



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

**Ermittlung und
Bewertung von
Freisetzungsszenarien**



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

Untersuchungen zur Ermittlung und Bewertung von Freisetzungsszenarien

Teilbericht zum Projekt ISIBEL:
„Überprüfung und Bewertung
des Instrumentariums für eine
sicherheitliche Bewertung von
Endlagern für HAW“

Dieter Buhmann
Jörg Mönig
Jens Wolf

April 2008

Anmerkung:

Die diesem Bericht zugrundeliegenden Arbeiten wurden mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) unter dem Förderkennzeichen 02 E 10055 gefördert.

Die Arbeiten wurden von der Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH durchgeführt.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt alleine bei den Autoren.

**GRS - 233
ISBN 978-3-939355-07-6**

Deskriptoren:

Computer Code, Endlager, F+E, Hochaktiver Abfall, Langzeitsicherheit, Nuklidtransport, Salz, Sicherheitsanalyse

Vorwort

Im Rahmen des Vorhabens ISIBEL wurde ein Nachweiskonzept für die sicherheitliche Bewertung von Endlagern für hochradioaktive Abfälle in der Wirtsgestein Salz entwickelt und untersucht, inwieweit das Instrumentarium für die Bewertung der Betriebs- und Nachbetriebsphase eines solchen Endlagers vorhanden, bzw. ausreichend ist. Zusätzlich wurde ein FEP-Katalog erarbeitet, in dem alle relevanten FEP zusammengestellt wurden. Die im Zeitraum vom 01.10.2005 bis 31.12.2007 durchgeführten Arbeiten sind in den folgenden Berichten zusammengefasst.

Zusammenfassender Bericht

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

Einzelberichte der Organisationen

1. Langzeitsicherheitsanalyse für ein HAW-Endlager im Salz – Geologisches Referenzmodell für einen HAW-Endlagerstandort im Salz – Technischer Bericht. Beitrag für das Projekt ISIBEL. BGR, Hannover, Tagebuchnummer 11614/05, Juli 2007
2. Konzeptionelle Endlagerplanung und Zusammenstellung des endzulagernden Inventars. DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine, April 2008
3. Bewertung der Betriebssicherheit. DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine, April 2008
4. FEP-Generierung und Szenarienentwicklung – Stand November 2006. BGR, Hannover, Tagebuchnummer 10402/08, Februar 2008
5. Nachweis der Integrität der geologischen Barriere. BGR, Hannover, Tagebuchnummer 10403/08, September 2007
6. Nachweiskonzept zur Integrität der einschlusswirksamen technischen Barrieren. DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine, April 2008
7. Untersuchungen zur Ermittlung und Bewertung von Freisetzungsszenarien. GRS Braunschweig, Bericht GRS-233, April 2008
8. Nachweiskonzepte für die Einhaltung der nicht radiologischen Schutzziele in der Nachbetriebsphase. DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine, April 2008
9. FEP-Katalog für einen HAW-Standort im Wirtsgestein Salz. Version 01. Gemeinsamer Bericht von DBE TECHNOLOGY GmbH, BGR und GRS. Peine, Hannover, Braunschweig, April 2008

Inhaltsverzeichnis

	Vorwort.....	I
1	Einleitung	1
2	FEP und Szenarien	3
2.1	Vorgehensweise	3
2.2	Betrachtete FEP und Szenarien.....	12
2.3	Menschliche Einwirkungen	13
2.4	Berücksichtigung von natürlichen Analoga.....	15
2.5	Verfahren zur Ermittlung weiterer Szenarien.....	17
3	Untersuchung von Freisetzungsszenarien	19
3.1	Sicherheits- und Funktionsindikatoren	19
3.2	Konzept- und Modellentwicklung	21
3.2.1	Beschreibung der Segmentmodelle	23
3.2.2	Modelle für die Mobilisierung von Radionukliden	30
3.2.3	Grubengebäudestruktur und Eingangsdaten.....	31
3.3	Ergebnisse (Konsequenzenanalyse).....	47
3.3.1	Referenzszenario.....	53
3.3.2	Versagen des Schachtverschlusses	54
3.3.3	Versagen der Streckenverschlüsse zwischen Infrastrukturbereich und restlichen Grubenbauen.....	56
3.3.4	Lösungszutritt aus begrenzten Lösungseinschlüssen	57
3.3.5	Kombinierte Szenarien.....	59
3.3.6	Berechnung weiterer Indikatoren	63
3.3.7	Natürliche Analoga	71
4	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	73
4.1	Diskussion der Ergebnisse	73
4.1.1	Konzeptuelle Modelle	74
4.1.2	Eingabedaten für die Modelle	76

4.1.3	Numerische Modelle	78
4.1.4	Ausgabedaten der Modelle	79
4.1.5	Szenarienvergleich	80
4.2	Identifizierter F+E-Bedarf	81
4.2.1	FEP und Szenarien.....	81
4.2.2	Eingabedaten	82
4.2.3	Ausgabedaten	85
4.2.4	Modelle	85
4.3	Gesamtergebnis	88
5	Literatur	91
	Abbildungsverzeichnis.....	97
	Tabellenverzeichnis.....	99
6	Anhang: Eingangsdaten der Segmentmodelle	101
6.1	Segmentmodelle für Ein- bzw. Austrittsstellen:	103
6.2	Segmentmodelle für versetzte Strecken	105
6.3	Segmentmodelle für Einlagerungsgrubenbaue	109
6.4	Segmentmodelle für Laugeneinschlüsse	112

1 Einleitung

In diesem Bericht werden Untersuchungen beschrieben, in denen das vorhandene sicherheitsanalytische Instrumentarium hinsichtlich seiner Anwendbarkeit für eine Konsequenzenanalyse für Szenarien, die zu einer Freisetzung von radioaktiven Stoffen aus einem Endlager bis in die Biosphäre führen können, getestet wurde. Zu einer derartigen Freisetzung von radioaktiven Stoffen kann es nur kommen, wenn die Radionuklide aus den Abfällen mobilisiert und in einem geeigneten Transportmedium (Lösungs- oder Gasphase) bis in die Biosphäre transportiert werden. Dies setzt bei einem Endlager in einer Salzformation in der Regel voraus, dass eine oder mehrere Barrieren auf Grund von bestimmten Prozessen oder Ereignissen ausgefallen sind oder in ihrer Funktionsweise beeinträchtigt wurden und es zu einem Zutritt von Lösung in das Endlager gekommen ist. Freisetzungsszenarien bei einem Endlager in einer Salzformation betreffen daher immer eine gestörte Entwicklung des Endlagersystems.

In einem Teilvorhaben des Projektes ISIBEL wurden diejenigen FEP (Features, Events, Processes) für ein Endlager in einer Salzformation am Referenzstandort ermittelt und systematisch beschrieben, die den Schwerpunkt auf die ungestörte Entwicklung des Endlagersystems gelegt haben [17]. In den Arbeiten zum vorliegenden Bericht wurden weitere für gestörte Entwicklungen des Endlagersystems relevante FEP identifiziert und der FEP-Katalog [18] vervollständigt.

Methoden zur Identifizierung von möglichen Freisetzungsszenarien wurden entwickelt und ihre Anwendbarkeit wurde beispielhaft für zwei konkrete Fälle untersucht. Die betrachteten Szenarien sind allerdings nicht auf Basis einer systematischen Szenarientwicklung ermittelt worden. Auch sollten die Freisetzungsszenarien weder möglichst abdeckend sein noch hinsichtlich ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit bewertet werden. Es wurden Konzepte und Modelle für die sicherheitsanalytische Bewertung dieser Freisetzungsszenarien erstellt und Konsequenzenanalysen für einige ausgewählte Szenarien durchgeführt. Aus diesen Arbeiten wurde der noch erforderliche F+E-Bedarf zur Vervollständigung des sicherheitsanalytischen Instrumentariums ermittelt.

Es wird ein Konzept beschrieben, wie die radiologischen Konsequenzen aus den nicht auszuschließenden Freisetzungsszenarien hinsichtlich der Einhaltung von Schutzziele bewertet werden können. Dabei wird auch auf das Thema „Schutzziele“ und „Indikatoren“ allgemein eingegangen. In der Diskussion werden auch die Auswirkungen von zukünftigen menschlichen Einwirkungen berücksichtigt. Es wird darauf eingegangen,

wie die Ergebnisse von Studien zu natürlichen Analoga bei der Bewertung der Konsequenzen sowie zur Absicherung der Modellvorstellungen und der Relevanz von FEP verwendet werden können.

Die Ermittlung und Bewertung der nicht auszuschließenden Freisetzungsszenarien erfolgt in zwei Schritten: In Kapitel 2 wird auf die Ermittlung der FEP und Szenarien eingegangen, in Kapitel 3 auf die Bewertung der untersuchten Szenarien. In Kapitel 4 werden die erzielten Ergebnisse zusammengefasst und der identifizierte zukünftige F+E-Bedarf für die Weiterentwicklung des Instrumentariums diskutiert.

2 FEP und Szenarien

2.1 Vorgehensweise

In die Bewertung der Sicherheit der Endlagerung an einem Standort muss die zukünftige Entwicklung des Endlagersystems über einen langen Betrachtungszeitraum einfließen. Die unterschiedlichen denkbaren Entwicklungen werden über Szenarien beschrieben, die eine Art von „Drehbuch“ darstellen, wie die Prozesse in einem Endlagersystem ablaufen.

Ein Szenario ist durch eine bestimmte Kombination von Eigenschaften, Ereignissen und Prozessen, englisch Features, Events, Processes (FEP) eindeutig charakterisiert. In [17] wird ausführlich dargestellt, wie Szenarien für die ungestörte Entwicklung des Endlagersystems am Referenzstandort entwickelt werden können. Im vorliegenden Bericht werden FEP für die Ermittlung von nicht auszuschließenden Freisetzungsszenarien behandelt und die daraus resultierenden Freisetzungsszenarien diskutiert. Die Freisetzungsszenarien basieren damit auf den FEP für die ungestörte **und** die gestörte Entwicklung des Endlagersystems.

Der Begriff „nicht auszuschließende“ Szenarien ist nicht identisch mit „wahrscheinlichen“ oder „wenig wahrscheinlichen“ Szenarien, sondern soll nur andeuten, dass diese Szenarien für die Untersuchungen im Projekt betrachtet wurden. Beispielsweise ist ein gemeinsames Auftreten eines Versagens des Schachtverschlusses und der Streckenverschlüsse von der Eintrittswahrscheinlichkeit her auszuschließen, wenn beide Ereignisse als voneinander unabhängig betrachtet werden können.

