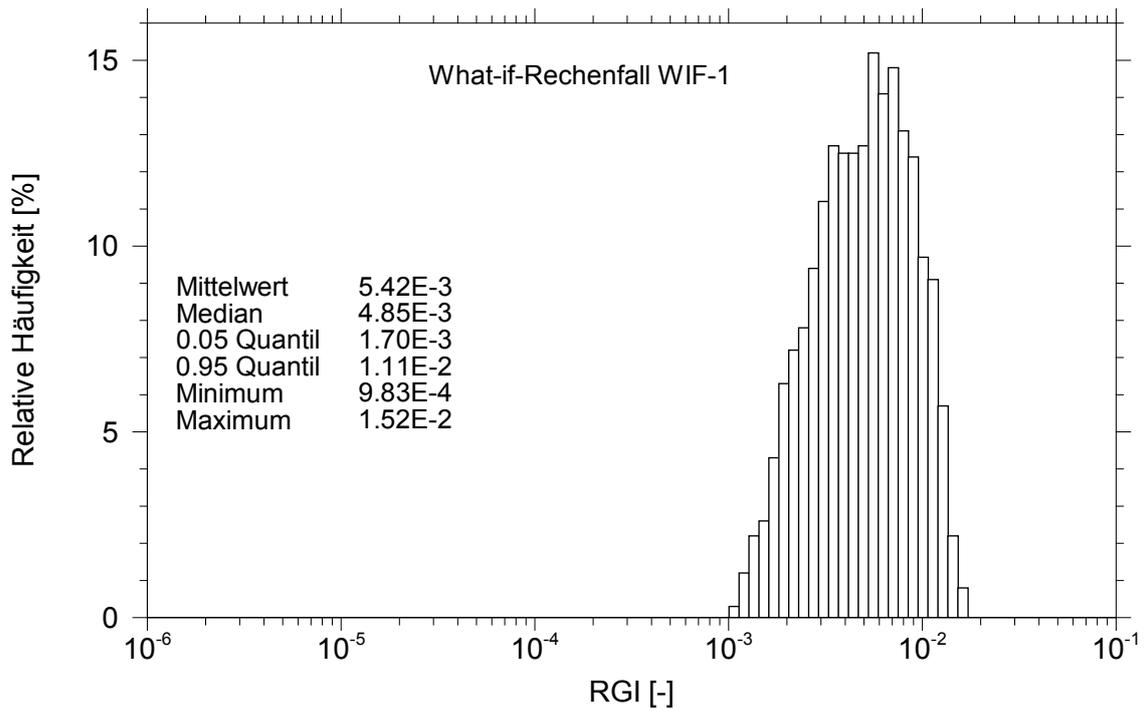


Abb. 4.55 Häufigkeitsdichte der Maximalwerte des RGI am Schacht; What-if-Rechenfall: Einhüllende von drei Szenarien (WIF-1)

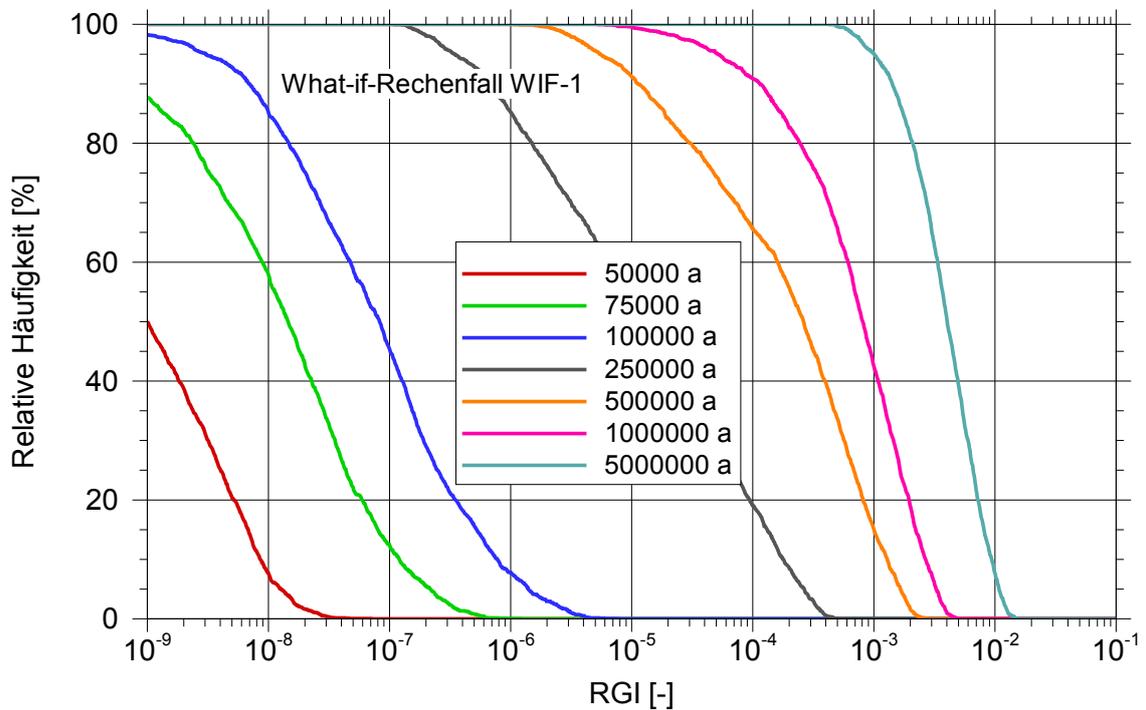


Abb. 4.56 Komplementäre kumulative Häufigkeit des RGI am Schacht; What-if-Rechenfall: Einhüllende von drei Szenarien (WIF-1)

Die Ergebnisse zeigen, dass die gleichzeitige Variation der Parameter aus den betrachteten drei Alternativszenarien zu fast den gleichen Ergebnissen führt wie bei den einzelnen Alternativszenarien. Dies scheint zunächst im Gegensatz zu früheren (deterministischen) Rechnungen im Vorhaben ISIBEL zu stehen, bei denen das gleichzeitige Versagen von Schacht- und Streckenverschluss zu größeren Konsequenzen geführt hat als das Versagen nur eines Verschlusses. Der Unterschied rührt daher, dass für das Verschlussversagen hier jeweils eine Bandbreite von 0 bis 10.000 Jahren verwendet wurde, während früher ein sofortiges Versagen bei 0 Jahren unterstellt wurde.

4.3.2 Geringerer Wert des Diffusionskoeffizienten

Da der advective Transport in der Grube zu späten Zeiten vollkommen oder nahezu zum Erliegen kommt, erfolgt ein Großteil der Freisetzung der Radionuklide diffusiv. Dem Wert des Diffusionskoeffizienten kommt daher eine große Bedeutung zu. Im Referenzszenarium wurde ein einheitlicher Wert von $1,5 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ angesetzt. Im Vorhaben VSG wurde ein kleinerer Wert von $1 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ verwendet. In dieser What-if-Rechnung wurde der Diffusionskoeffizient gegenüber diesem bereits geringen Wert um eine weitere Größenordnung verkleinert (Bandbreite: $1 \cdot 10^{-11}$ bis $5 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$), siehe zum Vergleich auch die Ergebnisse der deterministischen Rechnungen in Kapitel 4.1.1.3.

Das Ergebnis unterscheidet sich deutlich von den Ergebnissen des Referenzfalls und der alternativen Rechenfälle. Das Maximum der RGI-Werte wird bereits nach 3 bis 4 Mio. Jahren erreicht und ist ca. drei Größenordnungen kleiner als im Referenzfall. Die Bandbreite der relativen Häufigkeit der maximalen RGI-Werte ist viel breiter als in den anderen Rechnungen, d. h. auch sehr kleine (maximale) RGI-Werte treten auf.

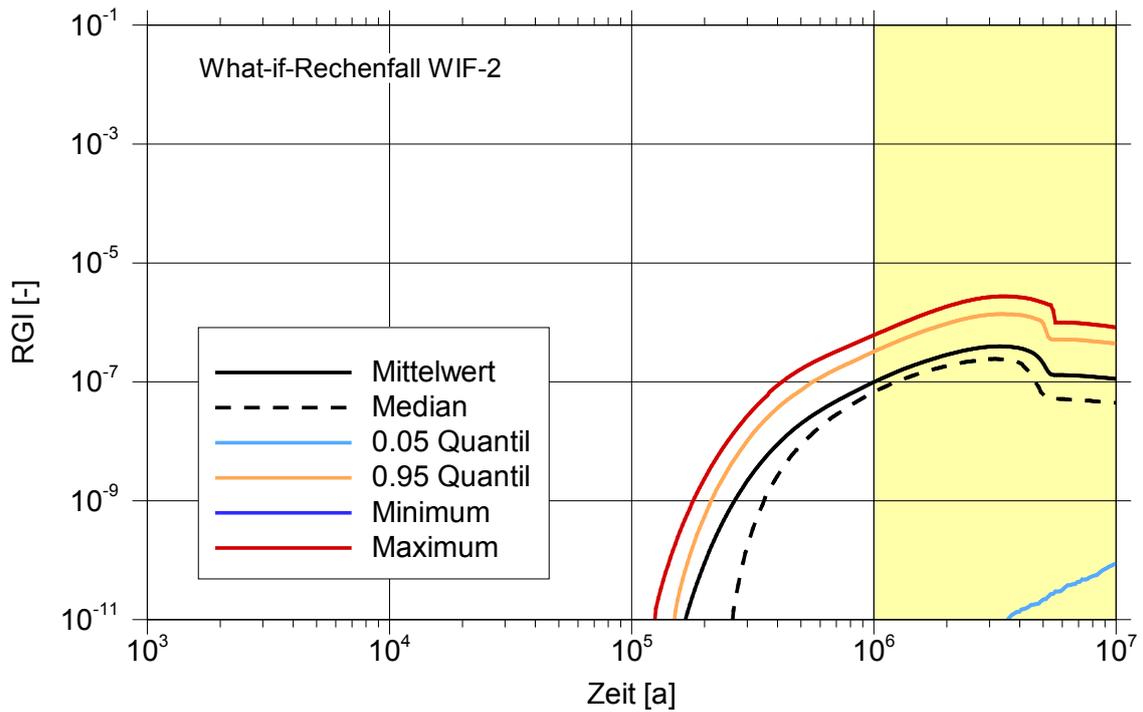


Abb. 4.57 Zeitlicher Verlauf der statistischen Kenngrößen des RGI am Schacht; What-if-Rechenfall: kleiner Diffusionskoeffizient (WIF-2)

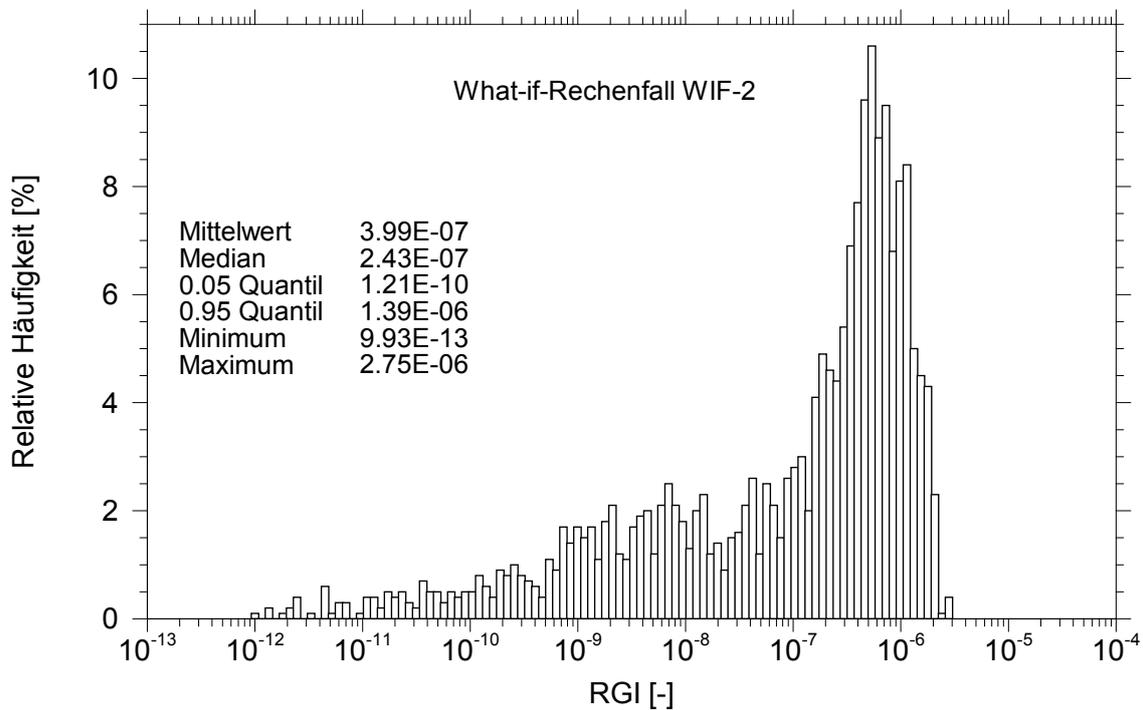


Abb. 4.58 Häufigkeitsdichte der Maximalwerte des RGI am Schacht; What-if-Rechenfall: kleiner Diffusionskoeffizient (WIF-2)

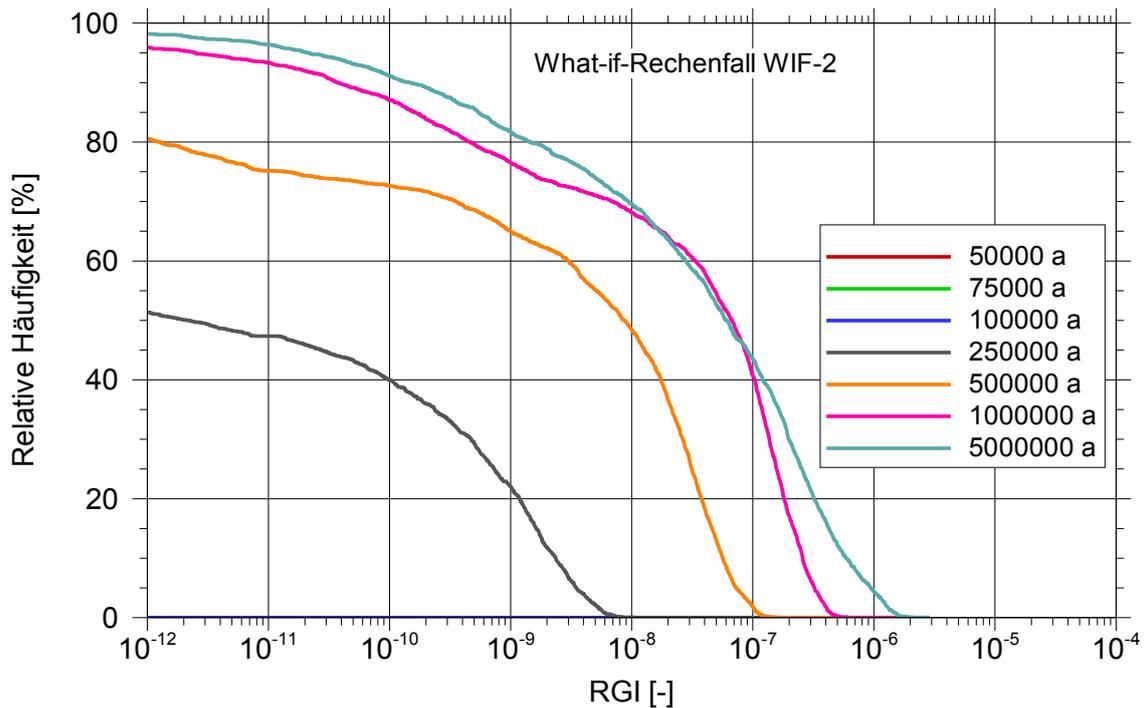


Abb. 4.59 Komplementäre kumulative Häufigkeit des RGI am Schacht; What-if-Rechenfall: kleiner Diffusionskoeffizient (WIF-2)

Die Ergebnisse zeigen die Relevanz der Diffusion, d. h. sie bestätigen, dass der Transport im Grubengebäude im Wesentlichen durch diffusive Prozesse bewirkt wird.

4.3.3 Gemeinsames frühes Versagen von Schacht- und Streckenverschluss

Aus der Kombination der beiden Alternativszenarien „frühes Versagen des Schachtverschlusses“ und „frühes Versagen des Streckenverschlusses“ (Kapitel 4.2.1 und 4.2.2) kann ein What-if-Rechenfall konstruiert werden, der zeigt, mit welchen maximalen Konsequenzen zu rechnen ist, wenn Lösungen aus dem Deckgebirge zu frühen Zeiten in die Grube bis zu den Einlagerungsfeldern eindringen können. Für beide variierten Parameter (Zeitpunkt des Versagens der Abdichtung) wurde eine Bandbreite von 0 bis 10.000 Jahren angenommen.

Die maximalen RGI-Werte treten am Ende des betrachteten Zeitbereichs auf und sind etwa gleich groß wie in den Alternativszenarien. Auch Mittelwert und Median sind etwa gleich groß, siehe die Abbildungen 4.60 und 4.45 (Seite 97).

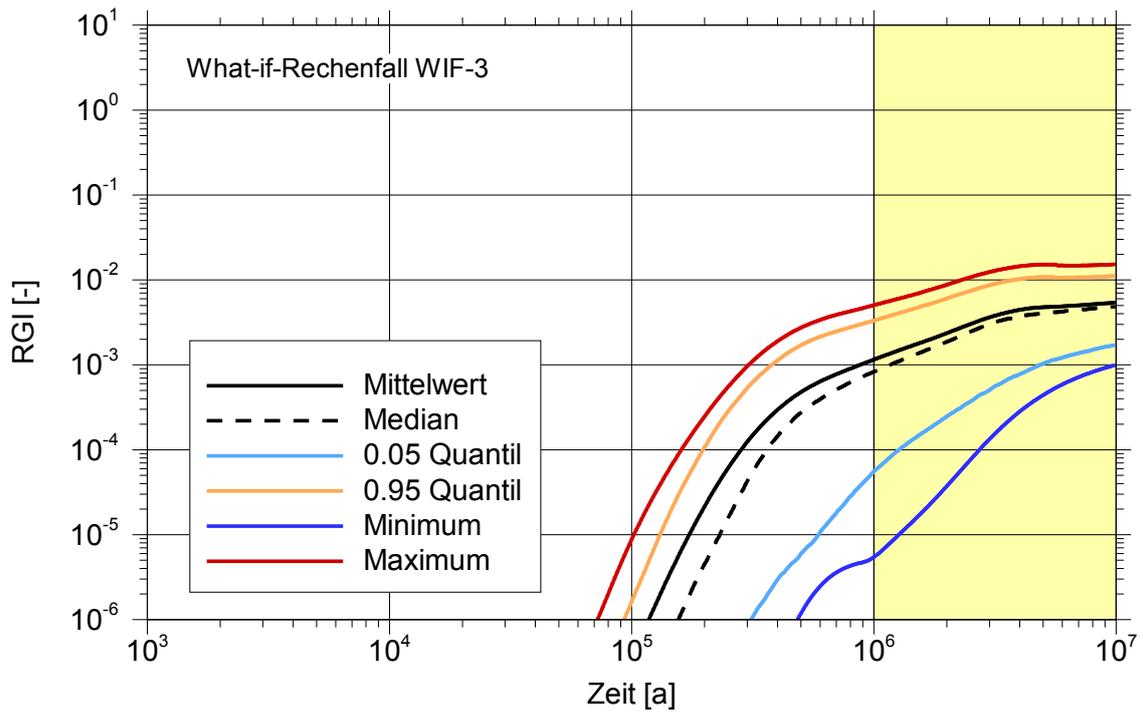


Abb. 4.60 Zeitlicher Verlauf der statistischen Kenngrößen des RGI am Schacht; What-if-Rechenfall: gemeinsames frühes Versagen von Verschlüssen (WIF-3)

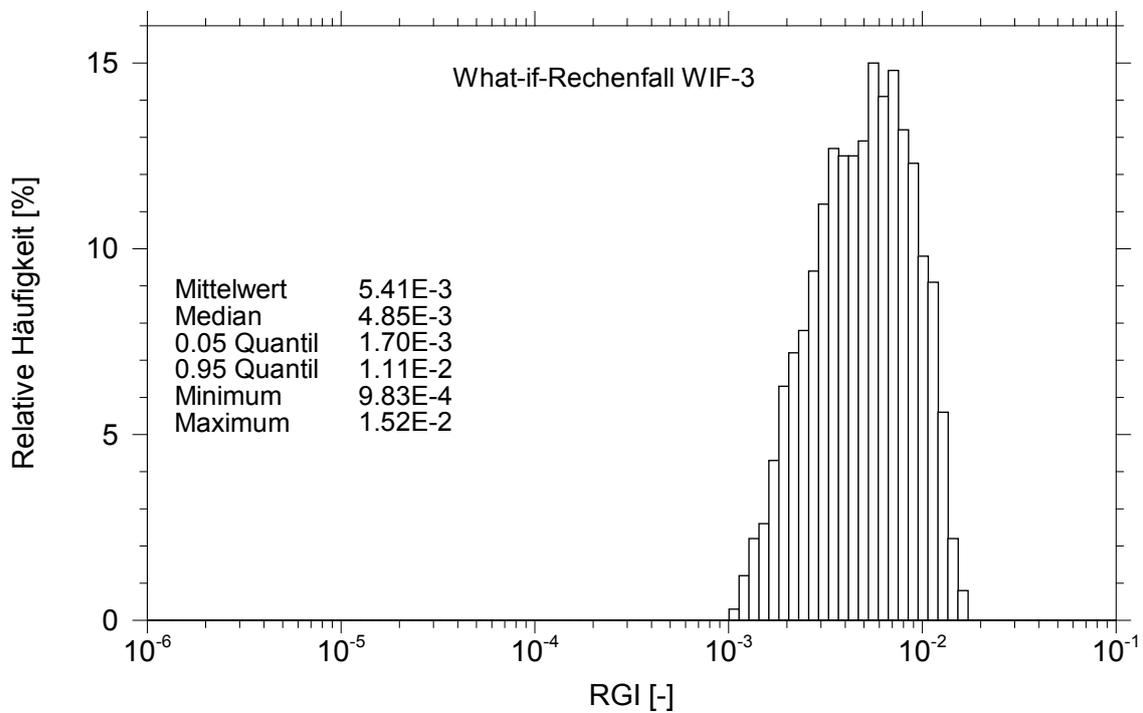


Abb. 4.61 Häufigkeitsdichte der Maximalwerte des RGI am Schacht; What-if-Rechenfall: gemeinsames frühes Versagen von Verschlüssen (WIF-3)

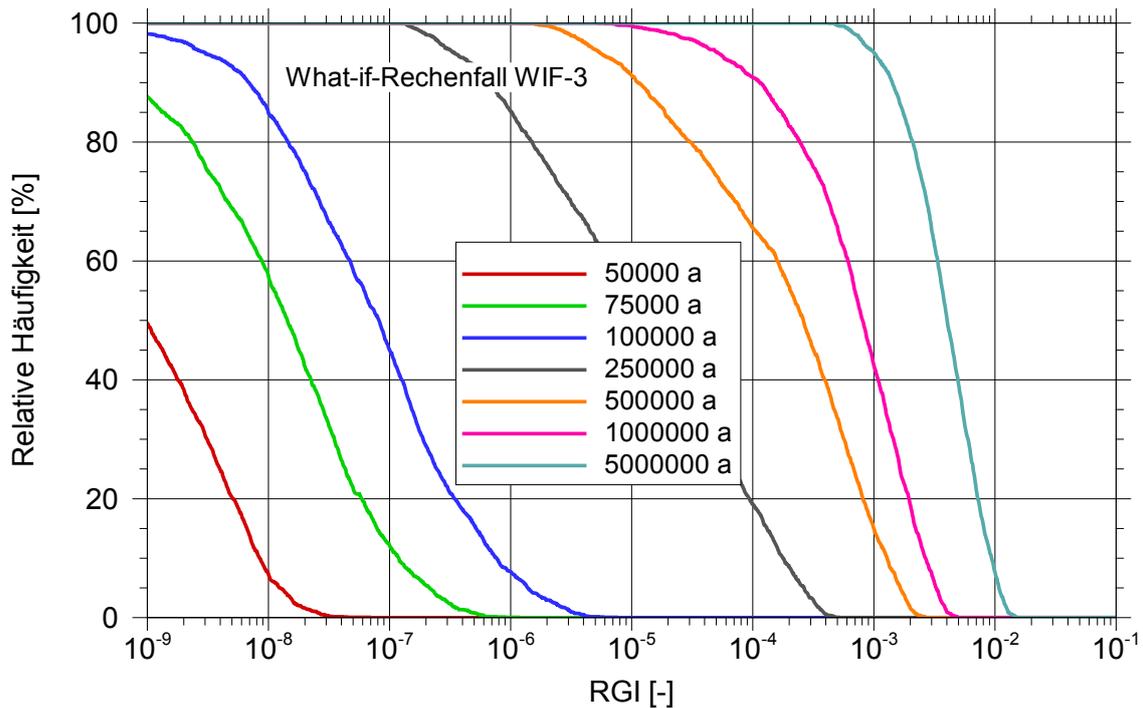


Abb. 4.62 Komplementäre kumulative Häufigkeit des RGI am Schacht; What-if-Rechenfall: gemeinsames frühes Versagen von Verschlüssen (WIF-3)

Die Ergebnisse unterscheiden sich nicht von denjenigen in Kapitel 4.3.1, bei denen die „Einhüllende“ der Alternativszenarien betrachtet wurde. Dies liegt daran, dass in Kapitel 4.3.1 nur drei Alternativszenarien berücksichtigt wurden und dabei auch das hier betrachtete frühe Versagen von Schacht- und Streckenverschluss RS-VO.

4.4 Klassischer Ansatz

Beim klassischen Ansatz wird untersucht, wie sich das Gesamtsystem verhält, wenn alle unabhängigen Parameter gleichzeitig innerhalb ihrer Bandbreite variiert werden. Dieser Rechenfall entspricht einem häufig in der Sicherheitsanalyse eingesetzten Vorgehen bei probabilistischen Rechnungen. Beim Vergleich dieses Rechenfalls mit dem Referenzfall ist zu beachten, dass die für das Referenz- und die Alternativszenarien verwendeten Ausprägungen nicht mit den für den klassischen Ansatz verwendeten Verteilungen (im Sinne des Verfahrens nach Abbildung 3.2) kompatibel sind. Der Vergleich mit den bisher erzielten Ergebnissen soll veranschaulichen, welche generellen Unterschiede zum neuen, hier angewendeten Vorgehen auftreten.