Die verwendete Vorgehensweise zur Ermittlung der für nicht auszuschließende Freisetzungsszenarien relevanten FEP ist ein „top-down-approach“. Das bedeutet, dass die Szenarien nicht systematisch aus einer vollständigen FEP-Liste generiert („bottom-up-approach“), sondern durch Experten identifiziert werden. Die Festlegung der relevanten FEP erfolgte vor dem Hintergrund der Fragen, durch welche Eigenschaften, Prozesse oder Ereignisse es zu einem Ausfall oder zu einer Beeinträchtigung einer oder mehrerer Barrieren kommen kann und welche weiteren Prozesse oder Ereignisse sich daraus ergeben können. Eine derartige „Festlegung“ von relevanten FEP ist international durchaus üblich und wurde beispielsweise auch beim FEP-Katalog für Tonformationen angewendet [26]. Die im vorliegenden Bericht identifizierten FEP sind in den FEP-Katalog für ein Endlager am Referenzstandort eingegangen [18].

Unter Verwendung des „top-down-approaches“ werden in Verbindung mit der Szenarienentwicklung nach dem Ansatz von PROSA [31] die relevanten FEP ermittelt. Nicht relevante FEP, d.h. solche, die nach der PROSA-Methode zu nicht weiter zu verfolgenden Szenarien gehören, werden bei der weiteren Diskussion der Freisetzungsszenarien nicht mehr berücksichtigt (screening).

Der FEP-Katalog [18] enthält keine FEP zur Biosphäre, obwohl diese Bestandteil des Endlagersystems, bzw. des Betrachtungsgebiets für einen Langzeitsicherheitsnachweis ist. Die vielfältigen Transfer- und Transportprozesse für Radionuklide in der Biosphäre sollten standortspezifisch im Rahmen eines Endlagerverfahrens ermittelt und quantifiziert werden. Anhand dieser Erkenntnisse können standortspezifische Dosis-konversionsfaktoren abgeleitet werden, mit denen aus Radionuklidkonzentrationen im Grund- und Trinkwasser potenzielle Strahlenexpositionen berechnet werden. Um den Aufwand zu begrenzen und wegen der generellen Zielsetzung des Projektes ISIBEL, wurde für den Referenzstandort darauf verzichtet. Auf Grund regulatorischer Vorgaben oder weil Daten in der entsprechenden Güte nicht vorliegen, können für Modellrechnungen auch Dosis-konversionsfaktoren verwendet werden, die für stilisierte Biosphärenmodelle abgeleitet wurden. Im Rahmen des Projekts BIOMASS der IAEA [37] wurden für eine Reihe von Referenzbiosphären entsprechende Dosis-konversionsfaktoren ermittelt. Für die in Kapitel 3 beschriebenen sicherheitsanalytischen Rechnungen wurden jedoch Dosis-konversionsfaktoren aus früheren F+E-Projekten [20] verwendet.

Im Folgenden wird schematisch am Beispiel der Szenarien „Versagen des Schachtverschlusses“ und „Lösungszutritt aus einem begrenzten Lösungseinschluss“ dargestellt, wie Freisetzungsszenarien über den top-down-approach abgeleitet und mit Hilfe der entsprechenden FEP eindeutig beschrieben werden. Zielführend bei der Identifizierung dieser Freisetzungsszenarien war die Frage, ob und wie Lösungen mit den Abfällen in Kontakt treten können. Hintergrund der Überlegung war, dass dann Radionuklide aus den Abfällen freigesetzt und möglicherweise in die Biosphäre transportiert werden können. Die Wahrscheinlichkeit des Eintretens dieser Szenarien wurde nicht berücksichtigt. Die untersuchten Szenarien dienen ausschließlich der Prüfung des Instrumentariums.

In den Abbildungen 2.1 und 2.2 sind die für das jeweilige Szenario charakteristischen FEP dargestellt, die beim Ablauf der beiden gewählten Freisetzungsszenarien eine Rolle spielen. Diese Art der Darstellung ist in gewissem Maße willkürlich gewählt. Sie soll aber einen ersten Überblick über das jeweilige Szenario und insbesondere über die

Bedingungen für die Systemabläufe geben. So kann es beim Szenario „Versagen des Schachtverschlusses“ unter bestimmten Bedingungen zu einem Lösungszutritt in Einlagerungsfelder kommen, nachdem der Schachtverschluss versagt hat. Dabei wird dieser Vorgang in den meisten Fällen eine gewisse Zeit in Anspruch nehmen. Erst im Anschluss an den Lösungszutritt in ein Einlagerungsfeld kann es zu einer Freisetzung von Radionukliden aus den Abfällen kommen, die über den Quellterm beschrieben wird. Und erst wenn Radionuklide in Lösung vorliegen, kann es zu einem Transport der Radionuklide kommen. Jeder dieser vier hier aufgeführten FEP wird durch viele andere FEP beeinflusst oder verursacht.

Ähnliche Überlegungen gelten auch für das zweite hier beispielhaft behandelte Szenario „Lösungszutritt aus einem begrenzten Lösungseinschluss“. Hier kann aber das Einlagerungsfeld (z.B. ein Einlagerungsbohrloch) direkt betroffen sein, so dass es innerhalb einer erheblich kürzeren Zeitspanne nach dem Eintritt des Szenarios zu einer Freisetzung von Radionukliden aus den Abfällen kommen kann. Auch hier wird jeder der vier aufgeführten FEP durch viele andere FEP beeinflusst oder verursacht. Obwohl der generelle Szenarienablauf bei den beiden betrachteten Freisetzungsszenarien sehr ähnlich ist, können die relevanten Prozesse und zeitlichen Abfolgen im Einzelfall sehr unterschiedlich sein.

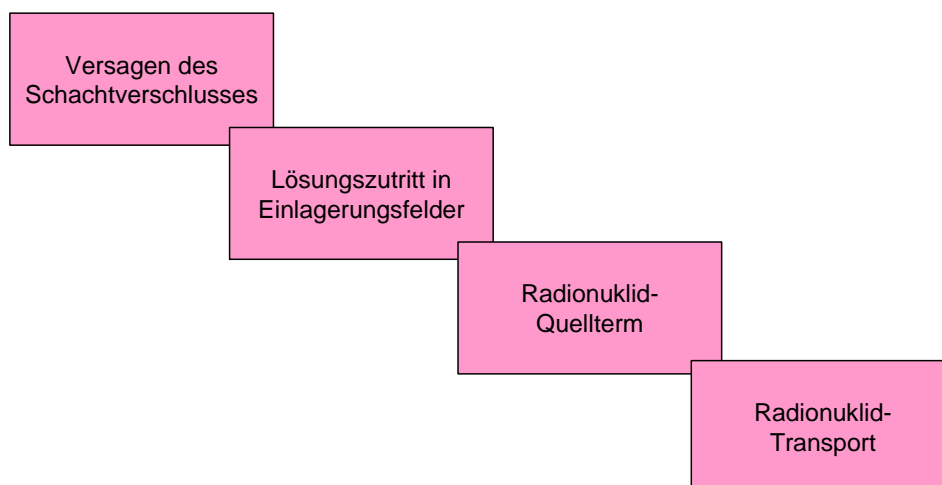


Abb. 2.1 Szenario „Versagen des Schachtverschlusses“: Ablaufschema der charakteristischen FEP

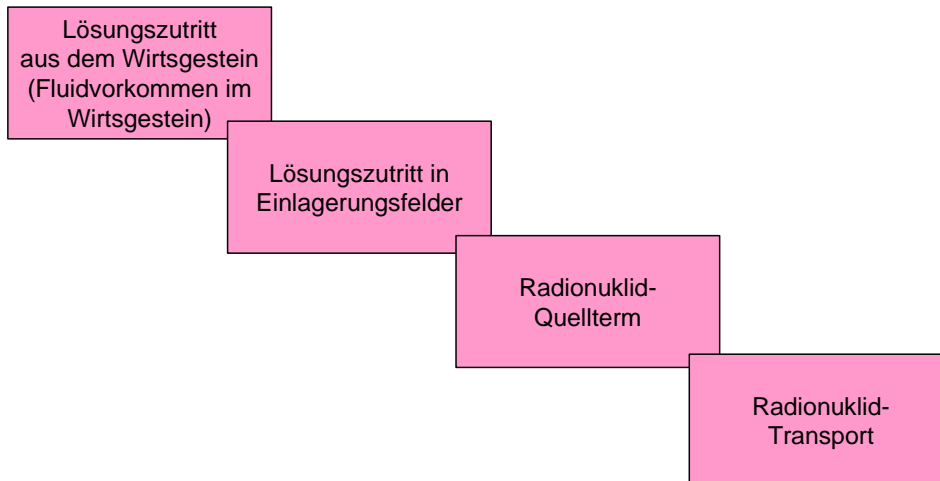


Abb. 2.2 Szenario „Lösungszutritt aus einem begrenzten Lösungseinschluss“:
Ablaufschema der charakteristischen FEP

Die FEP-Bezeichnungen weichen in den folgenden Abbildungen teilweise geringfügig von den Bezeichnungen im FEP-Katalog [18] ab, um die Lesbarkeit der Abbildungen zu verbessern, d.h. ohne auf die FEP-Liste zugreifen zu müssen. So ist zum Beispiel hier von einem Lösungszutritt in Einlagerungsfelder die Rede, während dieser FEP im FEP-Katalog unter Lösungszutritt in Grubenbaue subsumiert ist. Der Bezug zum FEP-Katalog ist aber immer gegeben, im Zweifelsfall sind die Namen des FEPs aus dem FEP-Katalog in Klammern angegeben. In manchen Szenarien sind zusätzlich Verallgemeinerungen gegenüber dem FEP-Katalog sinnvoll, z.B. wenn man sich nicht auf das Versagen einer technischen Barriere festlegen will und daher allgemein von den Eigenschaften einer technischen Barriere spricht (z.B. Abbildung 2.5). Im FEP-Katalog sind die technischen Barrieren detaillierter aufgeschlüsselt (z.B. Verschluss).