Gegenüber dem Referenzfall beginnt die Freisetzung aus dem Infrastrukturbereich früher; der RGI ist generell höher. Die breite Form der Histogrammverteilung in Abbildung

4.64 zeigt im Vergleich zu den in vorangegangenen Kapiteln dargestellten Histogrammverteilungen deutliche Unterschiede. Der Mittelwert der berechneten Maximalwerte des RGI ist etwas größer als im Referenzfall, der Median etwa 50 % kleiner. Die Unterschiede in den berechneten Konsequenzen gemäß den beiden Ansätzen bestehen daher hauptsächlich in der Bandbreite der berechneten RGI-Werte. Auch wenn im Rahmen von ISIBEL-II nicht alle Alternativszenarien berechnet werden konnten und der hier berechnete klassische Ansatz nicht auf Variation aller Parameter basiert, lassen sich hieraus interessante Aspekte ableiten (siehe Kapitel 4.5)

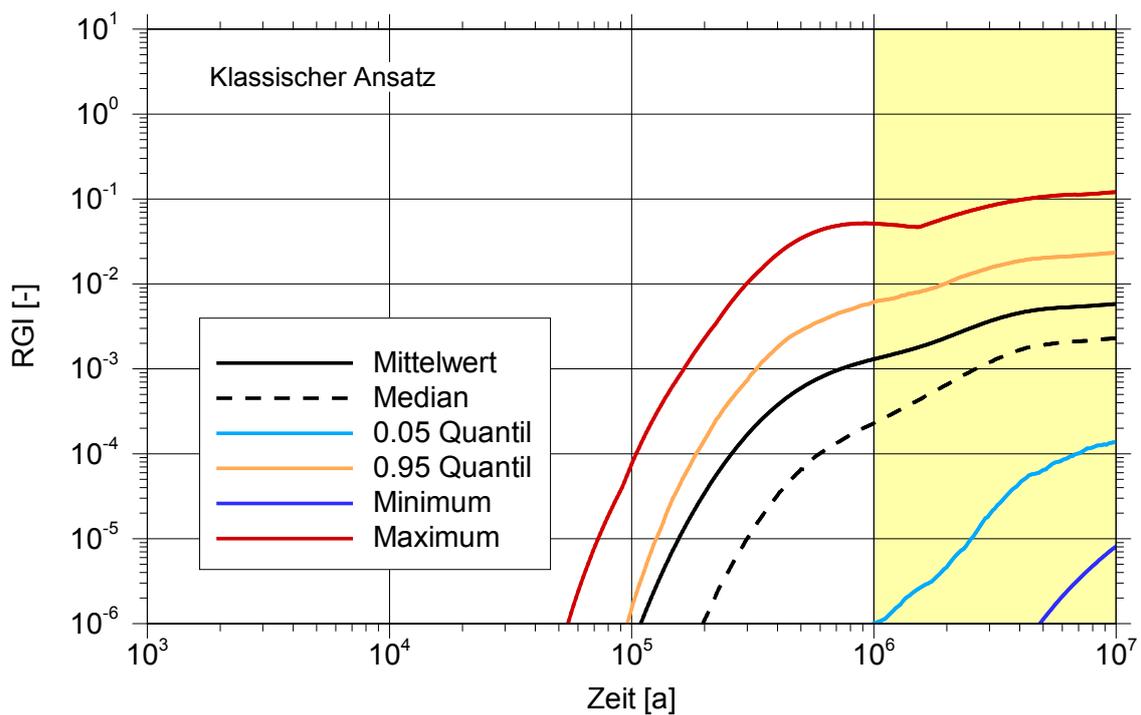


Abb. 4.63 Zeitlicher Verlauf der statistischen Kenngrößen des RGI am Schacht (Klassischer Ansatz)

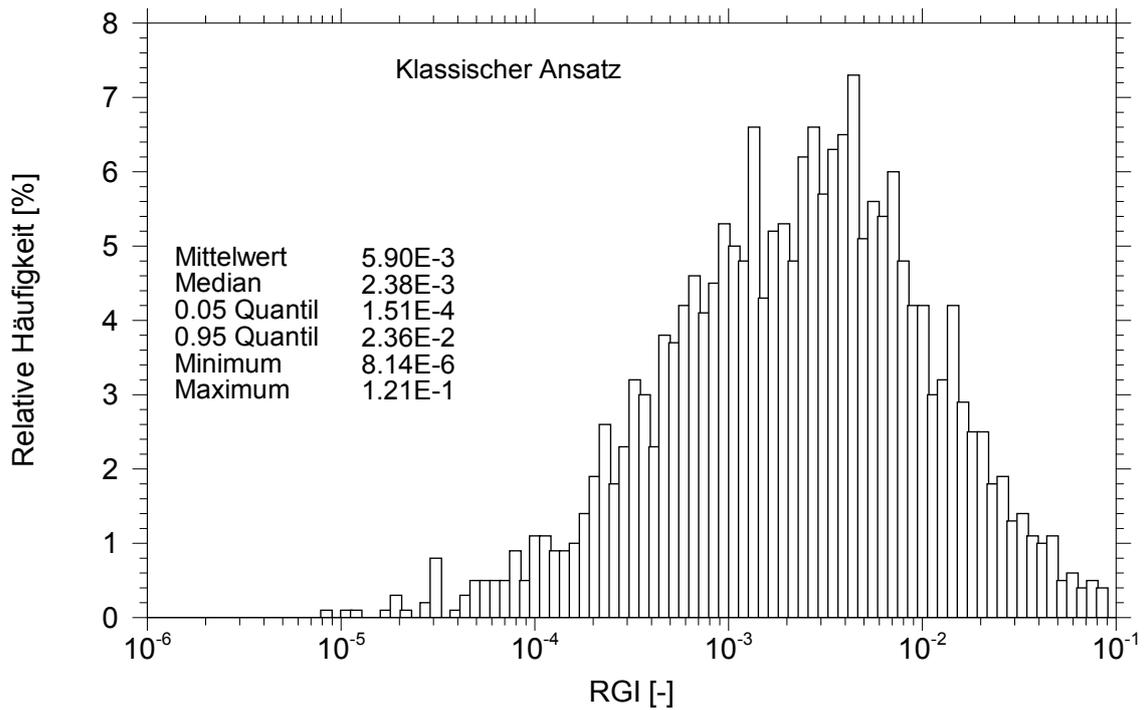


Abb. 4.64 Häufigkeitsdichte der Maximalwerte des RGI am Schacht (Klassischer Ansatz)

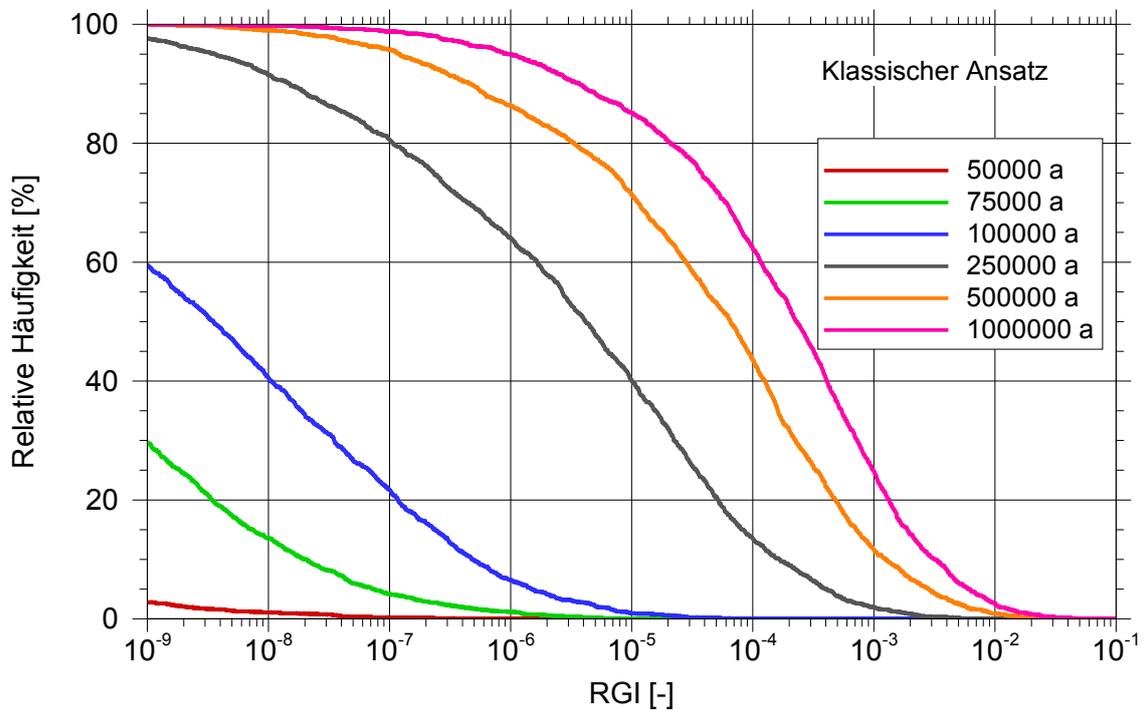


Abb. 4.65 Komplementäre kumulative Häufigkeit des RGI am Schacht (Klassischer Ansatz)

4.5 Vergleich der Ergebnisse

In Tabelle 4.1 sind die statistischen Kenngrößen aller probabilistischen Rechnungen zusammengestellt. Bis auf die Variante 4 des Referenzfalls, bei der die Grenze des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs an den Verschlüssen der Richtstrecken liegt, sind die berechneten RGI-Werte immer kleiner als 1, so dass der Nachweis unter den hier angenommen Bedingungen über eine vereinfachte radiologische Langzeitaussage in diesen Fällen erbracht ist (siehe Abbildung 1.1 in der Einleitung).

Tab. 4.1 Statistische Kenngrößen für die Maximalwerte des RGI der untersuchten probabilistischen Rechnungen

Rechenfall	RGI [-]				
	Mittelwert	Median	5% Quantil	95% Quantil	Maximum
Referenzfall (R-0)	$5,11 \cdot 10^{-3}$	$4,58 \cdot 10^{-3}$	$1,62 \cdot 10^{-3}$	$1,06 \cdot 10^{-2}$	$1,46 \cdot 10^{-2}$
Feine Ortsdiskretisierung (R-0-Var1)	$3,64 \cdot 10^{-3}$	$3,06 \cdot 10^{-3}$	$1,22 \cdot 10^{-3}$	$7,82 \cdot 10^{-3}$	$1,19 \cdot 10^{-2}$
Verlängerung Richtstrecken (5 Blöcke) (R-0-Var2)	$7,28 \cdot 10^{-4}$	$5,51 \cdot 10^{-4}$	$1,64 \cdot 10^{-4}$	$1,84 \cdot 10^{-3}$	$2,91 \cdot 10^{-3}$
Verlängerung Richtstrecken (Diskretis. 20 m) (R-0-Var3)	$8,15 \cdot 10^{-4}$	$6,22 \cdot 10^{-4}$	$1,93 \cdot 10^{-4}$	$2,03 \cdot 10^{-3}$	$3,18 \cdot 10^{-3}$
Verlängerung Richtstrecken (Diskretis. 2 m) (R-0-Var3)	$8,23 \cdot 10^{-4}$	$6,29 \cdot 10^{-4}$	$1,97 \cdot 10^{-4}$	$2,05 \cdot 10^{-3}$	$3,21 \cdot 10^{-3}$
Verkleinerung des ewG (R-0-Var4)	1,24	1,11	0,13	2,84	4,21
Schnelle Konvergenz (R-0-Var5)	$4,66 \cdot 10^{-3}$	$4,18 \cdot 10^{-3}$	$1,51 \cdot 10^{-3}$	$9,58 \cdot 10^{-3}$	$1,32 \cdot 10^{-2}$
Größeres initiales Lösungsvolumen (A1i6-1)	$5,12 \cdot 10^{-3}$	$4,58 \cdot 10^{-3}$	$1,62 \cdot 10^{-3}$	$1,06 \cdot 10^{-2}$	$1,46 \cdot 10^{-2}$
Frühes Versagen des Schachtverschlusses (A1w1-1)	$5,34 \cdot 10^{-3}$	$4,78 \cdot 10^{-3}$	$1,69 \cdot 10^{-3}$	$1,10 \cdot 10^{-2}$	$1,52 \cdot 10^{-2}$
Frühes Versagen des Streckenverschlusses (A1w2-1)	$5,12 \cdot 10^{-3}$	$4,59 \cdot 10^{-3}$	$1,62 \cdot 10^{-3}$	$1,06 \cdot 10^{-2}$	$1,46 \cdot 10^{-2}$
Drei Alternativszenarien gleichzeitig (WIF-1)	$5,42 \cdot 10^{-3}$	$4,85 \cdot 10^{-3}$	$1,70 \cdot 10^{-3}$	$1,11 \cdot 10^{-2}$	$1,52 \cdot 10^{-2}$
Geringerer Wert des Diffusionskoeffizienten (WIF-2)	$3,99 \cdot 10^{-7}$	$2,43 \cdot 10^{-7}$	$1,21 \cdot 10^{-10}$	$1,39 \cdot 10^{-6}$	$2,75 \cdot 10^{-6}$
Gemeinsames frühes Versagen von Schacht- und Streckenverschluss RS-VO (WIF-3)	$5,41 \cdot 10^{-3}$	$4,85 \cdot 10^{-3}$	$1,70 \cdot 10^{-3}$	$1,11 \cdot 10^{-2}$	$1,52 \cdot 10^{-2}$
Klassischer Ansatz	$5,90 \cdot 10^{-3}$	$2,38 \cdot 10^{-3}$	$1,51 \cdot 10^{-4}$	$2,36 \cdot 10^{-2}$	$1,21 \cdot 10^{-1}$

In den beiden folgenden Abbildungen sind für ausgewählte Rechnungen die Maximalwerte und die Mediane der RGI-Werte zusammengestellt. Es wurden nur diejenigen Rechenfälle ausgewählt, bei denen der RGI-Wert am Schacht ermittelt wurde (große Ausdehnung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs). Die höchsten Werte der Maximalwerte des RGI treten erwartungsgemäß beim klassischen Ansatz auf, bei dem alle unabhängigen Variablen gleichzeitig variiert wurden (Abbildung 4.66). Der Vergleich mit den anderen Ergebnissen zeigt, dass sich eine größere Bandbreite von RGI-Werten ergibt. Auf der einen Seite sind im klassischen Ansatz viele Entwicklungen enthalten, die nicht mit den radiologischen Kriterien der Sicherheitsanforderungen bewertet werden müssen. Auf der anderen Seite hilft der klassische Ansatz den nicht eindeutig definierbaren Übergangsbereich zwischen weniger wahrscheinlichen und unwahrscheinlichen Entwicklungen zu untersuchen.

Betrachtet man den Median (Abbildung 4.67), so liegt er in diesem Rechenfall für alle Zeiten unterhalb der berechneten Werte für den Referenzfall, was dadurch zu begründen ist, dass die verwendeten Verteilungen zu vielen Einzelergebnissen mit geringem RGI führen.

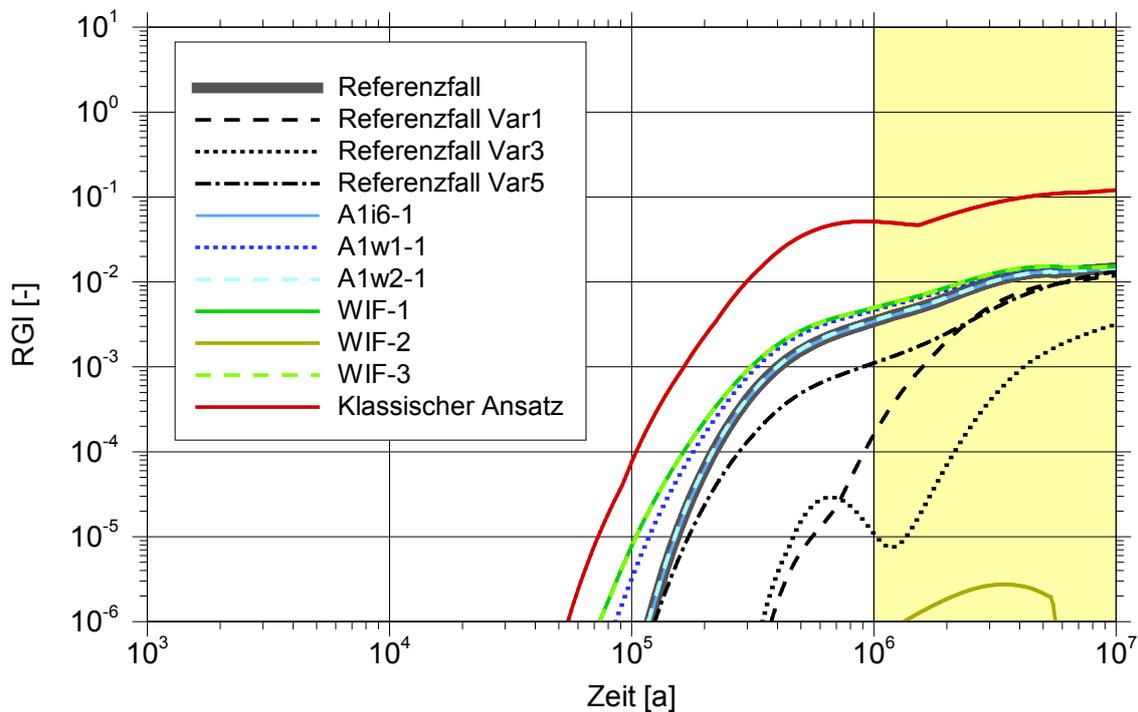


Abb. 4.66 Maximalwerte des RGI für ausgewählte Rechenfälle

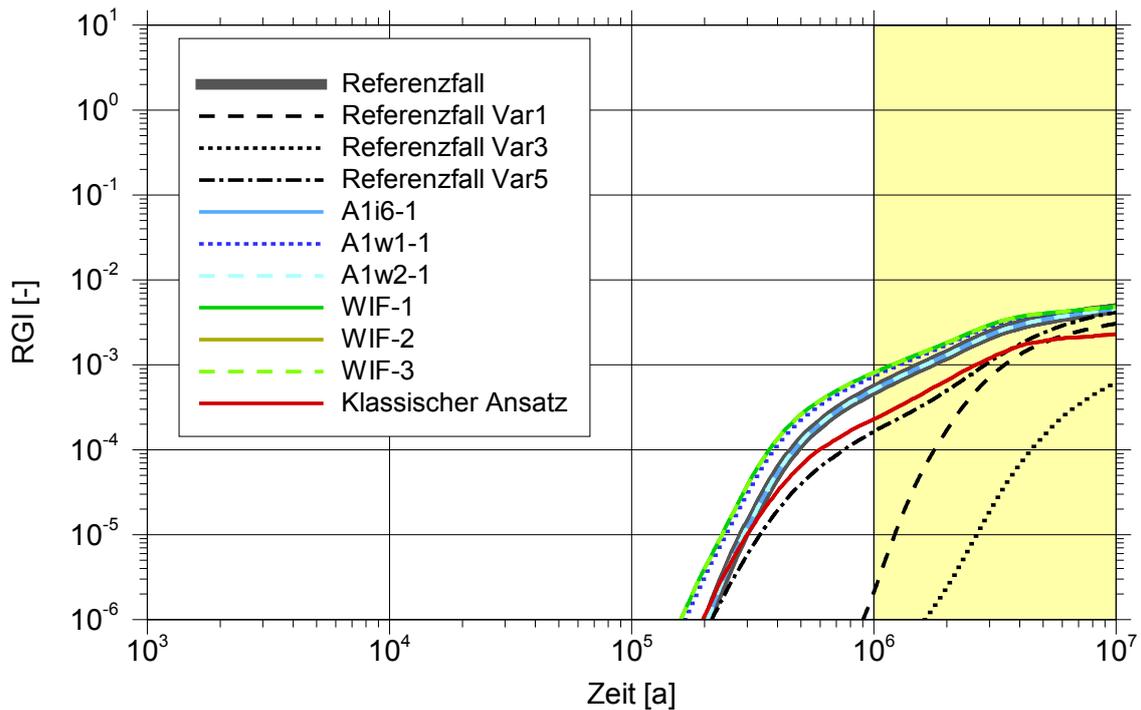


Abb. 4.67 Mediane des RGI für ausgewählte Rechenfälle

Die geringsten RGI-Werte werden in beiden Abbildungen durch die grüne Kurve repräsentiert. Sie wurde im Rechenfall WIF-2 mit geringen Diffusionskoeffizienten ermittelt und zeigt deutlich die Bedeutung der Diffusion für das Systemverhalten.

Die Kurven für den Referenzfall und die drei betrachteten alternativen Rechenfälle (A1i6-1, A1w1-1 und A1-w2-1) unterscheiden sich nur geringfügig. Das bedeutet, dass die erwartete Bandbreite des Systemverhaltens für alle Szenarien relativ gering ist.

Von großem Einfluss auf die Rechenergebnisse sind die Modellparameter für die Ortsdiskretisierung, da der Radionuklidtransport bei geringen Strömungsgeschwindigkeiten diffusiv bestimmt ist. Mit feiner Ortsdiskretisierung – 20 m Blocklänge überall – ergibt sich die gestrichelte schwarze Kurve. Sie führt zu kleineren RGI-Werten als im Referenzfall (dicke schwarze Kurve für den Referenzfall). Da die Rechenzeit bei feiner Ortsdiskretisierung stark ansteigt, konnte dieser Effekt nur in wenigen Varianten berücksichtigt werden. Für eine realitätsnähere Bewertung des Systems müssten alle Rechenfälle mit dieser Ortsdiskretisierung gerechnet werden, jedoch wirkt sich die gröbere Diskretisierung ungünstig und somit sicherheitsgerichtet abdeckend aus.

Bei einer angenommenen Verlängerung der Richtstrecken im Osten und mit einer noch feineren Ortsdiskretisierung – 2 m Blocklänge in RS-O1 und RN-O1 sowie 20 m Block-

länge sonst – ergibt sich die schwarz gepunktete Kurve. Die berechneten RGI-Werte sind noch einmal kleiner als bei der schwarz gestrichelten Kurve. Dies zeigt, dass eine Verlängerung der Richtstrecken die RGI-Werte verkleinert und verlangsamt. Wie aus den Angaben in Tabelle 4.1 ersichtlich, werden die RGI-Werte dabei wenig von der internen Diskretisierung beeinflusst.

In einigen What-if-Rechenfällen treten Ergebnisse auf, die sich von den Ergebnissen des Referenzfalls wenig unterscheiden, z. B. bei einem gemeinsamen frühen Versagen der Schacht- und Streckenverschluss (WIF-3). Dies zeigt, dass das Berücksichtigen von What-If-Fällen nicht automatisch zu großen Abweichungen in der Freisetzung von Radionukliden führt. Hier wird die Bedeutung der probabilistischen Vorgehensweise deutlich: während bei den früheren deterministischen Rechnungen im Vorhaben ISIBEL beispielsweise das gleichzeitige initiale ($t=0$ Jahre) Versagen der Schacht- und Streckenverschlüsse zu großen Konsequenzen geführt hat, sind die Konsequenzen hier geringer, weil für den Zeitpunkt des Versagens eine Bandbreite (0 bis 10.000 Jahre) angesetzt werden konnte.

5 Bewertung der Ergebnisse

Die Analyse der Konsequenzen der untersuchten Szenarien zeigt die Notwendigkeit des Einsatzes deterministischer **und** probabilistischer Rechenfälle. Probabilistische Auswertungen sind dabei nicht nur Werkzeug zur Darstellung von Ungewissheiten in deterministischen Rechenfällen durch Einsatz von Parameterbandbreiten. Durch die Vorgabe der Einteilung der Szenarien in Wahrscheinlichkeitsklassen in den Sicherheitsanforderungen und die Notwendigkeit, die Anzahl von Rechenfällen zu den Szenarien auf ein vermittelbares Maß zu begrenzen, sind probabilistische Rechenfälle die entscheidenden Rechenfälle bei der Umsetzung von Szenarien zur Konsequenzenanalyse. Allerdings zeigt sich auch in den Untersuchungen, dass zur Untersuchung und zur Darstellung des Systemverständnisses (z. B. durch gezielte Parametervariationen) deterministische Methoden ein wichtiger Bestandteil eines umfassenden Sicherheitsnachweises sind. Diese Untersuchungen können im Wesentlichen auf einem deterministischen Basisfall aufbauen, so dass in der Regel für alternative Szenarien keine deterministischen Rechnungen notwendig sind. Zudem werden in den Sicherheitsanforderungen vom Antragsteller deterministische Rechnungen gefordert, die das erwartete Systemverhalten demonstrieren. Hierfür werden Best-Estimate-Werte benötigt. Für eine nachvollziehbare Festlegung solcher Werte ist eine systematische Analyse von dokumentiertem Expertenwissen erforderlich, für die es bislang allerdings keine eindeutige Vorgehensanweisung gibt. Stattdessen werden zumeist subjektive Schätzwerte verwendet. In diesem Punkt besteht noch FuE-Bedarf.

Die Durchführung von What-if-Rechenfällen hat sich als nützlich erwiesen, um das Verhalten des Endlagersystems besser zu verstehen. Werden wie im klassischen Ansatz alle unabhängigen Variablen gleichzeitig variiert, streuen die berechneten Konsequenzen über eine größere Bandbreite als in der Gesamtheit aus Referenzszenarium und Alternativszenarien. Dadurch kann mit einer einzelnen Rechnung ein umfassender Überblick erreicht werden, mit welchen Konsequenzen in dem betrachteten System gerechnet werden kann.

Die radiologische Konsequenzenanalyse baut auf den Integritätsanalysen der geologischen und geotechnischen Barrieren auf. Diese Integritätsanalysen entscheiden, wie bei der Konsequenzenanalyse weiter vorgegangen wird. Nur in Kombination dieser Bewertungen ist eine umfassende Analyse der Szenarien möglich.

In den folgenden Kapiteln konzentriert sich die Bewertung auf die Ergebnisse der probabilistischen Rechenfälle. Für eine detaillierte Bewertung der deterministischen Ergebnisse wird auf /BUH 08/ verwiesen. Die Bewertung der Ergebnisse erfolgt an den drei Aufgabenstellungen für die durchgeführten Arbeiten:

1. Funktioniert die Umsetzung der (in der VSG entwickelten) Szenarien in Rechenfälle (Kapitel 5.1)?
2. Wie sind die Ergebnisse der Rechenfälle zu bewerten (Kapitel 5.2)?
3. Ist man mit dem vorhandenen Instrumentarium in der Lage, die Anforderungen an die (probabilistischen) Rechenfälle umzusetzen (Kapitel 5.3)?

Entsprechend der Möglichkeiten des vorhandenen Instrumentariums wurde in den vorliegenden Analysen die Freisetzung von Radionukliden nur für den Lösungspfad betrachtet, da für eine Bewertung des Gaspfades die entsprechenden Werkzeuge, die insbesondere einen Zweiphasenfluss im Endlager abbilden können, derzeit noch in Entwicklung sind.

5.1 Umsetzung von Szenarien in probabilistische Rechenfälle

Der hier verfolgte Weg bei der Umsetzung der Szenarien folgt dem Vorgehen der Szenarientwicklung, die in der VSG durchgeführt wurde. Hierbei werden die Szenarien auf der Basis von FEP in Wahrscheinlichkeitsklassen eingeteilt, bevor sie in probabilistische Rechenfälle umgesetzt werden (siehe Vorgehensweise 1 in Abb. 5.1). Die Parametrisierung erfolgt nach der Festlegung der Szenarien über die Festlegung einer Ausprägung für jeden einzelnen Parameter. Die Festlegung der Ausprägung ist mathematisch nicht eindeutig und erfolgt mit Hilfe von Expertenwissen (ggf. mit Hilfe von Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen). Letztlich erfolgt die Bewertung der Rechenergebnisse an Hand der in den Sicherheitsanforderungen gegebenen Kriterien. Beim klassischen Ansatz (siehe Vorgehensweise 2 in Abb. 5.1) wird auf der Basis von FEP ein „globaler“ probabilistischer Rechenfall aufgesetzt. Für jeden Parameter ist zur Parametrisierung eine Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion erforderlich. Die Ergebnisse aus den Realisationen haben eine Wahrscheinlichkeit und können an Hand der in den Sicherheitsanforderungen gegebenen Kriterien bewertet werden. Welche Methode letztlich zum Einsatz kommt, hängt ggf. auch von der weiteren Ausgestaltung der regulatorischen Vorgaben ab, die Sicherheitsanforderungen lassen hier Spielraum für den Sicherheitsnachweis.

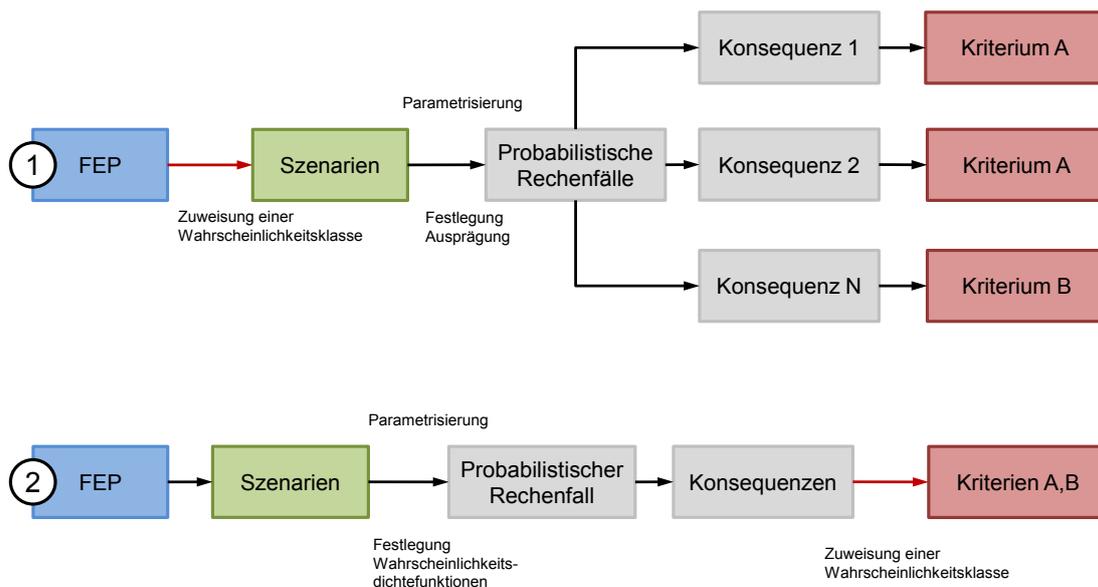


Abb. 5.1 Vorgehensweisen bei der Zuweisung von Szenarien in Wahrscheinlichkeitsklassen zur Bewertung mittels radiologischer Kriterien, 1: VSG-Ansatz, 2: klassischer Ansatz

Schwerpunkt der Arbeiten im Rahmen war die Überprüfung der Vorgehensweise der VSG. Für den klassischen Ansatz gibt es bereits zahlreiche Anwendungsbeispiele.