Die Darstellung der abgeleiteten Szenarien dient als ein Beispiel, es wäre sinnvoll, solche aus einem FEP-Katalog abgeleiteten Darstellungen von Szenarien zukünftig zu standardisieren.

In den folgenden Abbildungen sind die Prozesse, die die charakteristischen FEP in den Abbildungen 2.1 und 2.2 verursachen und beeinflussen, detaillierter aufgeschlüsselt: Das Gesamtszenario „Versagen des Schachtverschlusses“ ergibt sich aus den Abbildungen 2.3, 2.5, 2.7 und 2.8, das Szenario „Lösungszutritt aus einem begrenzten Lösungseinschluss“ aus den Abbildungen 2.4, 2.6, 2.7 und 2.8.

In diesen Abbildungen ist auch dargestellt, welche weiteren FEP die auslösenden FEP beeinflussen (grüne Pfeile) und welche FEP als Voraussetzung vorhanden sein müssen (rote Pfeile). Müssen zwei (oder mehr) Voraussetzungen für das Eintreffen eines anderen FEP gleichzeitig erfüllt sein, werden die entsprechenden Verbindungen zu einem Pfeil zusammengefasst. So müssen beispielsweise sowohl Wärmeleitung als auch radioaktiver Zerfall ablaufen, damit sich ein Temperaturgradient (Abbildung 2.3) einstellen kann. Gestrichelte Pfeile symbolisieren in den Abbildungen entweder eine Vielzahl weiterer FEP, die einen Einfluss auf diesen FEP haben und hier aus Übersichtlichkeitsgründen nicht dargestellt sind (Beispiel „Konvergenz“ in Abbildung 2.5) oder aber FEP, die insgesamt nicht näher spezifiziert werden (Beispiel: „Eigenschaften der zufließenden Lösung“ in Abbildung 2.5).

Ein Versagen des Schachtverschlusses ist bei entsprechender anforderungsgerechter Auslegung und Fertigung für einen mit der Auslegung kompatiblen Zeitraum nicht zu erwarten, es ist aber auch nicht vollständig auszuschließen. Für das Szenario „Versagen des Schachtverschlusses“ wurden vier auslösende FEP identifiziert (Abbildung 2.3):

- Fehlerhafte Erstellung des Verschlusses,
- Chemische Umlösung des Verschlusses (FEP Auflösung und Ausfällung),
- Spannungsumlagerungen,
- Transport über die Auflockerungszone (ALZ) um den Verschluss herum (FEP Umläufigkeiten).

Dabei ist das Auftreten der drei letztgenannten FEP über eine gewisse Zeit durch die bautechnische Auslegung des Verschlusses ausgeschlossen.

Analog zu Abbildung 2.3 sind in Abbildung 2.4 die beiden auslösenden FEP (Wandern des Lösungseinschlusses und Entstehen einer Wegsamkeit) für das Szenario „Lösungszutritt aus einem begrenzten Lösungseinschluss“ und die entsprechenden Beeinflussungen und Voraussetzungen dargestellt.

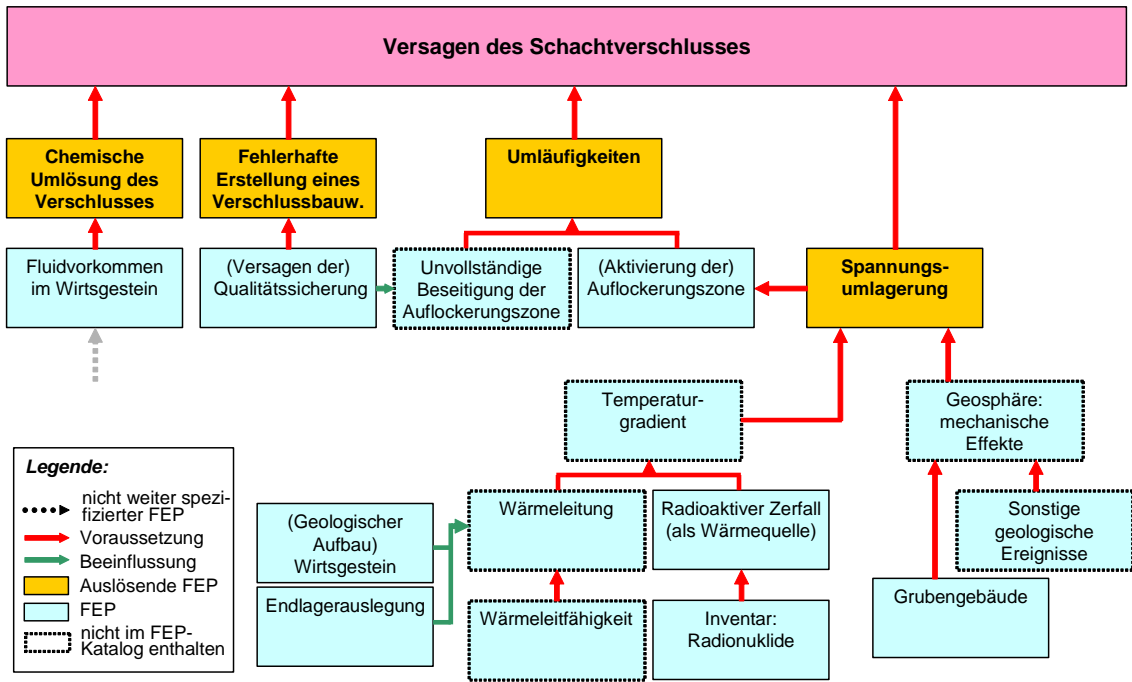


Abb. 2.3 FEP Versagen des Schachtverschlusses

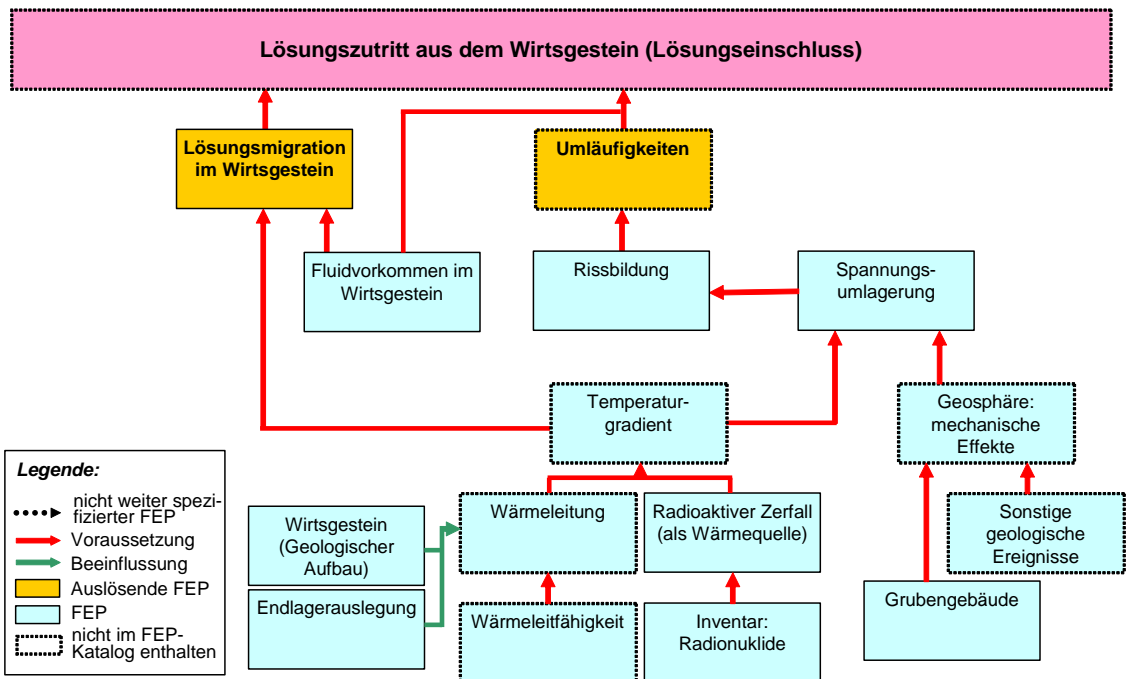


Abb. 2.4 FEP Lösungszutritt aus dem Wirtsgestein

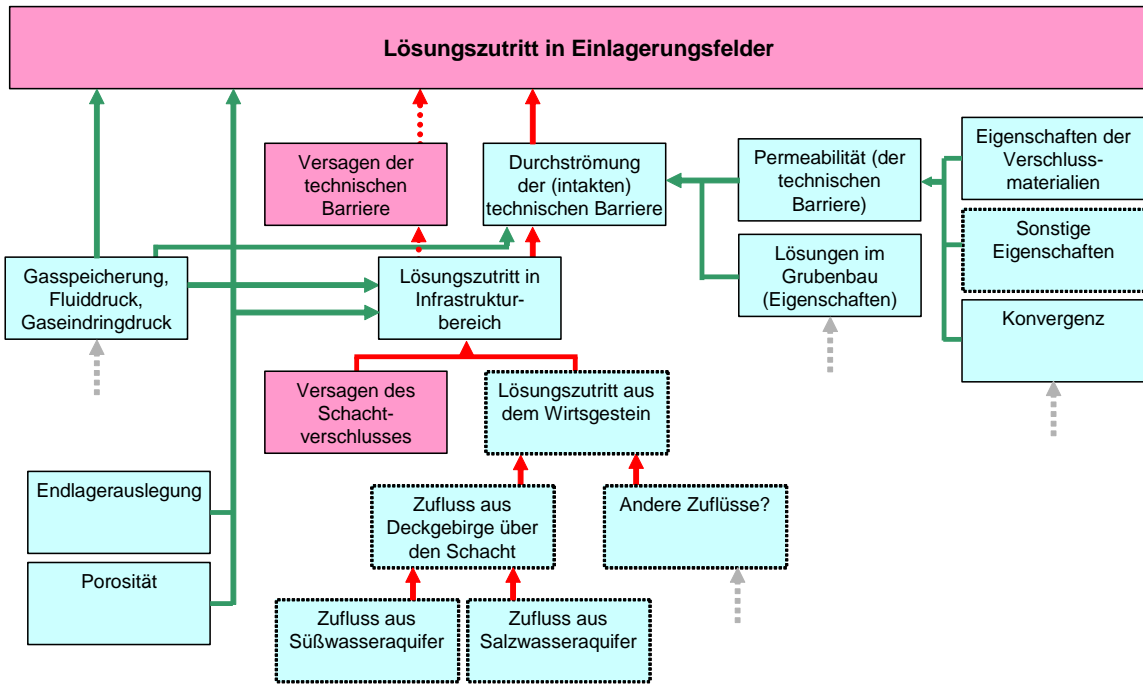


Abb. 2.5 FEP Lösungszutritt in Einlagerungsfelder (Szenario: Schachtversagen)