Bei der Umsetzung der Szenarien mit dem VSG-Ansatz zeigen sich zwei gegenläufige Trends: Zum einen lassen sich viele Szenarien in einen gemeinsamen Rechenfall umsetzen, hier sind insbesondere die beiden abdeckenden Rechenfälle zum frühen Versagen des Schachtverschlusses bzw. zum frühen Versagen des Streckenverschlusses zu nennen. Auf der anderen Seite gibt es einige Szenarien, die jeweils eine Vielzahl von Rechenfällen erfordern. Dies betrifft z.B. die Mobilisierung von Radionukliden (siehe Tabelle 3.27). Diese Szenarien konnten im FuE-Vorhaben ISIBEL-II nicht umgesetzt werden. Auf Grund der Ergebnisse des Rechenfalls mit der gleichzeitigen Variation vieler Parameter (Klassischer Ansatz, siehe Tabelle 3.26 auf Seite 55) wird erwartet, dass diese Szenarien Auswirkungen auf den Verlauf der Radionuklidenausbreitung haben, die Maximalwerte aber in ähnlichen Größenordnungen wie im Referenzfall liegen (siehe Abbildung 4.66 auf Seite 113). Die Erstellung einer Vorgehensweise zur Umsetzung von Szenarien zur Bewertung der Auswirkung der Einlagerung von Behältern mit Fertigungsfehlern steht noch aus.

Im vorliegenden Bericht wurden neben dem Referenzfall vor allem die drei Rechenfälle ausgewertet, die mehrere Alternativszenarien abdecken:

1. frühes Versagen des Schachtverschlusses,
2. frühes Versagen des Streckenverschlusses sowie
3. größeres Anfangs-Lösungsvolumen im Infrastrukturbereich.

Durch diese drei Rechenfälle konnten die entsprechenden Szenarien – z. B. Totalversagen des Schachtverschlusses und erhöhte Permeabilität des Schachtverschlusses – erfolgreich umgesetzt werden.

Die Zuordnung von Rechenfällen zu Szenarien ist im Fall der Konvergenz nicht gelungen. Dies liegt zum einen an der Modellierung der Konvergenz in LOPOS, zum anderen an der Art der Parameterungewissheiten in den gebirgsmechanischen Rechnungen, deren Ergebnisse für die Konvergenzparametrisierung verwendet werden.

- In den gebirgsmechanischen Rechnungen treten viele Parameterungewissheiten auf. Ein Beispiel sind die Kriechklassen in einer Salzformation. Für das Vorhaben VSG wurden diese Ungewissheiten nicht mit Hilfe von probabilistischen Rechnungen behandelt; es liegen aber Ergebnisse für die zeitliche Entwicklung der Porositäten für zwei Kriechklassen vor. Diese beiden Rechnungen sind als Varianten des Referenzfalls zu betrachten, weil beide Kriechklassen wahrscheinlich sind. Bei probabilistischer Betrachtungsweise müssten die Parameterwerte zwischen den beiden Kriechklassen in geeigneter Weise in einer Bandbreite variiert und die Ergebnisse statistisch ausgewertet werden. Das Ergebnis dieser Auswertung müsste dann in geeigneter Weise in Parameter für den LOPOS-Konvergenzansatz umgesetzt werden. Mit den derzeit verfügbaren Rechenprogrammen ist eine solche Vorgehensweise wegen der großen Rechenzeiten nicht möglich.
- Die Konvergenz wird in LOPOS durch einen Produktansatz abgebildet, dessen Faktoren jeweils Funktionen von Einflussgrößen sind, wie z. B. Druck, Feuchte, Porosität oder Temperatur. Für die Parametrisierung des Konvergenzansatzes werden Porositätsverläufe aus gebirgsmechanischen Rechnungen zugrunde gelegt, die außer von den oben genannten Kriechklassen u. a. vom Ausgangszustand des Grubengebäudes abhängen, z. B. von den Temperaturverläufen oder der Lösungsmenge in der Grube. Für unterschiedliche Szenarien müssen daher ggf. unterschiedliche Parametrisierungen vorgenommen werden (sofern die gebirgsmechanischen Rechnungen vorliegen).

Mit den derzeit verfügbaren Methoden können maximal einige wenige Varianten gebirgsmechanisch gerechnet und in Parameter für den LOPOS-Konvergenzansatz umgesetzt werden. Es ist daher nach einer geeigneten Methode zu suchen, wie die Ungewissheiten der gebirgsmechanischen Parameter (z. B. die Kriechklassen) und der unterschiedlichen Anfangsbedingungen bei den einzelnen Szenarien in Parameter-Ungewissheiten des Konvergenzansatzes umgesetzt werden können. In den vorliegenden Rechnungen wurde dies durch Variation der Referenz-Konvergenzrate realisiert. Dies ist zwar eine grobe Vorgehensweise, die aber evtl. dadurch zu rechtfertigen ist, dass die Ergebnisse der Rechnungen mit langsamer und schneller Konvergenz (siehe Kapitel 4.1.2 und 4.1.2.5) ähnlich sind. Weitere Untersuchungen zu einer geeigneten Vorgehensweise sind zu empfehlen. Dabei ist auch zu prüfen, ob die oben erwähnte Abhängigkeit der Konvergenz von anderen Parametern (Druck, Porosität, usw.) angemessen durch die Eingangsparameter abgebildet wird.

Es ist nicht auszuschließen, dass in den probabilistischen Rechnungen ein Parameter variiert wird, der mehrere FEP repräsentiert oder zumindest beeinflusst. Dann muss untersucht werden, ob die Ergebnisse das zu untersuchende Systemverhalten auch abbilden. Es wird empfohlen, dieser Problematik in zukünftigen Forschungsvorhaben nachzugehen.

5.2 Ergebnisse der Konsequenzenanalyse

Der Vergleich der Ergebnisse in Kapitel 4.5 zeigt, dass sich die radiologischen Konsequenzen der Szenarien in einem engen Rahmen bewegen. Das gilt auch für die What-if-Fälle 1 und 3. Die Ähnlichkeit der Ergebnisse resultiert aus der Tatsache, dass die Radionuklidenausbreitung im Endlagersystem hauptsächlich über Diffusion erfolgt. Lediglich der What-If-Fall 2, bei dem die Diffusion einen geringen Wert hat, führt zu deutlich abweichenden Ergebnissen. Die höchsten Werte der Maximalwerte des RGI treten erwartungsgemäß beim klassischen Ansatz auf. Der Vergleich mit den anderen Ergebnissen zeigt, dass sich eine größere Bandbreite von RGI-Werten ergibt.

Das Versagen technischer Barrieren kann den Start des Freisetzungsprozesses zeitlich deutlich nach vorne verschieben, hat aber auf die Größe der radiologischen Konsequenzen wenig Einfluss. Die Ortsdiskretisierung des Grubengebäudes hat großen Einfluss auf die numerische Berechnung der Diffusionsprozesse; wegen des Anstiegs der Rechenzeiten sind der Diskretisierung aber Grenzen gesetzt. In den hier vor-

gestellten Rechnungen sind Blocklängen von ca. zwanzig Metern ausreichend. Eine Verlängerung der Richtstrecke RS-O1 hat gezeigt, dass dies in Verbindung mit einer ausreichenden Ortsdiskretisierung den Transport von Radionukliden geringfügig verzögern kann.

Die Variante „Verkleinerung des ewG (R-0-Var4)“ ist der Rechenfall, der von der engen Bandbreite der Ergebnisse am stärksten abweicht.

Die Bedeutung der Diffusion rührt daher, dass die Porositäten und Permeabilitäten der versetzten Grubenbaue in einigen Bereichen der Grube, vor allem bei hohen Temperaturen, sehr schnell abnehmen. Die niedrigen Permeabilitäten führen dann zwar dazu, dass keine großen Lösungsmengen von außen zu den Abfällen vordringen können, aber die bereits in den Richtstrecken vorhandenen geringen Lösungsmengen führen zu einer weitgehenden Lösungssättigung in den Porenräumen und damit in den Modellen zu einer Mobilisierung und einem Transport der Radionuklide. Da bei den geringen Lösungsvolumina und noch vorhandenen Luftpolstern Antriebskräfte wie z. B. Konvergenz oder Gasbildung für einen großräumigen advektiven Transport fehlen, gewinnen diffusive Transportprozesse an Bedeutung. Es ist nicht auszuschließen, dass der kompaktierte Salzgrus einen Zustand erreicht, bei dem keine zusammenhängenden Porenräume (unter Berücksichtigung des Einschusses vorhandener Fluide) mehr vorliegen. In der VSG wurde in den Modellen der Konsequenzenanalyse angenommen, dass dieser Zustand bei 1 % Porosität (entspricht einer Permeabilität von ca. $3 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$) existiert /POP 12/. Ist dieser Zustand erreicht, treten weder advektive noch diffusive Transportprozesse auf, die versetzte Strecke ist hydraulisch dicht. Auch wenn es physikalisch plausible Gründe gibt, die diesen Zustand nahelegen, konnte bis jetzt durch Untersuchungen nicht nachgewiesen werden, welcher Zustand am Ende eines Kompaktionsprozesses tatsächlich erreicht wird. Über die Verteilung des Porenraumes bei sehr kleinen Porositäten fehlen entsprechende Untersuchungen.

Basierend auf diesem Kenntnisstand und den Ergebnissen aus /BUH 10/ wurde in der vorliegenden Untersuchung daher angenommen, dass auch bei Erreichen von sehr kleinen Porositätswerten weiterhin ein verbundener Porenraum existiert. Durch diesen homogen verteilten Porenraum ist dann modelltechnisch auch ein Transport von Radionukliden möglich. Da keine anderen Werte bekannt waren, wurde für den Referenzfall mit einem charakteristischen Diffusionskoeffizienten der Radionuklide in Wasser gerechnet. Es wurden auch Varianten gerechnet, die zusammen mit der Sensitivitätsanalyse die Abhängigkeit der Ergebnisse vom Diffusionskoeffizienten belegen. Für die

Langzeitsicherheitsanalyse ist es daher von großer Bedeutung, den diffusiven Transport in kompaktiertem Salzgrus besser zu verstehen. Neben der fehlenden Datengrundlage ist anzumerken, dass für eine numerisch zufriedenstellende Abbildung diffusiver Prozesse die räumliche Diskretisierung in den LOPOS-Segmenten in einigen Fällen nicht ausreicht. In den Segmentmodellen sollte eine noch feinere Diskretisierung ermöglicht werden. Bislang ist eine Unterteilung eines Segmentes in bis zu 99 Teilbereiche möglich.

Letztlich hat die Bedeutung diffusiver Transportprozesse auch Auswirkungen auf die Auswertung radiologischer Konsequenzen. Da bei diffusiver Freisetzung in einigen Fällen das absolute Maximum der Strahlenexposition erst nach Ende des Nachweiszeitraumes auftritt. Der Nachweiszeitraum wurde in den Sicherheitsanforderungen auf einen Zeitraum von 10^6 Jahren eingegrenzt, da Aussagen über den geologischen Untergrund über deutlich mehr als 10^6 Jahre nicht belastet werden können. Dennoch ist es sinnvoll, den Darstellungszeitraum zum besseren Verständnis der Systementwicklung darüber hinaus zu verlängern, da nicht zu erwarten ist, dass sich die Geologie schlagartig nach 10^6 Jahren ändert. Eine weitergehende Untersuchung dieser Problematik ist empfehlenswert, da diffusive Freisetzungsprozesse bei Verwendung des ewG-Konzeptes und der Endlagerung großer Mengen langlebiger Radionuklide (z. B. U-238) bei der radiologischen Konsequenzenanalyse eine große Rolle spielen können.

5.3 Instrumentarium der Langzeitsicherheitsanalyse

Die Überprüfung des deterministischen Instrumentariums erfolgte bereits in einer früheren Phase des Vorhabens ISIBEL /BUH 08/. Der dort identifizierte FuE-Bedarf zu FEP und Szenarien sowie zu den fehlenden Eingabegrößen konnte durch die Arbeiten der VSG /FIS 13/ bereits erheblich reduziert werden. Bei den Modellen der Langzeitsicherheit besteht aber weiterhin Bedarf an Weiterentwicklungen, insbesondere zu Mobilisierungsmodellen für ausgediente Brennelemente aus Forschungsreaktoren sowie zur Berücksichtigung des Zweiphasenflusses innerhalb des Grubengebäudes. Die Konsequenzen einer Freisetzung von Radionukliden auf dem Gaspfad können bei der Anwendung von LOPOS derzeit nicht ausreichend analysiert werden. Eine Vorgabe in den Sicherheitsanforderungen zur Bewertung möglicher Konsequenzen fehlt hier ebenfalls.