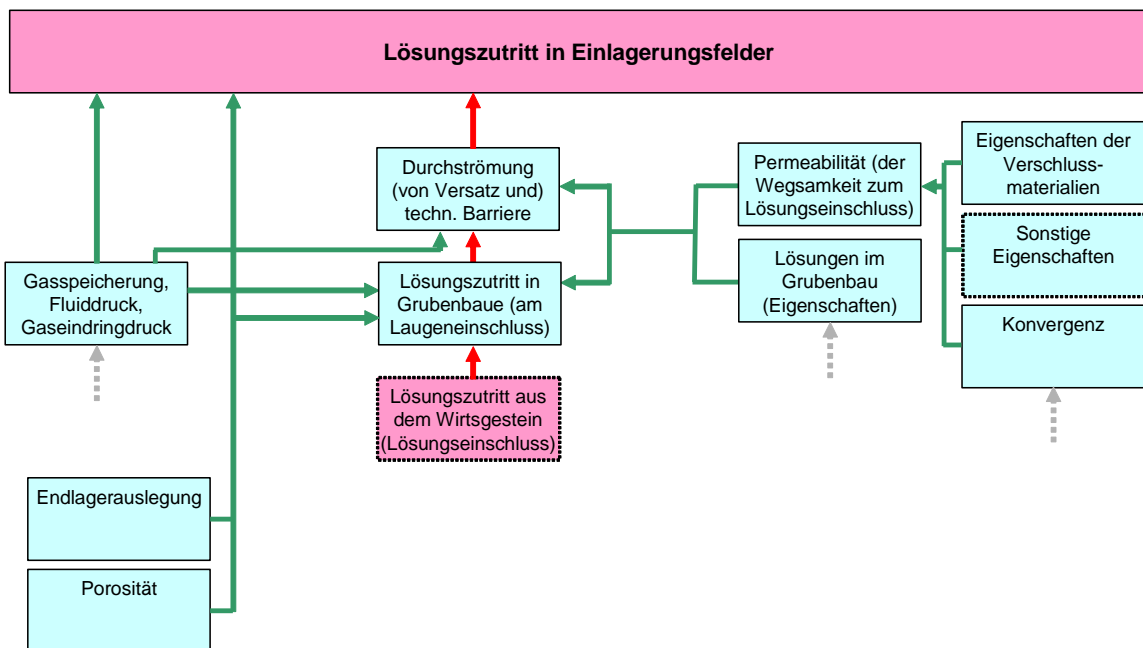


Abb. 2.6 FEP Lösungszutritt in Einlagerungsfelder (Szenario: Lösungszutritt aus Wirtsgestein)

Nach dem Eintreten des FEP „Versagen des Schachtverschlusses“ bzw. „Lösungszutritt aus einem begrenzten Lösungseinschluss“ laufen eine Vielzahl weiterer Prozesse ab, bis es zu einem Lösungszutritt in ein Einlagerungsfeld kommen kann (Abbildung 2.5 bzw. Abbildung 2.6). Nach dem Versagen des Schachtverschlusses wird zunächst der Infrastrukturbereich mit Lösung gefüllt. Zu einem Lösungszutritt in ein Einlagerungsfeld kommt es nur, wenn mindestens eine geotechnische Barriere (Verschlussbauwerk zwischen Infrastrukturbereich und Einlagerungsfeld) versagt oder eine genügend große Lösungsmenge durch die intakte geotechnische Barriere geströmt ist.

Das Aufteilen der Szenarien in die charakteristischen FEP hat den Vorteil, die FEP-Abhängigkeiten deutlich übersichtlicher zu machen. Weitere Übersichtlichkeit gewinnt man, indem man FEP zusammenfasst: In den Abbildungen 2.9 und 2.10 ist dargestellt, wie sich die in den vorstehenden Abbildungen gestrichelt eingezeichneten Verknüpfungen bei den FEP „Konvergenz“ und „Gasbildung“ weiter aufschlüsseln.