Neben den genannten Problemfeldern zeigten weitere Untersuchungen im Vorhaben ISIBEL bereits die Bedeutung der Diffusion als Transportprozess für Radionuklide aus dem ewG /BUH 10/. Die hier durchgeführten Untersuchungen mit aktualisierten Randbedingungen aus der VSG bestätigen die Bedeutung der Diffusion (siehe Kapitel 5.2). Zu einer verbesserten modellmäßigen Abbildung der Diffusion fehlen Modellparameter. Daher wurden z. B. für alle Modellrechnungen bei der Betrachtung der Diffusion der Radionuklide im Porenwasser die Diffusionskoeffizienten entsprechend jenen im freien Wasser gewählt. Diese Annahme wurde getroffen, weil bisher keine Daten für Diffusionskoeffizienten von gelösten Stoffen im Porenwasser von Salzgrus vorliegen. Weiterhin wurde angenommen, dass der Porendiffusionskoeffizient unabhängig vom Kompaktionsgrad und somit von der Porosität des Salzgruses ist. In dem Vorhaben DIKOSA wurde begonnen diese Wissenslücke zu schließen. In den Experimenten konnte auch bei geringen Porositäten zwischen 2 und 4 % keine Reduktion des Diffusionskoeffizienten gegenüber jenem im freien Wasser beobachtet werden. Somit bleibt der bisher in den Modellen der Langzeitsicherheitsanalyse angewendete Ansatz gültig. Die Ergebnisse aus DIKOSA lassen aber auf eine zeitliche Veränderung des Porenraums, die zu einer Verringerung des diffusiven Schadstoffstroms führt, schließen. Um diesen Effekt besser verstehen zu können, verbleibt noch ein signifikanter FuE-Bedarf /FLU 16/.

Die Bewertung von Szenarien anhand probabilistischer Rechnungen (Monte-Carlo-Simulationen) hat sich bewährt und entspricht einer international anerkannten Vorgehensweise. Der Grundgedanke ist dabei, diejenigen Parameter, deren Werte mit signifikanten Ungewissheiten behaftet sind, durch geeignete statistische Verteilungen zu repräsentieren und in einer Vielzahl von Einzelrechenläufen zahlreiche mögliche Wertekombinationen durchzuspielen. Die so erzeugten Sätze von Ergebnissen können dann statistisch analysiert werden und erlauben auf diese Weise Rückschlüsse auf die Ungewissheit der Rechenergebnisse. Weiterhin kann mithilfe geeigneter Verfahren die Sensitivität des Modellsystems gegenüber Schwankungen der verschiedenen Parameterwerte ermittelt werden. Eine derartige globale Sensitivitätsanalyse kommt zum einen dem generellen Systemverständnis zugute, zum anderen erlaubt sie gegebenenfalls die Fokussierung weiterer Untersuchungsaktivitäten auf bestimmte Problemparameter. Die verwendeten Verfahren der Sensitivitätsanalyse führten in den Modellrechnungen für die relevanten Parameter stets zu der gleichen Rangfolge. Der Einsatz unterschiedlicher Methoden erhöht dabei wesentlich das Vertrauen in die erzielten Ergebnisse. Probabilistische Rechnungen werden im Programmpaket RepoTREND über einen speziellen Statistik-Rahmen realisiert, der den Namen RepoSTAR trägt (RepoTREND

framework for STATistic Runs). Für die Auswertung der vorliegenden Rechnungen konnte jedoch noch nicht auf das zu RepoSTAR gehörige Auswertewerkzeug RepoSUN zurückgegriffen werden, da dieses erst seit dem Jahr 2016 zur Verfügung steht. Gegenüber der für die vorliegenden Rechnungen noch notwendigen Handarbeit stellt RepoSUN in puncto Flexibilität, Benutzerfreundlichkeit und Robustheit gegen Bedienungsfehler eine erhebliche Verbesserung dar /BEC 16/. Eine Erweiterung dieses Werkzeugs auf zusätzliche Verfahren der Ungewissheits- und Sensitivitätsanalyse wäre jedoch wünschenswert.

Die Festlegung wissenschaftskonformer Werteverteilungen für die Parameter ist keineswegs trivial. Bei der Umsetzung der VSG-Szenarien wurde der Weg verfolgt, in Anlehnung an die pauschale Kategorisierung in Wahrscheinlichkeitsklassen gemäß den Sicherheitsanforderungen ausschließlich Gleichverteilungen innerhalb für plausibel angesehener Grenzen zu verwenden. Dieses vereinfachte Vorgehen kann dazu führen, dass mögliche Extremsituationen ausgeblendet werden und somit unerkannt bleiben. Ein klar festgelegtes, objektives und nachvollziehbares Vorgehen zur Bestimmung von Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen auf der Basis tatsächlichen Wissens existiert bisher nicht. Hierzu besteht noch erheblicher FuE-Bedarf.

6 Zusammenfassung

Der vorliegende Bericht beschäftigt sich mit der Rolle probabilistischer Untersuchungen im Rahmen von Langzeitsicherheitsanalysen. Ausgangspunkt der Arbeiten ist die Frage der Umsetzung von Szenarien in Rechenfälle für die radiologische Konsequenzenanalyse gemäß den Sicherheitsanforderungen /BMU 10/. Die im Vorhaben „Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben“ (VSG) entwickelten Szenarien stellen die Basis für die vorliegende Untersuchung und wurden für die Ableitung von Rechenfällen verwendet. Dafür wurden die Szenarien aus der VSG, die auf der Basis von FEP bereits in Wahrscheinlichkeitsklassen eingeteilt sind, in probabilistische Rechenfälle umgesetzt. Die Parametrisierung erfolgt bei diesem Ansatz erst nach Festlegung der Szenarien über die Festlegung einer Ausprägung für jeden einzelnen Parameter. Die Festlegung ist mathematisch nicht eindeutig und erfolgt mit Hilfe von Expertenwissen (ggf. mit Hilfe von Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen). Letztlich erfolgt die Bewertung der Rechenergebnisse an Hand der in den Sicherheitsanforderungen gegebenen Kriterien. Dies ist ein anderes Vorgehen als beim klassischen Ansatz: Hier wird, z.B. auf der Basis von FEP, ein „globaler“ probabilistischer Rechenfall aufgesetzt. Für jeden Parameter ist zur Parametrisierung eine Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion erforderlich. Die Ergebnisse aus den Realisationen haben eine Wahrscheinlichkeit und können an Hand der in den Sicherheitsanforderungen gegebenen Kriterien bewertet werden. Eine Abwägung der Vor- und Nachteile der Methoden ist aus heutiger Sicht schwierig und hängt stark von der weiteren Ausgestaltung der regulatorischen Vorgaben ab. Es ist aber zu erwarten, dass beide Vorgehensweisen für die Bewertung der Ungewissheiten hinsichtlich der zukünftigen Entwicklung zum Einsatz kommen.

Die Festlegung wissenskonformer Werteverteilungen für die Parameter ist dabei keineswegs trivial. Bei der Umsetzung der VSG-Szenarien wurde der Weg verfolgt, in Anlehnung an die pauschale Kategorisierung in Wahrscheinlichkeitsklassen gemäß den Sicherheitsanforderungen ausschließlich Gleichverteilungen innerhalb für plausibel angesehener Grenzen zu verwenden. Dieses vereinfachte Vorgehen kann dazu führen, dass mögliche Extremsituationen ausgeblendet werden und somit unerkannt bleiben. Ein klar festgelegtes, objektives und nachvollziehbares Vorgehen zur Bestimmung von Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen auf der Basis tatsächlichen Wissens existiert bisher nicht. Hierzu besteht noch erheblicher FuE-Bedarf.

Schwerpunkt der Arbeiten im Rahmen von ISIBEL-II war die Überprüfung der Vorgehensweise der VSG, da es für den klassischen Ansatz bereits zahlreiche Anwendungsbeispiele gibt.

Die abgeleiteten Rechenfälle wurden mit den deterministischen und probabilistischen Werkzeugen des Programmpakets RepoTREND untersucht. Für die deterministische Berechnung des Referenzszenariums wurden Parameterwerte zusammengestellt, die auf den Angaben aus den früheren Phasen des Vorhabens ISIBEL und aus dem Vorhaben VSG basieren. Die Beschreibung des Referenzszenariums aus dem Vorhaben VSG wurde verwendet, um die in einem Rechenfall zu berücksichtigenden Prozesse und Ereignisse zusammenzustellen. Für die probabilistische Behandlung des Referenzszenariums und aller Alternativszenarien wurden Parameterbandbreiten (Ausprägungen) festgelegt, um das Instrumentarium testen zu können.

Die Analyse der Konsequenzen der untersuchten Szenarien zeigt die Notwendigkeit des gemeinsamen Einsatzes deterministischer und probabilistischer Rechenfälle. Probabilistische Verfahren dienen dabei nicht nur zur Darstellung von Ungewissheiten in deterministischen Rechenfällen durch Einsatz von Parameterbandbreiten. Durch die Vorgabe der Einteilung der Szenarien in Wahrscheinlichkeitsklassen in den Sicherheitsanforderungen und die Notwendigkeit, die Anzahl an Rechenfällen zu den Szenarien auf ein vermittelbares Maß zu begrenzen, sind probabilistische Rechenfälle entscheidend bei der Umsetzung von Szenarien zur Konsequenzenanalyse. Deterministische Rechenfälle können die Anforderungen im Umgang mit Ungewissheiten hier nicht erfüllen.

Zur Untersuchung und zur Darstellung des Systemverständnisses (z. B. durch gezielte Parametervariationen) sind deterministische Rechnungen ein wichtiger Bestandteil eines umfassenden Sicherheitsnachweises. Diese Untersuchungen können im Wesentlichen auf einem deterministischen Basisfall aufbauen, so dass in der Regel für alternative Szenarien keine deterministischen Rechnungen notwendig sind. Deterministische Rechenfälle sind vor allem nützlich für die Kommunikation der Ergebnisse und dabei in ihrer Anschaulichkeit den probabilistischen Rechenfällen überlegen.

Eine angemessene Kombination probabilistischer und deterministischer Rechenfälle kann die jeweiligen Schwachpunkte der Ansätze überbrücken und so das Vertrauen in die Ergebnisse erhöhen. Best-Estimate-Werte bzw. Verteilungsfunktionen mit Bandbreiten konnten im Rahmen des FuE-Vorhabens ISIBEL nur sehr eingeschränkt abge-

leitet werden und beruhen im Wesentlichen auf der Einschätzung der Modellierer. Es ist aber abzusehen, dass diese Angaben auch für einen sehr gut untersuchten Standort für viele Parameter eine sehr große Herausforderung sein werden und nicht in allen Fällen objektiv abgeleitet werden können.

Für ein eindeutiges Auseinanderhalten der Rechenfälle bei der Umsetzung des Referenzszenariums wird folgende Unterscheidung getroffen (siehe Abbildung 6.1):

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

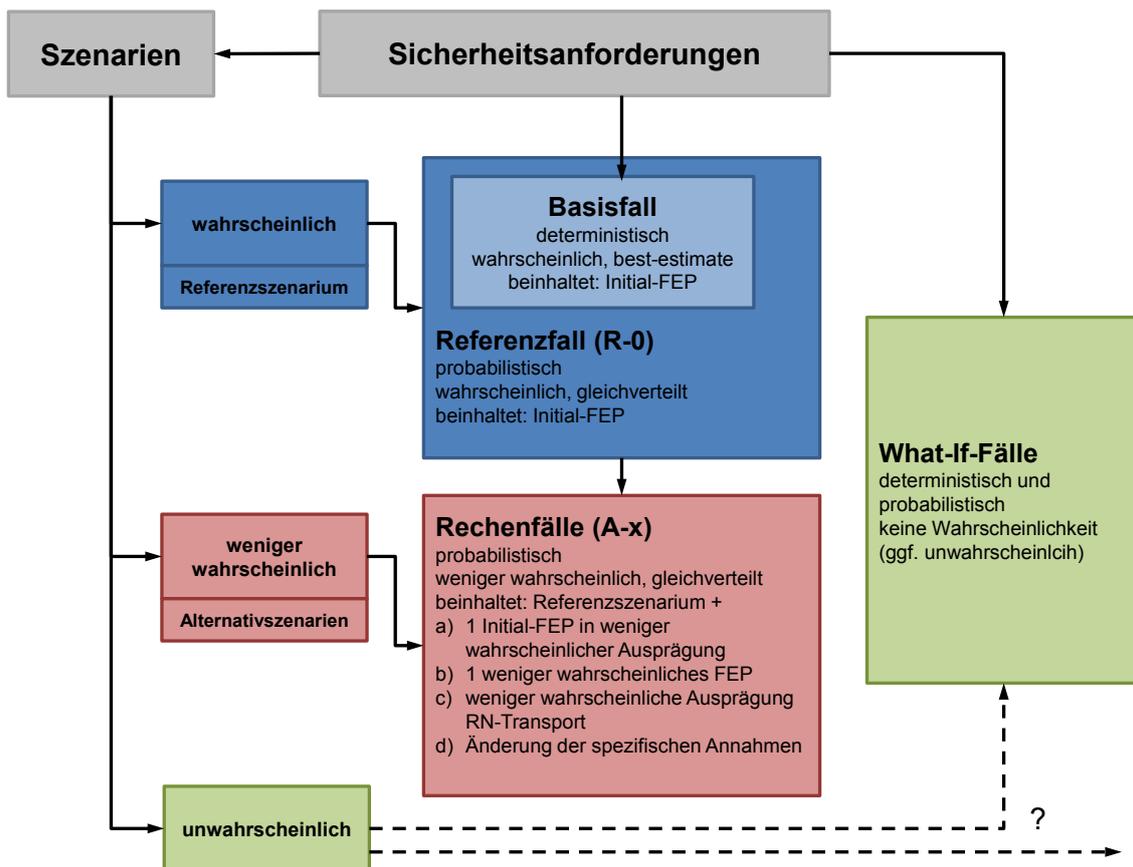


Abb. 6.1 Zusammenfassende Darstellung der notwendigen Rechenfälle zur Umsetzung von Szenarien gemäß den Sicherheitsanforderungen

Auf Basis des Referenzfalls lassen sich Vorgehensweisen angeben, mit denen weitere Rechenfälle, beispielsweise für die Alternativszenarien, abgeleitet werden können. Hierzu wird bei jedem Alternativszenarium geprüft, welches FEP, welche Ausprägung oder welcher sonstige Aspekt gegenüber dem Referenzszenarium geändert ist und welche Auswirkungen dies jeweils auf die zu betrachtenden Prozesse und Ereignisse hat. Es zeigte sich, dass es im Allgemeinen ausreicht, für jeweils einen Parameter eine andere Bandbreite als im Referenzfall anzusetzen.

Wie im Fall der wahrscheinlichen Parameter des Referenzszenariums wird auch für weniger wahrscheinliche Parameter bzw. deren Ausprägungen eine Gleichverteilung für die Konsequenzenanalyse verwendet (siehe Abbildung 6.1). Da Alternativszenarien zum Ziel haben, Szenariungewissheiten abzubilden, sind deterministische Rechnungen mit Best-Estimate-Werten wenig aussagekräftig.

Bei der Ableitung der Alternativszenarien werden folgende Fälle unterschieden:

1. Die Integritätsanalyse zeigt die Funktionsfähigkeit der Barrieren (z. B. keine neuen Wegsamkeiten im Wirtsgestein). Die gegenüber dem Referenzszenarium geänderte Systementwicklung hat keine Auswirkungen auf den Rechenfall zur radiologischen Konsequenzenanalyse. Das Modell des Referenzfalls und dessen Parameter sind weiterhin gültig, daher lässt sich das Alternativszenarium durch den Referenzfall abdecken.
2. Die Integritätsanalyse zeigt die Funktionsfähigkeit der Barrieren. Die gegenüber dem Referenzszenarium geänderte Systementwicklung hat Auswirkungen auf den Rechenfall zur radiologischen Konsequenzenanalyse: Das Modell des Referenzfalls ist weiterhin gültig, die Parameter müssen allerdings angepasst werden. Das Alternativszenarium kann in einen alternativen Rechenfall zur radiologischen Konsequenzenanalyse umgesetzt werden. Es ist zu prüfen, ob dieser Rechenfall durch einen anderen Rechenfall bereits abgedeckt ist.
3. Die Integritätsanalyse zeigt die Funktionsfähigkeit der Barrieren nicht. Es ergibt sich ein neuer Rechenfall. Die Verletzung der Integrität (insbesondere der geologischen Barriere) führt zu einer signifikant veränderten Systementwicklung, so dass davon auszugehen ist, dass dieser neue Rechenfall weder durch den Referenzfall noch durch einen anderen vorhandenen Rechenfall abgedeckt werden kann.

Die Untersuchungen zeigen, dass das Instrumentarium für die Durchführung von probabilistischen Rechnungen weit fortgeschritten ist. Die wesentlichen Alternativszenarien konnten in Rechenfällen abgebildet und die Konsequenzen berechnet werden. Die Gründe für nicht erfolgte Umsetzungen sind vor allem damit begründet, dass sie den Rahmen des Vorhabens sprengen würden. Bei der Umsetzung von Prozessen, die mittels einer Vielzahl von Parametern abgebildet werden (z. B. die Konvergenz) in probabilistische Rechenläufe besteht ein methodisches Problem, das in zukünftigen Arbeiten untersucht werden sollte.

Zur Interpretation der Ergebnisse lassen sich diverse Rechengrößen verwenden. Bei deterministischen Rechnungen können direkt der zeitliche Verlauf und die Maxima des RGI verwendet werden, für probabilistische Rechnungen können die statistischen Kenngrößen (Maximalwerte, Quantile, Median, etc.) sowie Ergebnisse von Sensitivitätsanalysen verwendet werden.

Die Ergebnisse der Rechnungen zeigen, dass der Transport in dem versetzten Grubengebäude hauptsächlich diffusiv ist. Von großem Einfluss auf die Modellergebnisse sind neben den Diffusionsparametern die Modellparameter für die Ortsdiskretisierung. Da die Rechenzeit bei feiner Ortsdiskretisierung stark ansteigt, konnte dieser Effekt nur in wenigen Varianten berücksichtigt werden. Für eine realitätsnähere Bewertung des Systems müssten alle Rechenfälle mit feiner Ortsdiskretisierung gerechnet werden. Der diffusive Transport ist sehr langsam, so dass das Maximum der Freisetzung erst nach dem Nachweiszeitraum von einer Million Jahren erreicht wird. Für ein umfassendes Systemverständnis ist daher eine Untersuchung der Rechnungen über ein Zeitintervall größer als 1 Million Jahre sinnvoll. Das vorhandene Instrumentarium ist so flexibel, dass beliebig lange Modellzeiten untersucht werden können. Problematisch ist aber, dass die Rechnungen so in einem Zeitrahmen geführt werden, in dem eine vernünftige Prognose zur Stabilität des geologischen Systems nicht mehr möglich ist. Die Kommunikation dieses Sachverhaltes ist eine Herausforderung für einen Langzeitsicherheitsnachweis, der diffusiv-kontrollierte Freisetzungen bewerten muss.

Die Ergebnisse bestätigen auch, dass der schon oft diskutierte Aspekt des Transports von Schadstoffen in porösen Medien bei geringen Werten der Porosität äußerst wichtig ist. In den vorliegenden Untersuchungen wurde angenommen, dass ein Transport auch bei sehr geringen Porositäten möglich ist. Im Vorhaben VSG wurde angenommen, dass der Transport unterhalb eines Schwellenwertes der Porosität unterbrochen wird. Da die Ergebnisse der Transportrechnungen hier und im Vorhaben VSG signifikant un-

terschiedlich sind, ist der Aspekt „Transportverhalten von Radionukliden in kompaktiertem Salzgrus“ in Zukunft weiter zu untersuchen. Legt man für diesen Aspekt das vorhandene, durch Experimente belegbare Systemverständnis zugrunde führt eine konservative Parameterwahl für einen eng ausgewiesenen ewG Verletzungen der in den Sicherheitsanforderungen gegebenen radiologischen Kriterien (gemäß der vereinfachten radiologischen Langzeitaussage) mit sich.

7 Literatur

- /BEC 16/ Becker, D.-A.: RepoSTAR – Ein Coderahmen zur Steuerung und Auswertung statistischer Rechenläufe mit dem Programmpaket RepoTREND, GRS-411, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH, BMWi-FKZ 02E10367, Braunschweig, 2016.
- /BEU 12/ Beuth, T., Bracke, G., Buhmann, D., Dresbach, C., Keller, S., Krone, J., Lommerzheim, A., Mönig, J., Mrugalla, S., Rübel, A., Wolf, J.: Szenarientwicklung: 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/ Biennu, P., Ferreux, L., Andreoletti, G., Arnal, N., Lépy, M.-C., Bé, M.-M.: Determination of ^{126}Sn half-life from ICP-MS and gamma spectrometry measurements. *Radiochimica Acta* 97, 687–694, 2009.
- /BMU 10/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung wärmeentwickelnder radioaktiver Abfälle. Bonn, Stand: 30. September 2010.
- /BMU 12/ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Allgemeine Verwaltungsvorschrift zu § 47 der Strahlenschutzverordnung: Ermittlung der Strahlenexposition durch die Ableitung radioaktiver Stoffe aus kerntechnischen Anlagen oder Einrichtungen. Bundesanzeiger AT 05.09.2012 B1, Bonn, 28. August 2012.
- /BOL 09/ Bolado-Lavin, R., Castaings, W., Tarantola, S.: Contribution of the sample mean plot for graphical and numerical sensitivity analysis. *Reliability Engineering and System Safety*, 94, 1041-1049, 2009.
- /BOL 11/ Bollingerfehr, W., Filbert, W., Lerch, C., Tholen, M.: Endlagerkonzepte. Bericht zum Arbeitspaket 5, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-272, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, ISBN 978-3-939355-48-9, Köln, 2011.

- /BOL 12/ Bollingerfehr, W., Filbert, W., Dörr, S., Herold, P., Lerch, C., Burgwinkel, P., Charlier, F., Thomauske, B., Bracke, G., Kilger, R.: Endlagerauslegung und -optimierung. Bericht zum Arbeitspaket 6, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-281, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, ISBN 978-3-939355-57-1, Köln, 2012.
- /BUH 08/ 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.: Nachweis und Bewertung des Isolationszustandes "Sicherer Einschluss". Teilbericht zum Projekt ISIBEL: „Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW“ von DBE TECHNOLOGY GmbH, BGR und GRS, BMWi-FKZ 02E10065 und 02E10055. Peine, 2010.
- /FIS 13/ Fischer-Appelt, K., Baltés, B., Buhmann, D., Larue, J., Mönig, J.: Synthesericht 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.
- /FLU 16/ Flüge, J., Lauke, T., Mieke, R., Rübél, A.: Diffusion in the pore water of compacted salt grit. GRS-421, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH. ISBN 978-3-946607-03-8 BMWi-FKZ 02E10951, Braunschweig, 2016.
- /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.

- /JÖR 10/ Jörg, G., Bühnemann, R., Hollas, S., Kivel, N., Kossert, K., Van Winkel, S., Lierse v. Gostomski, C.: Preparation of radiochemically pure ⁷⁹Se and highly precise determination of its half-life. Applied Radiation and Isotopes 68, 2339–2351, 2010.
- /KIE 12/ Kienzler, B., Altmaier, M., Bube, C., Metz, V.: Radionuclide Source Term for HLW Glass, Spent Nuclear Fuel, and Compacted Hulls and End Pieces (CSD-C Waste). KIT Scientific Reports 7624, 2012.
- /LAR 13/ Larue, J., Balthes, 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.
- /MÖN 12/ Mönig, J., Buhmann, D., Rübél, A., Wolf, J., Balthes, B., Fischer-Appelt, K.: Sicherheits- und Nachweiskonzept. Bericht zum Arbeitspaket 4, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-277, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, ISBN 978-3-939355-53-3, Köln, 2012.
- /MRU 11/ Mrugalla, S.: Geowissenschaftliche Langzeitprognose. Bericht zum Arbeitspaket 2, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-275, ISBN 978-3-939355-51-9, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, Köln, Juli 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.
- /POP 12/ Popp, T., Salzer, K., Schulze, O., Stührenberg, D.: Hydro-mechanische Eigenschaften von Salzgrusversatz – Synoptisches Prozessverständnis und Datenbasis. Memorandum, Institut für Gebirgsmechanik (IFG), Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), Leipzig, 2012.

- /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 Umwelt und Gesundheit, Institut für Strahlenschutz: Neuherberg, 2002.
- /REI 16/ Reiche, T.: RepoTREND – Das Programmpaket zur integrierten Langzeitsicherheitsanalyse von Endlagersystemen. GRS-416, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH. BMWi-FKZ 02E10367. ISBN 978-3-944161-95-2. Braunschweig, 2016.
- /STO 88/ Storck, R., Aschenbach, J., Hirsekorn, R.-P., Nies, A., Stelte, N.: Performance Assessment of Geological Isolation Systems for Radioactive Waste (PAGIS): Disposal in Salt Formations. EUR 11 778 EN, GSF-Bericht 23/88. Commission of the European Communities, Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung mbH München, Brussels-Luxembourg, 1988.
- /STO 96/ Storck, R., Buhmann, D., Hirsekorn, R.-P., Kühle, T., Lührmann, L.: Das Programmpaket EMOS zur Analyse der Langzeitsicherheit eines Endlagers für radioaktive Abfälle. Version 5. GRS-122, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH. BMBF-FKZ 02E8522-3; ISBN 3-923875-75-4, Braunschweig, 1996.
- /WOL 12a/ Wolf, J.W., Altmaier, M., Behlau, J., Beuth, T., Bracke, G., Bube, C., Buhmann, D., Dresbach, C., Hammer, J., Keller, S., Kienzler, B., Klinge, H., Krone, J., Lommerzheim, A., Metz, V., Mönig, J., Mrugalla, S., Popp, T., Rübel, A., Weber, J.R.: Konzept und Aufbau des FEP-Kataloges. Bericht zum Arbeitspaket 7, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-282, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; ISBN 978-3-939355-58-8, Köln, 2012.
- /WOL 12b/ Wolf, J.W., Altmaier, M., Behlau, J., Beuth, T., Bracke, G., Bube, C., Buhmann, D., Dresbach, C., Hammer, J., Keller, S., Kienzler, B., Klinge, H., Krone, J., Lommerzheim, A., Metz, V., Mönig, J., Mrugalla, S., Popp, T., Rübel, A., Weber, J.R.: FEP-Katalog. Bericht zum Arbeitspaket 7, Vorläufige Sicherheitsanalyse für den Standort Gorleben, GRS-283, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH; Köln, 2012.

8 **Abbildungsverzeichnis**

Abb. 1.1	Entwicklungen und Szenarien sowie deren Bedeutung im Langzeitsicherheitsnachweis	3
Abb. 1.2	Schematische Darstellung von der Entwicklung von Szenarien bis zur rechentechnischen Auswertung und Synthese der Ergebnisse /BEU 12/... 5	
Abb. 3.1	Segmentstruktur des Nahfeldes	21
Abb. 3.2	Ableitung von Wahrscheinlichkeitsklassen aus einer Verteilungsdichtefunktion. Die farbig markierten Grenzen werden so bestimmt, dass die Integrale über die Teilintervalle 0,9 (rot) bzw. 0,99 (rot + cyan) betragen. Auf der x-Achse entspricht dann das rote Intervall dem wahrscheinlichen, das cyanfarbene dem weniger wahrscheinlichen und das grüne dem unwahrscheinlichen Parameterbereich. Die gestrichelte Linie gibt eine stilisierte Verteilungsfunktion mit Gesamtwahrscheinlichkeiten von 0,9 für wahrscheinliche und 0,1 für weniger wahrscheinliche Werte wieder.	24
Abb. 3.3	Temperaturstützstellen	35
Abb. 3.4	Fallunterscheidungen zur Umsetzung von Alternativszenarien in Rechenfälle	47
Abb. 4.1	Temperaturverläufe in den östlichen Einlagerungsfeldern; Basisfall.....	61
Abb. 4.2	Temperaturverläufe in den östlichen Richtstrecken und Querschlägen sowie im westlichen Bereich; Basisfall	61
Abb. 4.3	Porositätsverläufe für fünf ausgewählte Grubenbereiche; Basisfall.....	62
Abb. 4.4	Porositätsverläufe aus dem Vorhaben VSG /LAR 13/	62
Abb. 4.5	Porositätsverläufe bei „schneller“ Konvergenz und Vergleich mit dem Vorhaben VSG /LAR 13/	63
Abb. 4.6	Pegelhöhen in Segmenten des östlichen Bereichs; Basisfall	64