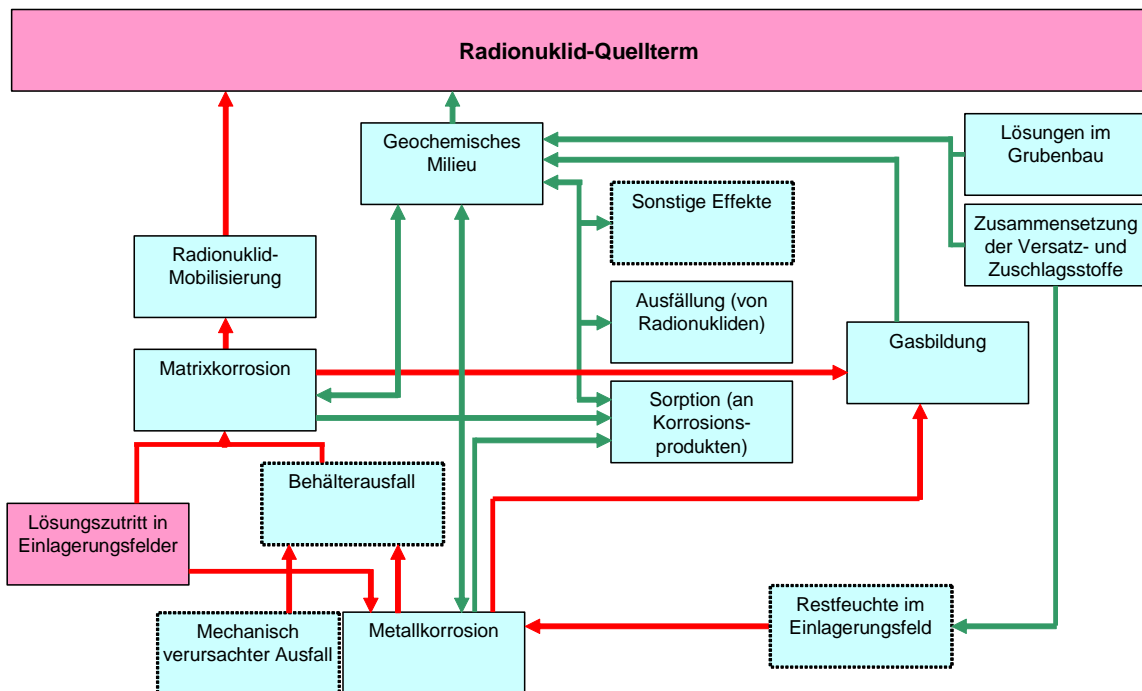


Abb. 2.7 FEP Radionuklid-Quellterm

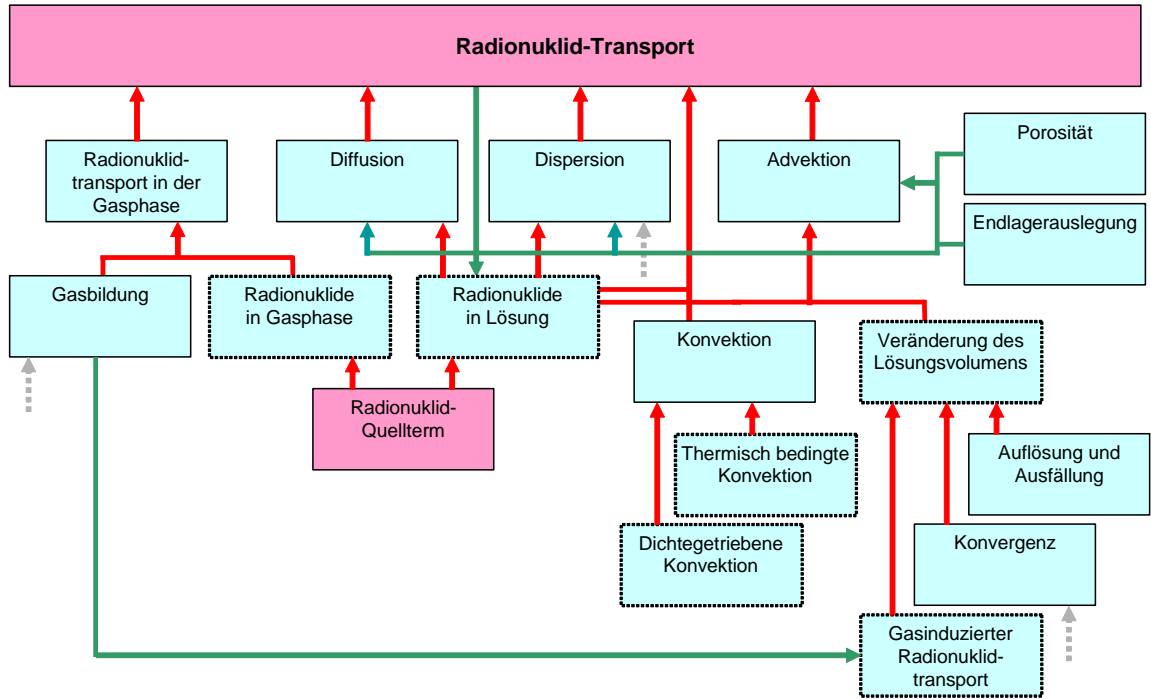


Abb. 2.8 FEP Radionuklid-Transport

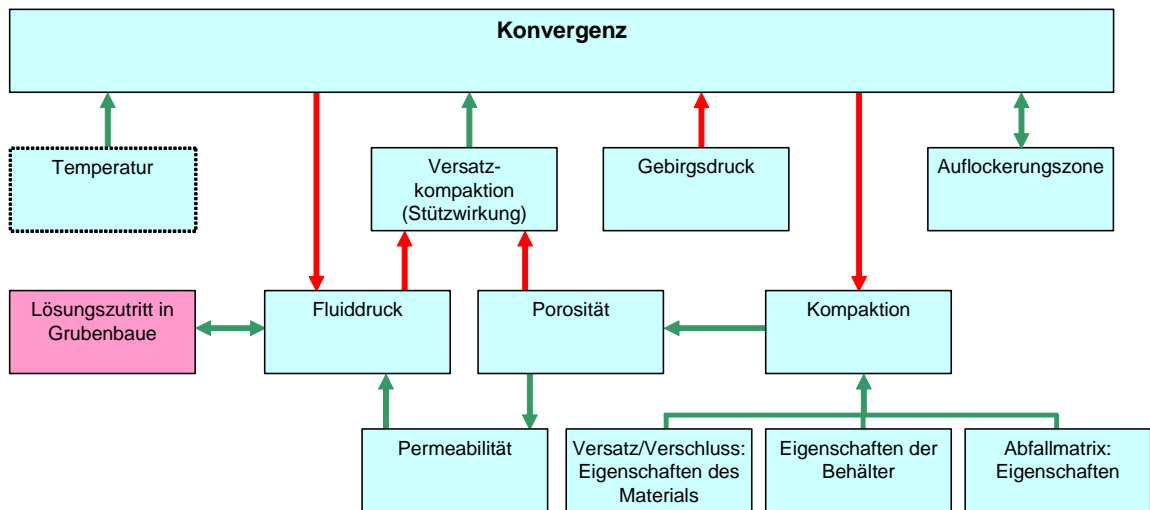


Abb. 2.9 FEP Konvergenz

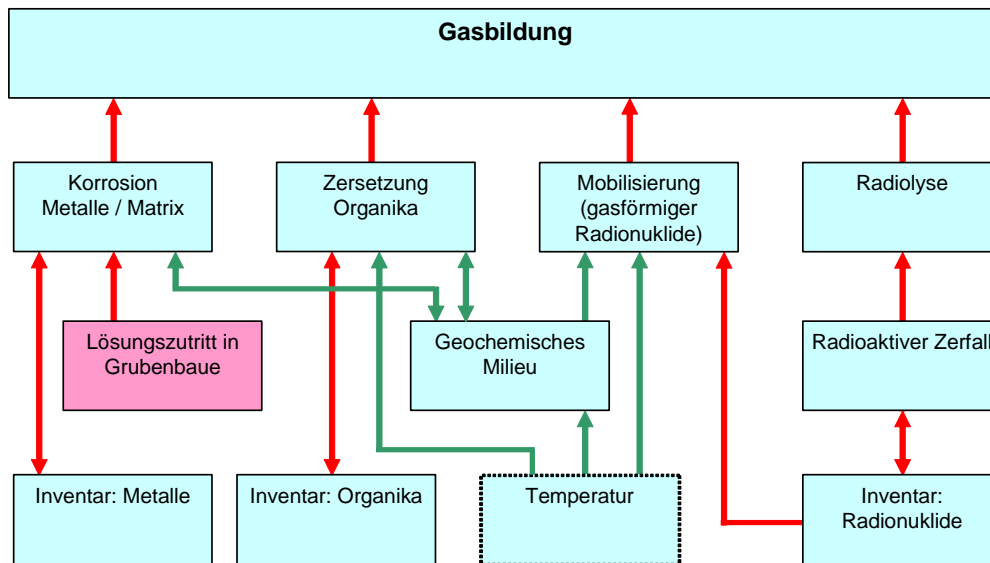


Abb. 2.10 FEP Gasbildung

2.2 Betrachtete FEP und Szenarien

Im Folgenden wird dargestellt, welche Szenarien im Rahmen des Vorhabens ISIBEL untersucht worden sind.

Das Referenzszenario beschreibt die ungestörte Entwicklung des Endlagersystems und wird als Regelfall betrachtet. Hierfür gelten die folgenden Annahmen: Bei einem Endlager im Salzgestein wie beim Referenzstandort treten keine Wegsamkeiten im Wirtsgestein auf, so dass kein Lösungszutritt von außen erfolgt. Durch entsprechende Erkundung wird sichergestellt, dass Lösungseinschlüsse im Wirtsgestein nicht angetroffen werden bzw. sich bei der Auffahrung der Grubenbaue entleeren. Alle Verschlussbauwerke entsprechen ihren Spezifikationen. In den Modellrechnungen wird die Lebensdauer der Bauwerke größer als die Modellzeit angenommen; die Referenzpermeabilität für alle Verschlussbauwerke wird mit einem realistischen Wert von 10^{-17} m^2 angesetzt.

In den hier betrachteten Freisetzungsszenarien, bei denen ein Versagen des Schachtverschlusses unterstellt wird, wird beispielhaft angenommen, dass dieses Versagen nach 50 Jahren eintritt; prinzipiell sind auch andere Zeitpunkte für diesen Versagenszeitpunkt möglich. Die Permeabilität wird an diesem Zeitpunkt auf den für das Szenario gewählten Wert erhöht. Aus modelltechnischen Gründen wird der Schachtverschluss

für die ersten 50 Jahre als vollkommen undurchlässig angenommen, dann wird die Permeabilität des Verschlusses instantan auf den entsprechenden Wert des Szenarios erhöht. Um das Referenzszenario mit den Freisetzungsszenarien vergleichen zu können, gilt die gleiche Vorgehensweise auch im Referenzszenario, d.h. erst nach fünfzig Jahren wird die Referenzpermeabilität für den Schachtverschluss angesetzt. Alle weiteren Eingangsdaten und zugewiesenen Parameter sind im Kapitel 3.2.3 angegeben.

Aufbauend auf dem Referenzszenario werden in ISIBEL – unabhängig von einer Eintrittswahrscheinlichkeit – die folgenden Freisetzungsszenarien betrachtet:

- Versagen des Schachtverschlusses nach 50 Jahren,
- Versagen der Streckenverschlüsse zwischen Infrastrukturbereich und restlichen Grubenbauen nach 50 Jahren,
- Gemeinsames Versagen des Schachtverschlusses und der Streckenverschlüsse,
- Sofortiger Zutritt von Lösungen aus begrenzten Lösungseinschlüssen im Wirtsgestein,
- Szenarien, in denen die vorstehenden Ereignisse miteinander kombiniert wurden.

Die für diese Szenarien relevanten FEP sind in dem im Rahmen des Projektes ISIBEL entstandenen FEP-Katalog [18] enthalten.

Weitere Szenarien, wie die ungestörte Entwicklung des Endlagersystems am Referenzstandort oder Subrosion wurden nicht im Detail untersucht, weil sie zu keiner Freisetzung von Radionukliden im Betrachtungszeitraum von 1 Million Jahren führen. Dabei wird vorausgesetzt, dass am Referenzstandort die Subrosionsraten so klein sind, dass dieses Szenario auszuschließen ist. Einige Freisetzungsszenarien wurden nicht detailliert untersucht, weil noch keine Werkzeuge für die Sicherheitsbewertung vorhanden sind, oder weil die Szenarien noch nicht abschließend definiert worden sind. Zu nennen ist in diesem Zusammenhang die Freisetzung gasförmiger Radionuklide nach einem durch mechanische Einwirkung verursachten Ausfall von Brennstabkorkillen.

2.3 Menschliche Einwirkungen

Zukünftige menschliche Handlungen können Szenarien auslösen oder beeinflussen, die zu einer Freisetzung von Radionukliden führen. Sie müssen deshalb bei der Ent-

wicklung entsprechender Szenarien und damit bei der Beurteilung der Sicherheit eines Endlagerstandortes berücksichtigt werden. Problematisch ist die fehlende wissenschaftliche Grundlage bei der Voraussage zukünftiger Handlungen des Menschen. Aus diesem Grund müssen die Einwirkungen des Menschen auf ein Endlager gesondert behandelt werden. Dies geschieht durch Festlegung sinnvoller Szenarien, sogenannter stilisierter Szenarien. Basis für diese Szenarien ist der heutige Stand der gesellschaftlichen und technischen Entwicklung. Begründbare Eintrittswahrscheinlichkeiten können für diese Szenarien aus den genannten Gründen nicht gegeben werden.

Ein wichtiger Aspekt für die Entwicklung der stilisierten Szenarien ist die Beschränkung auf nicht beabsichtigte menschliche Handlungen. Sind das Endlager und die von ihm ausgehenden Gefahren bekannt, liegen beabsichtigte Handlungen, die die Funktion des Endlagers beeinflussen, in der Verantwortung des handelnden Personenkreises. Das gilt auch für Aktivitäten, die einen positiven Effekt haben, wie beispielsweise die nachträgliche Sanierung eines Endlagers.

Die folgenden drei stilisierten Szenarien sind für einen Endlagerstandort im Salz im Wesentlichen diskutiert worden ([13], [14], [39]):

- **Erkundungsbohrung:** Bohrungen in das Wirtsgestein zur Erkundung abbauwürdiger Salzvorkommen können die Barrierewirkung des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs beeinträchtigen und gegebenenfalls die Einlagerungsbereiche treffen. Auch bei einer Entdeckung des Endlagers bleiben die Gefahr einer nicht ausreichend undurchlässigen Verfüllung des Bohrloches und damit ein möglicher Transportpfad für Radionuklide aus dem Endlager an die Erdoberfläche.
- **Salzabbau (trocken):** Die direkte Entnahme kontaminierter Salze kann zu einer Freisetzung von Radionukliden führen. Die zu erwartenden radiologischen Konsequenzen wären wahrscheinlich höher als beim Szenario „Erkundungsbohrung“, die Wahrscheinlichkeit der Entdeckung des Endlagers allerdings auch.
- **Salzabbau (nass) / Nutzung als Speichergestein:** Das Salz wird durch Lösung mittels Wasser im Untergrund aufgelöst. Einerseits wird aus der Sole an der Oberfläche Salz gewonnen. Die direkte Entnahme kontaminierter Solen kann dann zu einer Freisetzung von Radionukliden führen. Eine Entdeckung des Endlagers ist unwahrscheinlicher als beim direkten Salzabbau. Andererseits können die im Salz entstandenen Hohlräume zur Gas- oder Erdölbevorratung genutzt werden. Bei einer späteren Flutung der Kaverne kann kontaminierte Salzlösung in das Deck-

gebirge freigesetzt werden und in den Nahrungskreislauf des Menschen gelangen. Dieses Szenario wird ausführlich in [13] behandelt.

In [2] wurden diese Szenarien aktualisiert und noch ein weiteres Szenario „Gewinnung geothermischer Energie“ hinzugefügt. Da alle Szenarien mit dem Szenario „Erkundungsbohrung“ beginnen, erhält dieses Szenario in [2] ein besonderes Gewicht, und der heutige Stand von Wissenschaft und Technik wird für dieses Szenario dargestellt. Aus diesen Untersuchungen werden relevante Fallunterscheidungen aufgestellt und analysiert, welche Fälle am Standort keine Relevanz haben, durch eine Nachweisführung des Antragsstellers auszuschließen oder definitiv zu behandeln sind. Für die dann folgenden Szenarien (Salzabbau (trocken und nass), geothermische Energiegewinnung) müssen solche Arbeiten noch durchgeführt werden.

All diese Szenarien beruhen auf der Tatsache, dass das Wirtsgestein in der Vergangenheit und Gegenwart eine gewinnbringende Ressource dargestellt hat und dies auch künftige Generationen dazu veranlassen könnte, auf diesen Rohstoff zurückzugreifen. Bei der Analyse der Konsequenzen aus diesen Szenarien steht dabei die mögliche Strahlenexposition der allgemeinen Bevölkerung im Blickpunkt, die Strahlenbelastung der Bohrmannschaften und Bergleute wird als Berufsrisiko angesehen und in den Szenarien meist vernachlässigt.

Auf Grund ihres spekulativen Charakters sollten diese Szenarien nicht direkt bei der Analyse der Langzeitsicherheit berücksichtigt werden. Stattdessen sollten sie auf der Grundlage von regulatorischen Vorgaben bei der Standortauswahl sowie bei der Konzeption und Auslegung des Endlagers berücksichtigt werden.

2.4 Berücksichtigung von natürlichen Analoga

Natürliche Analoga können unter Anderem dazu beitragen, bislang nicht berücksichtigte FEP zu identifizieren, FEP zu bewerten, ob sie in der Natur eine wichtige Rolle spielen oder nicht, und die Vollständigkeit der wesentlichen Prozesse eines konzeptuellen Modells sowie Plausibilität und Realitätsnähe der Modellannahmen zu beurteilen.

Im Rahmen von Sicherheitsanalysen für Endlager im Salinar sind natürliche Analoga bisher nur wenig berücksichtigt worden. Sie können aber generell einen wichtigen Beitrag zu den Themen Radionuklidrückhaltung im Nahbereich, Barrierefunktion des

Salzgebirges und Radionuklidrückhaltung im Deckgebirge leisten, wie es der deutsche Expertenkreis „Natürliche Analoga“ formuliert hat [38].

Die Barrierefunktion des Salzgebirges spielt eine zentrale Rolle im Sicherheitsnachweis. Daher sind natürliche Analoga, die diese Funktion betreffen, von großer Bedeutung und daher Thema der meisten Studien zu natürlichen Analoga bezüglich Salzgestein. Untersuchungen an Gas- und Lösungseinschlüssen in Salzformationen zeigen, dass unter der Voraussetzung einer geringen tektonischen Beanspruchung der Formation der innere Bereich des Salzstocks nicht mit externen Lösungen in Wechselwirkung getreten ist und dass er selbst für Gase eine effiziente Barriere darstellt [27]. Diese Studien untermauern generell die Langzeitintegrität von Salzstöcken.

Zum Verständnis der Langzeitverheilung von Rissen und bruchhaften Verformungen liegen unterschiedliche Ergebnisse vor, je nachdem, ob versetzte Hohlräume oder Hohlräume mit einer Stahlummantelung betrachtet werden. Untersuchungen, wie die am Dammjoch, einer vor ca. 100 Jahren aufgefahrenen und mit Stahlmantel ausgekleideten Strecke in der Asse zeigen, dass die Permeabilität der Auflockerungszone dort 90 Jahre nach Auffahrung auf Werte von 10^{-19} m^2 reduziert worden ist [4]. Solche Ergebnisse lassen sich beispielsweise auf Bohrlöcher mit eingelagerten Stahlkokillen, die eine ähnlich Stützwirkung wie eine Stahlummantelung aufweisen, übertragen. Die Permeabilität der Auflockerungszone einer zum gleichen Zeitpunkt aufgefahrenen, aber nicht ausgekleideten Strecke, weist jedoch heute noch eine um drei bis vier Größenordnungen höhere Permeabilität auf. Mikrostrukturuntersuchungen an Kernen der ausgekleideten Strecke deuten darauf hin, dass die existierenden Mikrorisse weitgehend verschlossen, aber nicht vollständig verschwunden sind. Eine vollständige Verheilung der Auflockerungszone um eine aufgefahrene Strecke lässt sich aus diesen Analoga also im Allgemeinen nicht ableiten.

Zum Verständnis des Langzeitverhaltens von Radionukliden im Fernfeld des Endlagers können Untersuchungen zum Verhalten von Uran und Thorium in typischen tertiären tonig/sandigen Sedimenten vom Standort Ruprechtov in Tschechien herangezogen werden. Uran wurde dort in lignitreichen Sedimenten an Arsen-angereicherten Oberflächenschichten von Pyritknollen reduziert. Die Untersuchungen zeigen dabei den wichtigen Einfluss mikrobieller Aktivität wie Sulfat reduzierender Bakterien [30].

2.5 Verfahren zur Ermittlung weiterer Szenarien

Für die Ermittlung weiterer möglicher Szenarien und Szenariengruppen kann auf das PROSA-Verfahren [31] zurückgegriffen werden. Dabei werden aus vorhandenen Szenarien durch Vergleich mit noch nicht berücksichtigten FEP potenzielle Szenarien identifiziert. Beispielsweise ist es prinzipiell möglich, dass das FEP „externe Bohrung“ in Verbindung mit einem Anhydrit-Vorkommen zu einer zusätzlichen Wegsamkeit zwischen Grubengebäude und Deckgebirge führt, siehe Abbildung 2.11. Analog wie beim Szenario „Versagen des Schachtverschlusses“ sind dann alle FEP zu identifizieren, die die Wegsamkeit und den Transport der Radionuklide zwischen dem Grubengebäude und dem Deckgebirge beschreiben.

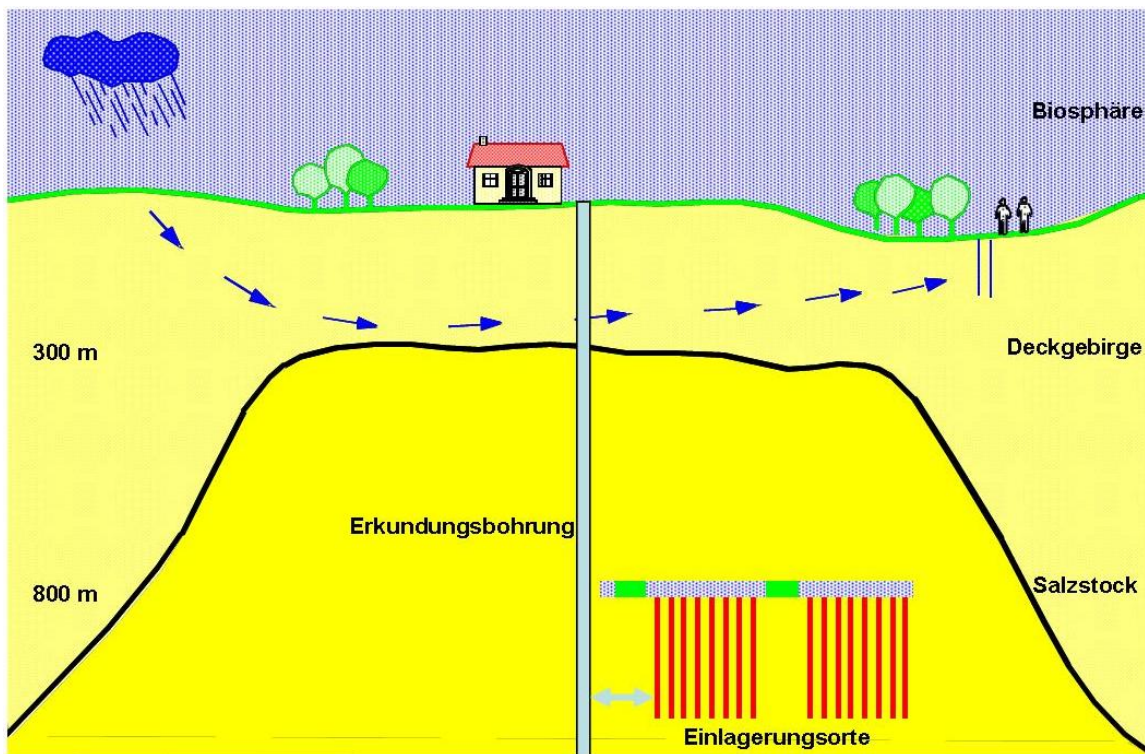


Abb. 2.11 Externe Bohrung und eventuelle Verbindung zum Einlagerungsbereich

3 **Untersuchung von Freisetzungsszenarien**

Die in Kapitel 2 aufgeführten Freisetzungsszenarien werden verwendet, um das vorhandene Instrumentarium für eine Sicherheitsbewertung zu testen. Im Folgenden werden die vorhandenen Rechenprogramme und Modelle dargestellt, die Eingangsdaten für die durchgeführten Rechnungen zusammengestellt und die Ergebnisse der Rechnungen vorgestellt. Um aus den Modellergebnissen eine Bewertung der Sicherheit, d.h. die Einhaltung der definierten Schutzziele, ableiten zu können, ist es notwendig, die Ergebnisse in geeignete Bewertungsgrößen zu überführen und mit geeigneten Referenzwerten zu vergleichen. Dies geschieht mit Hilfe von Indikatoren.