Abb. 4.7	Fluiddruck in Segmenten des östlichen Bereichs; Basisfall.....	65
Abb. 4.8	Konzentrationen von Sn-126 in den Einlagerungsstrecken des östlichen Bereichs; Basisfall	66
Abb. 4.9	Konzentrationen von Sn-126 in Querschlägen und Richtstrecken des östlichen Bereichs; Basisfall.....	67
Abb. 4.10	Nuklidstrom von Sn-126 am Schacht und in Richtstrecken; Basisfall.....	68
Abb. 4.11	Radiologische Konsequenz (RGI) im Basisfall	69
Abb. 4.12	Radiologische Konsequenz (RGI) im Basisfall, Variante 1 (B-Var1).....	70
Abb. 4.13	Räumlicher Konzentrationsverlauf von Sn-126 in der Richtstrecke Ost; Basisfall, Variante mit schneller Konvergenz und feiner Ortsdiskretisierung (B-Var2).....	71
Abb. 4.14	Zeitlicher Verlauf der Konzentrationen von Sn-126 in der Richtstrecke Ost; Basisfall, Variante mit schneller Konvergenz und feiner Ortsdiskretisierung (B-Var2).....	72
Abb. 4.15	RGI am Schacht; Basisfall, Variante mit schneller Konvergenz und feiner Ortsdiskretisierung (B-Var2).....	73
Abb. 4.16	RGI an der Abdichtung RS-VO; Basisfall, Variante mit feiner Ortsdiskretisierung (B-Var4).....	74
Abb. 4.17	Basisfall; Konzentrationen von Sn-126; Variante mit feiner Ortsdiskretisierung und längerer Richtstrecke RS-O1 (B-Var5).....	75
Abb. 4.18	Basisfall; RGI am Schacht; Variante mit feiner Ortsdiskretisierung und längeren Richtstrecken RS-O1 und RN-O1 (B-Var5)	76
Abb. 4.19	Zeitlicher Verlauf der statistischen Kenngrößen des RGI; Referenzfall R-0.....	77
Abb. 4.20	Häufigkeitsdichte der Maximalwerte des RGI; Referenzfall R-0	78

Abb. 4.21	Komplementäre kumulative Häufigkeit des RGI; Referenzfall R-0	79
Abb. 4.22	Zeitlicher Verlauf der statistischen Kenngrößen des RGI am Schacht; Referenzfall, feine Ortsdiskretisierung.....	80
Abb. 4.23	Häufigkeitsdichte der Maximalwerte des RGI am Schacht; Referenzfall, feine Ortsdiskretisierung	80
Abb. 4.24	Komplementäre kumulative Häufigkeit des RGI am Schacht; Referenzfall, feine Ortsdiskretisierung.....	81
Abb. 4.25	Zeitlicher Verlauf der statistischen Kenngrößen des RGI am Schacht; Referenzfall, RS-O1 verlängert, aber nicht intern diskretisiert.....	82
Abb. 4.26	Häufigkeitsdichte der Maximalwerte des RGI am Schacht; Referenzfall, RS-O1 verlängert, aber nicht intern diskretisiert.....	82
Abb. 4.27	Komplementäre kumulative Häufigkeit des RGI am Schacht; Referenzfall, RS-O1 verlängert, aber nicht intern diskretisiert.....	83
Abb. 4.28	Zeitlicher Verlauf der statistischen Kenngrößen des RGI am Schacht; Referenzfall, RS-O1 verlängert; Blocklänge 18 m (R-0-Var3)	84
Abb. 4.29	Häufigkeitsdichte der Maximalwerte des RGI am Schacht; Referenzfall, RS-O1 verlängert; Blocklänge 18 m (R-0-Var3)	84
Abb. 4.30	Komplementäre kumulative Häufigkeit des RGI am Schacht; Referenzfall, RS-O1 verlängert, Blocklänge 18 m (R-0-Var3)	85
Abb. 4.31	Zeitlicher Verlauf der statistischen Kenngrößen des RGI am Streckenverschluss; Referenzfall, Rand des ewG an RS-VO.....	86
Abb. 4.32	Häufigkeitsdichte der Maximalwerte des RGI am Streckenverschluss; Referenzfall, Rand des ewG an RS-VO	87
Abb. 4.33	Komplementäre kumulative Häufigkeit des RGI am Streckenverschluss; Referenzfall, Rand des ewG an RS-VO	87

Abb. 4.34	Zeitlicher Verlauf der statistischen Kenngrößen des RGI am Schacht; Referenzfall, schnelle Konvergenz.....	88
Abb. 4.35	Häufigkeitsdichte der Maximalwerte des RGI am Schacht; Referenzfall, schnelle Konvergenz	89
Abb. 4.36	Komplementäre kumulative Häufigkeit des RGI am Schacht; Referenzfall, schnelle Konvergenz.....	89
Abb. 4.37	Beitrag der unabhängigen Variablen zum Stichprobenmittel (CSM) für den Referenzfall	90
Abb. 4.38	Standardisierte Rangregressionskoeffizienten (SRRC) für den Referenzfall	91
Abb. 4.39	Scatterplot für den Referenzfall: Diffusionskoeffizient	92
Abb. 4.40	Scatterplot für den Referenzfall: Grenzporosität	92
Abb. 4.41	Beitrag der unabhängigen Variablen zum Stichprobenmittel (CSM) für den Referenzfall, Variante mit feiner Ortsdiskretisierung	93
Abb. 4.42	Rangkoeffizienten gemäß SRRC für den Referenzfall, Variante mit feiner Ortsdiskretisierung (R-0-Var1).....	94
Abb. 4.43	Scatterplot für den Referenzfall, Variante mit feiner Ortsdiskretisierung: Diffusionskoeffizient.....	95
Abb. 4.44	Scatterplot für den Referenzfall, Variante mit feiner Ortsdiskretisierung: Grenzporosität	95
Abb. 4.45	Zeitlicher Verlauf der statistischen Kenngrößen des RGI am Schacht; alternativer Rechenfall: frühes Versagen des Schachtverschlusses.....	97
Abb. 4.46	Häufigkeitsdichte der Maximalwerte des RGI am Schacht; alternativer Rechenfall: Frühes Versagen des Schachtverschlusses.....	97

Abb. 4.47	Komplementäre kumulative Häufigkeit des RGI am Schacht; alternativer Rechenfall: Frühes Versagen des Schachtverschlusses.....	98
Abb. 4.48	Zeitlicher Verlauf der statistischen Kenngrößen des RGI am Schacht; alternativer Rechenfall: Frühes Versagen des Streckenverschlusses	99
Abb. 4.49	Häufigkeitsdichte der Maximalwerte des RGI am Schacht; alternativer Rechenfall: Frühes Versagen des Streckenverschlusses.....	99
Abb. 4.50	Komplementäre kumulative Häufigkeit des RGI am Schacht; alternativer Rechenfall: Frühes Versagen des Streckenverschlusses.....	100
Abb. 4.51	Zeitlicher Verlauf der statistischen Kenngrößen des RGI am Schacht; alternativer Rechenfall: Lösungsvolumen INFRA-B	101
Abb. 4.52	Häufigkeitsdichte der Maximalwerte des RGI am Schacht; alternativer Rechenfall: Lösungsvolumen INFRA-B.....	101
Abb. 4.53	Komplementäre kumulative Häufigkeit des RGI am Schacht; alternativer Rechenfall: Lösungsvolumen INFRA-B.....	102
Abb. 4.54	Zeitlicher Verlauf der statistischen Kenngrößen des RGI am Schacht; What-if-Rechenfall: Einhüllende von drei Szenarien (WIF-1)	103
Abb. 4.55	Häufigkeitsdichte der Maximalwerte des RGI am Schacht; What-if-Rechenfall: Einhüllende von drei Szenarien (WIF-1).....	104
Abb. 4.56	Komplementäre kumulative Häufigkeit des RGI am Schacht; What-if-Rechenfall: Einhüllende von drei Szenarien (WIF-1).....	104
Abb. 4.57	Zeitlicher Verlauf der statistischen Kenngrößen des RGI am Schacht; What-if-Rechenfall: kleiner Diffusionskoeffizient (WIF-2).....	106
Abb. 4.58	Häufigkeitsdichte der Maximalwerte des RGI am Schacht; What-if-Rechenfall: kleiner Diffusionskoeffizient (WIF-2).....	106
Abb. 4.59	Komplementäre kumulative Häufigkeit des RGI am Schacht; What-if-Rechenfall: kleiner Diffusionskoeffizient (WIF-2).....	107

Abb. 4.60	Zeitlicher Verlauf der statistischen Kenngrößen des RGI am Schacht; What-if-Rechenfall: gemeinsames frühes Versagen von Verschlüssen (WIF-3)	108
Abb. 4.61	Häufigkeitsdichte der Maximalwerte des RGI am Schacht; What-if-Rechenfall: gemeinsames frühes Versagen von Verschlüssen (WIF-3) .	108
Abb. 4.62	Komplementäre kumulative Häufigkeit des RGI am Schacht; What-if-Rechenfall: gemeinsames frühes Versagen von Verschlüssen (WIF-3) .	109
Abb. 4.63	Zeitlicher Verlauf der statistischen Kenngrößen des RGI am Schacht (Klassischer Ansatz)	110
Abb. 4.64	Häufigkeitsdichte der Maximalwerte des RGI am Schacht (Klassischer Ansatz)	111
Abb. 4.65	Komplementäre kumulative Häufigkeit des RGI am Schacht (Klassischer Ansatz)	111
Abb. 4.66	Maximalwerte des RGI für ausgewählte Rechenfälle	113
Abb. 4.67	Mediane des RGI für ausgewählte Rechenfälle	114
Abb. 5.1	Vorgehensweisen bei der Zuweisung von Szenarien in Wahrscheinlichkeitsklassen zur Bewertung mittels radiologischer Kriterien, 1: VSG-Ansatz, 2: klassischer Ansatz	119
Abb. 6.1	Zusammenfassende Darstellung der notwendigen Rechenfälle zur Umsetzung von Szenarien gemäß den Sicherheitsanforderungen.....	129

9 Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1	Orientierende zeitliche Einordnung der für das Teilsystem „Nahfeld“ zu berücksichtigenden Initial-FEP /BEU 12/	8
Tab. 2.2	Orientierende zeitliche Einordnung der für das Teilsystem „Strecken und Schächte“ zu berücksichtigenden Initial-FEP /BEU 12/	9
Tab. 2.3	Orientierende zeitliche Einordnung der für das Teilsystem „Wirtsgestein“ zu berücksichtigenden Initial-FEP /BEU 12/	10
Tab. 2.4	Orientierende zeitliche Einordnung der für das Teilsystem „Deck- und Nebengebirge“ zu berücksichtigenden Initial-FEP /BEU 12/	10
Tab. 2.5	Beeinflussende FEP für Radionuklidmobilisierung /BEU 12/	11
Tab. 2.6	Beeinflussende FEP für Radionuklidtransport in der flüssigen Phase und Radionuklidtransport in der Gasphase /BEU 12/	11
Tab. 2.7	Alternativszenarien aus alternativen Betrachtungen	12
Tab. 2.8	Alternativszenarien aus weniger wahrscheinlichen Ausprägungen von Initial-FEP	13
Tab. 2.9	Alternativszenarien aus weniger wahrscheinlichen FEP	15
Tab. 2.10	FEP mit Eintrittswahrscheinlichkeit „nicht zu betrachten“ /WOL 12a/	16
Tab. 3.1	Berechnungsgrundlagen für das Inventar eines POLLUX-Behälters für ausgediente Brennelemente /LAR 13/	27
Tab. 3.2	Relative Freisetzungsraten in den Bereichen eines Brennelements /BUH 08/	28
Tab. 3.3	Mobilisierungsparameter /BUH 08/	28
Tab. 3.4	Elementspezifische Inventaranteile in den einzelnen Bereichen eines LWR-Brennelementes und Löslichkeitsgrenzen /LAR 13/	29

Tab. 3.5	Berechnungsgrundlagen für das Inventar eines Behälters aus dem Gesamtinventar der sonstigen radioaktiven Mischabfälle /LAR 13/.....	29
Tab. 3.6	Volumina von Abfallbehältern, westliche Einlagerungsfelder /BOL 11/.....	30
Tab. 3.7	Anzahl der Abfälle im LOPOS-Modell pro Modell-Einlagerungsfeld; „1“ = alle Behälter sind in diesem Feld (grün=wird verwendet).....	30
Tab. 3.8	Anzahl der Behälter/Abfälle für die in LOPOS modellierten Segmente.....	30
Tab. 3.9	Abmessungen der Modell-Einlagerungsfelder in LOPOS.....	31
Tab. 3.10	Abmessungen der Modellsegmente für den Infrastrukturbereich und für die Schachtverschlüsse, Zugangsstrecken und Querschläge	32
Tab. 3.11	Globale Konvergenzparameter	33
Tab. 3.12	Lokale Konvergenzparameter	34
Tab. 3.13	Zuordnung der Temperaturstützstellen zu den Modellsegmenten.....	35
Tab. 3.14	Halbwertszeiten [a] der betrachteten Radionuklide /GRS 09/.....	36
Tab. 3.15	Inventare der einzelnen Abfallarten zu Beginn der Nachverschlussphase (Zeitpunkt 40,6 Jahre nach Beginn der Einlagerung im Jahre 2035) /LAR 13/ (Gesamtinventar; bei Brennelementen umgerechnet auf das Inventar pro Behälter)	37
Tab. 3.16	Sonstige Parameter (Nahfeld).....	38
Tab. 3.17	Maximale Elementkonzentrationen im Grubengebäude	39
Tab. 3.18	Parameter für die Beziehung zwischen Porosität und Permeabilität.....	39
Tab. 3.19	Parameter für Verschlussbauwerke	40
Tab. 3.20	Dosiskonversionsfaktoren (DKF) in [Sv/a pro Bq/m ³] gemäß /PRÖ 02/, zitiert nach /LAR 13/	42

Tab. 3.21	Parameter, Bandbreiten und Verteilungen für das Referenzszenarium....	44
Tab. 3.22	Zeitpunkt des Totalversagens des Schachtverschlusses (A1a2).....	48
Tab. 3.23	Erhöhtes Lösungsvolumen im Infrastrukturbereich (A1i6)	50
Tab. 3.24	Frühes Versagen von Abdichtungen (A1w1 und A1w2)	53
Tab. 3.25	Bandbreite des Diffusionskoeffizienten im Rechenfall WIF-2	53
Tab. 3.26	Parameterverteilungen für den klassischen Ansatz mit gleichzeitiger Variation aller unabhängigen Variablen	55
Tab. 3.27	Übersicht der abgeleiteten Rechenfälle	57
Tab. 4.1	Statistische Kenngrößen für die Maximalwerte des RGI der untersuchten probabilistischen Rechnungen.....	112

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

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

Forschungszentrum
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