3.1 **Sicherheits- und Funktionsindikatoren**

Im EU-Projekt SPIN [5] wurde die Anwendbarkeit von Indikatoren für Endlager im Hartgestein untersucht, für Endlager im Salzgestein liegen bislang keine Ergebnisse vor. Im Forschungsprojekt WIGRU [36] werden jedoch parallel zu dem vorliegenden Projekt Indikatoren für Ton- und Salzgesteine untersucht, bzw. deren Anwendbarkeit in Sicherheitsanalysen bewertet. Es werden grundsätzlich zur Bewertung eines Endlagersystems zwei Typen von Indikatoren herangezogen:

- **Sicherheitsindikatoren** werden zum Nachweis der Einhaltung radiologischer Schutzziele eingesetzt. Sie beziehen die Beiträge aller relevanten Radionuklide mit ein und erlauben eine integrale Bewertung der Sicherheit des Endlagersystems. Ein Sicherheitsindikator stellt eine Bewertungsgröße (z.B. die jährliche individuelle Strahlenexposition) in Verbindung mit einem radiologischen Schutzziel dar. Es können demnach aus einer Bewertungsgröße und zwei verschiedenen definierten Schutzzielen zwei unabhängige Sicherheitsindikatoren resultieren.
- **Funktionsindikatoren** (Performance-Indikatoren) bewerten die Funktionsfähigkeit von Teilsystemen und Komponenten des Endlagersystems. Sie müssen keinen radiologisch begründeten Referenzwert einhalten. Es können auch Funktionsindikatoren (z.B. der Zeitpunkt des Beginns der Freisetzung von Lösung aus dem Grubengebäude) ohne Referenzwerte definiert werden, um Konsequenzen verschiedener Szenarien zu vergleichen.

Für die Untersuchungen im vorliegenden Projekt wurden insgesamt die folgenden Indikatoren ausgewählt:

- Sicherheitsindikatoren:
 - Jährliche individuelle Strahlenexposition (zusätzlich der Zeitpunkt der maximalen jährlichen individuellen Strahlenexposition),
- Funktionsindikatoren:
 - Konzentrationen von ausgewählten Radionukliden im oberflächennahen Grundwasser,
 - Konzentrationen von Uran und Thorium in der Lösung, die aus dem Grubengebäude ausgepresst wird,
 - relative Freisetzung von Radionukliden aus dem Grubengebäude (bezogen auf das eingelagerte Inventar),
 - jährliche individuelle Strahlenexposition, die sich aus dem Aktivitätsstrom aus dem Grubengebäude, dem jährlichen Wasserverbrauch einer Population von 30 Personen sowie den Dosiskonversionsfaktoren wie bei der Berechnung des Sicherheitsindikators ergibt,
 - Zeitpunkt des Beginns der Freisetzung von Lösung aus dem Grubengebäude,
 - Menge der ausgepressten Lösung.

Einige dieser Indikatoren werden auch im Entwurf der GRS [3] für die Sicherheitsanforderungen eines Endlagers hochaktiver Abfälle vorgeschlagen, sind aber noch in kontroverser wissenschaftlicher Diskussion bezüglich ihrer Anwendbarkeit [7].

Jede Funktion des Endlagersystems, die bei der Erfüllung der Sicherheitsanforderungen eine Rolle spielt, wird als **Sicherheitsfunktion** bezeichnet. Sicherheitsfunktionen spielen eine wichtige Rolle bei der Dokumentation der Sicherheit eines Endlagers. Die Isolation der Radionuklide wird in ISIBEL als primäre Sicherheitsfunktion angesehen. Wenn die Isolation gegeben ist, dann sind auch die radiologischen Schutzziele eingehalten. Alle Bewertungsgrößen einer Sicherheitsfunktion, für die Referenzwerte, z.B. technische oder radiologische Kriterien, definiert werden können, werden als **Sicherheitsfunktionsindikatoren** bezeichnet. Einige der in ISIBEL angewendeten Indikatoren könnten unter diesem Gesichtspunkt auch als Sicherheitsfunktionsindikatoren an-

gesehen werden. Die Diskussion um die Abgrenzung der Begriffe ist aber noch nicht abgeschlossen, daher werden in ISIBEL nur die Begriffe Sicherheitsindikatoren und Funktionsindikatoren angewandt.

3.2 Konzept- und Modellentwicklung

Das Konzept zur Bewertung der radiologischen Konsequenzen von gestörten Entwicklungen des Endlagersystems wurde in Anlehnung an bereits durchgeführte Langzeitsicherheitsanalysen, wie beispielsweise in [9] dargestellt, entwickelt. Das Vorgehen ist gegliedert in

- Entwicklung freisetzung relevanter Szenarien, beispielsweise anhand auslösender FEP,
- Zusammenstellung der für das Szenario relevanten FEP,
- Prüfung der Szenarien auf Vollständigkeit,
- Auswahl der für den Sicherheitsnachweis geeigneten Rechenprogramme,
- Anpassung von Modellen und Rechenprogrammen an standortspezifische Gegebenheiten,
- Ermittlung aller Eingangsdaten,
- Untersuchung, ob die Eingangsdaten abdeckend sind,
- Durchführung deterministischer und probabilistischer Rechnungen,
- Untersuchung der Robustheit des Ergebnisses,
- Bewertung von Unsicherheiten.

Die im vorliegenden Bericht betrachteten FEP und Freisetzungsszenarien sind in Kapitel 2 behandelt. Eine Prüfung auf Vollständigkeit der Szenarien hat im Rahmen von ISIBEL nicht stattgefunden. Die verwendeten Rechenprogramme (Module) wurden aus dem Programmpaket EMOS [10] ausgewählt. EMOS ist ein modulares Programmpaket, bestehend aus verschiedenen miteinander verknüpfbaren Programmmodulen für die Vorgänge in einem Endlagernahbereich, im Deckgebirge und in der Biosphäre. Das Endlagerkonzept wird im EMOS-Nahfeldmodul LOPOS in vereinfachter Form unter Beibehaltung der wesentlichen Kenngrößen in einer Segmentstruktur abgebildet.

Die einzelnen Segmente repräsentieren jeweils Abschnitte von Schächten, Zugangs-, Beschickungs- und Einlagerungsstrecken oder Bohrlöchern. Alle relevanten physikalisch-chemischen Prozesse, wie z.B. Hohlraumverringern und Salzgruskompression durch Konvergenz des Salzes, Radionuklidmobilisierung aus den Abfällen, Ausbreitung von Salzlösung ggf. mit Transport von Radionukliden, Diffusion von Radionukliden in einer Lösung, sind in den jeweiligen Segmenten modelltechnisch verankert und werden in ihrer Gesamtheit unter Berücksichtigung sich ändernder Temperatur- und Druckrandbedingungen modelliert.

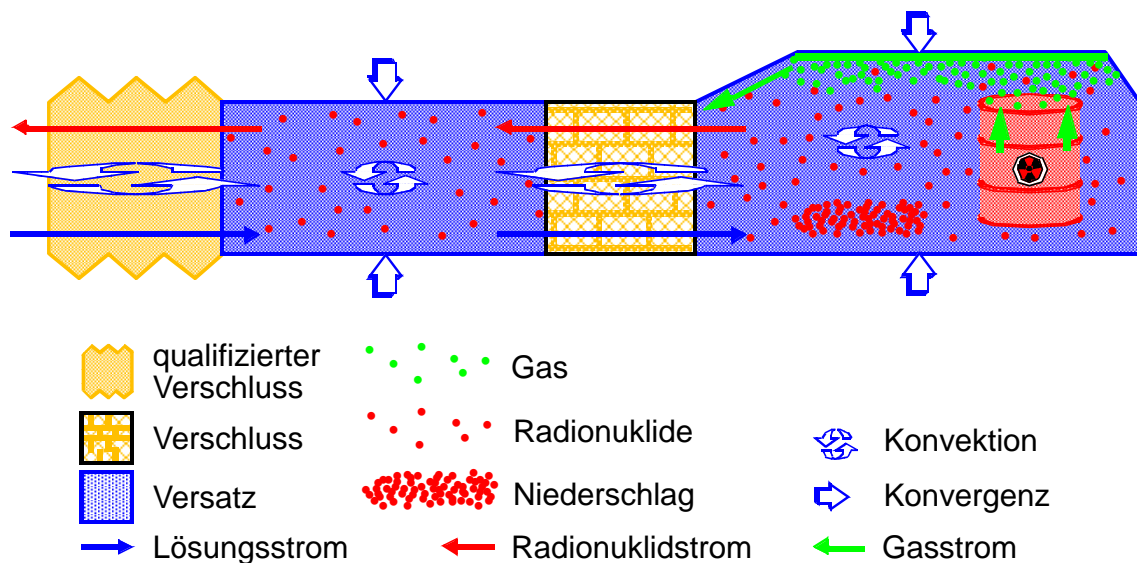


Abb. 3.1 Berücksichtigte Prozesse bei der Konsequenzenanalyse mit LOPOS

Die Anpassungen der in diesen Rechenprogrammen verwendeten Modelle und Rechenroutinen wird im Folgenden dargestellt. In Kapitel 3.3 werden die verwendeten Eingangsdaten zusammengestellt und die durchgeführten Rechnungen beschrieben. Eine Bewertung von Unsicherheiten und die Erstellung eines Safety Case waren nicht Thema von ISIBEL.

Nach internationalem Verständnis ist vom Antragsteller eine umfassende Begründung der Sicherheit eines Endlagers an einem gegebenen Standort zu liefern. Dazu werden in einem Safety-Case-Bericht neben einer Bewertung der Ergebnisse aller Modellrechnungen unter Berücksichtigung der Unsicherheiten zusätzliche qualitative Argumente aufgeführt. Im Rahmen von ISIBEL war die Erstellung eines entsprechenden Berichtes nicht vorgesehen.

3.2.1 Beschreibung der Segmentmodelle

Zur Durchführung einer Konsequenzenanalyse zur Bewertung der Langzeitsicherheit eines Endlagers wird das zu modellierende Grubengebäude geeignet in Modellsegmente aufgeteilt, z.B. in Bohrlöcher, Kammern und Strecken. Grundlage dieser Aufteilung ist die jeweilige geometrische Anordnung der Grubenbaue des Endlagerbergwerks im Zusammenspiel mit weiteren Randbedingungen. Hierbei können gleichartige Teilbereiche des Grubengebäudes zu einem Modellsegment zusammengefasst werden, z.B. parallele Strecken oder benachbarte Bohrlöcher. Einzelheiten zur Vorgehensweise und zur Bedeutung der im Folgenden auftretenden Variablenbezeichnungen sind der Beschreibung des Nahfeldmoduls LOPOS zu entnehmen [15]. In Kapitel 3.2.3 wird die für das hier betrachtete Grubengebäude modellierte Segmentstruktur beschrieben.

3.2.1.1 Die Segmentmodelle

In jedem Segment eines Grubengebäudes laufen physikalische und chemische Vorgänge ab. Die für die Freisetzung und den Transport von Radionukliden wesentlichen Prozesse werden durch Modelle abgebildet, die ein wesentlicher Bestandteil der Segmentmodelle sind. Segmentmodelle dienen also der Beschreibung der physikalischen und chemischen Vorgänge in ihrer zeitlichen Entwicklung in einem einzelnen Segment, beispielsweise die zeitliche Entwicklung der Konvergenz, die zeitliche Volumenänderung des Segments durch Konvergenz, die Mobilisierung aus den Abfallgebänden oder die Gasbildung. Im Einzelnen wurden die folgenden Effekte betrachtet (zur Bewertung der Modelle und des F+E-Bedarfs siehe Kapitel 4):

Nahfeldmodule:

- Lösungsbewegung inklusive Lösungszutritt in das Grubengebäude.
- Mobilisierung von Radionukliden aus Abfallgebänden inklusive Behälterausfall.
- Rückhaltung von Radionukliden durch Löslichkeitsgrenzen und Sorption.
- Transport von Radionukliden durch Advektion, Konvektion, Dispersion und Diffusion.
- Gasbildung.
- Gasausbreitung.

- Gebirgskonvergenz.
- Permeabilitäts-Porositäts-Beziehung für kompaktierbaren Versatz.
- Temperaturentwicklung.
- Radioaktiver Zerfall.

Fernfeldmodule:

- Transport von Radionukliden durch Advektion, Konvektion, Dispersion und Diffusion.
- Rückhaltung von Radionukliden durch Sorption.
- Radioaktiver Zerfall.

Segmentmodelle wurden für eine Reihe von Segmenttypen entwickelt, die dann jeweils für jedes Segment dieses Typs verwendet werden können. Somit können Grubengebäude, die zum Beispiel in mehrere hundert Segmente untergliedert wurden, durchaus mit wenigen unterschiedlichen Segmentmodellen beschrieben werden. Unterschiedliche Vorgänge in den Segmenten können dabei durch segmentspezifische Parameterzuweisungen berücksichtigt werden.

Die Teufenlage eines Segments wird durch die Angabe des Abstands des Mittelpunktes zur sogenannten Referenztiefe (Teufenlage eines Referenzniveaus) festgelegt. Jedem Segment (im Folgenden durch den Index k charakterisiert) wird ein geeignetes Segmentmodell zugewiesen. Im Folgenden werden die in den Rechnungen für ISIBEL verwendeten und teilweise neu erstellten Segmentmodelle beschrieben. Im Anhang sind Details für diese Segmentmodelle zusammengestellt. Die Bedeutung und die Position der nachfolgend aufgeführten Modellparameter RBTY (Segmentspezifische Zeitpunkte) und RBEY (segmentspezifische Daten, wie beispielsweise Geometrie, Porosität und Permeabilität) sind der Beschreibung der Eingangsdaten im Anhang und [15] zu entnehmen. Die Eingabe dieser Parameterwerte erfolgt in der segmentspezifischen Eingabedatei von LOPOS, siehe [15].

Die Zuordnung der passenden Segmentmodelle zu den Segmenten geschieht durch Angabe des Namens des Segmentmodells in der segmentspezifischen Eingabedatei [15]. In den Streckensegmentmodellen kann ein beliebig großes Zusatzvolumen definiert werden, das Flüssigkeit und Radionuklide aufnehmen kann, aber nicht zum Strömungswiderstand beiträgt. Jedes Zusatzvolumen kann kompaktierbares Versatzmate-

rial enthalten. In diesem Fall muss eine Versatzporosität < 1 angegeben werden. Die Einführung eines Zusatzvolumens dient der Modellierung von Strömungskanälen in einem Segment. Der advective Transport von Radionukliden erfolgt dann durch das um das Zusatzvolumen verringerte Segmentvolumen. Die Radionuklidkonzentration berechnet sich jedoch aus dem Gesamtvolumen.

Die derzeit in der Modellierung für das Grubengebäude verwendeten Segmentmodelle sind nachfolgend zusammengestellt, siehe auch die Beschreibung der Segmentstruktur in Kapitel 3.2.3. Zu einem großen Teil wurden diese Modelle im Rahmen von ISIBEL überarbeitet und ihr Funktionsspektrum erweitert. Die Bezeichnung der Segmentmodelle richtet sich nach der folgenden Konvention: Horizontal orientierte Segmente werden mit Modellen beschrieben, deren Namen mit H beginnen, vertikal orientierte Segmente werden mit Modellen beschrieben, deren Namen mit V beginnen. Der 2. und der 3. Buchstabe im Namen charakterisieren das Segmentmodell, der 4. Buchstabe gibt die Form des Segments an, im 5. Buchstabe steht K für konvergierend, N für nicht konvergierend oder V für ein Segment mit Verschluss. Die abschließende Ziffer gibt die Entwicklungsstufe des Segmentmodells wieder. Ein Buchstabe N an dieser Stelle besagt, dass in diesen Segmentmodellen spezielle Modifikationen bestehender Modelle oder Neuentwicklungen gegenüber [15] vorgenommen wurden (Abbildung 3.2).

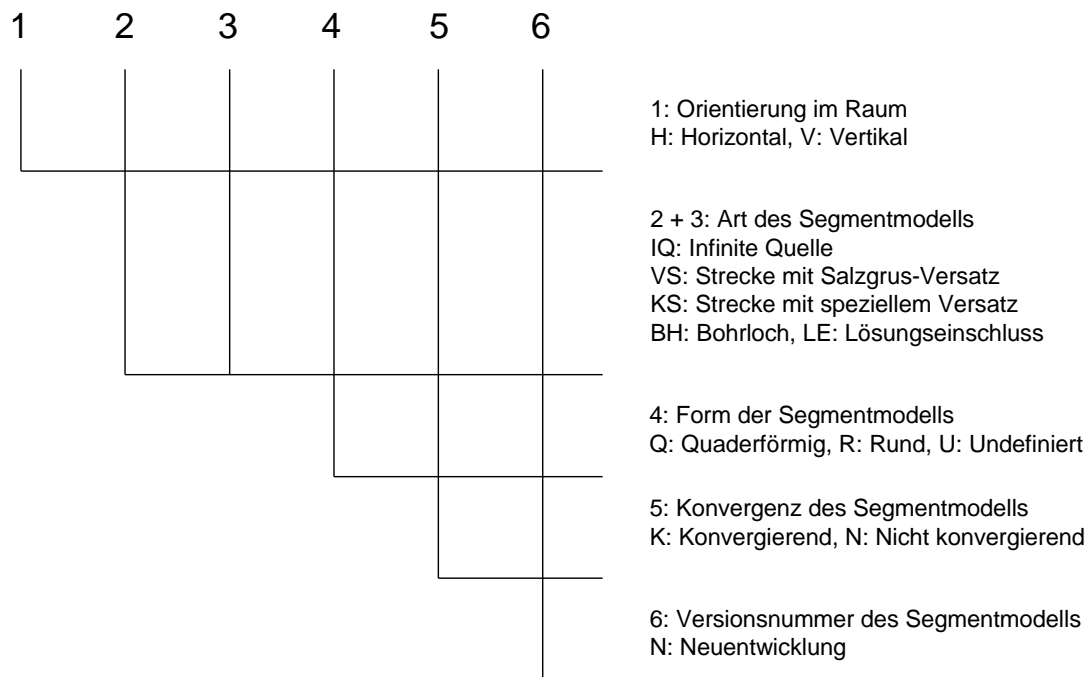


Abb. 3.2 Konventionen bei der Benennung der Segmentmodelle

Bohrlochverschlüsse (Stopfen) werden nicht durch eigene Segmente beschrieben. stattdessen wird zum Segment für Bohrlöcher stets ein Verschluss integriert, da der zu modellierende Verschluss selbst ein sehr kleines Hohlraumvolumen besitzt. Durch das Zusammenfügen des Verschlusses mit dem zugehörigen Bohrlochsegment werden die in der zeitdiskreten Rechnung bei sehr kleinen Hohlraumvolumina erforderlichen sehr kleinen Zeitschritte vermieden. Die Bohrlochsegmente besitzen diesen Verschluss grundsätzlich an beiden Enden. Hierdurch sind diese Segmente in der Segmentstruktur universell einsetzbar. Der "Verschluss" am unteren Ende eines Bohrlochs hat i. A. keine Funktion. Wird jedoch ein Lösungseinschluss hier angeschlossen, so wirkt dieser "Verschluss" als Strömungswiderstand bei der Flüssigkeitsfreisetzung aus dem Einschluss.

Segmentmodelle für den Austrittsort zum Deckgebirge

Die Segmentmodelle für den Austrittsort zum Deckgebirge legen die Randbedingungen für das Segmentsystem fest. Hierzu gehören

- der hydrostatische Druck außerhalb des Grubengebäudes,
- der Strömungswiderstand für den Ausstrom aus dem Grubengebäude,
- der Gradient der Radionuklidkonzentration für die diffusive Freisetzung.

Das Segmentmodell **VIQQN3**¹ dient der Beschreibung des Ein- und Austrittsortes für Flüssigkeit und Radionuklide. In ISIBEL wird dieses Modell für den Schachtverschluss verwendet. Der Flüssigkeitszutritt erfolgt zu einem als Eingangsdatum vorgegebenen Zeitpunkt (z.B. Zeitpunkt des Schachtverschlussversagens). Der Flüssigkeitsaustritt erfolgt, wenn sich innerhalb des Grubengebäudes ein höherer Fluiddruck eingestellt hat als außerhalb. Die Porosität und die Permeabilität werden als lokale Eingangsdaten vorgegeben. Es gibt keine Konvergenz. Die Radionuklidfreisetzung erfolgt advektiv mit dem Flüssigkeitsstrom und durch Diffusion. Die Porosität wird für die diffusive Radionuklidfreisetzung verwendet, die mit einem Konzentrationsgradienten berechnet wird, der mit Hilfe einer effektiven Länge ermittelt wird. Außerdem wird eine effektive Querschnittsfläche verwendet. Effektive Länge und effektive Querschnittsfläche können unabhängig vom angesetzten geometrischen Querschnitt und der geometrischen Län-

¹ Zur Bedeutung der Bezeichnung der Modelle siehe hier und im Folgenden die Abbildung 3.2.

ge vorgegeben werden. Der Strömungswiderstand hat einen zeitlich konstanten Wert, der aus den geometrischen Abmessungen, der Viskosität des Fluids und der Permeabilität ermittelt wird.

Segmentmodelle für versetzte Strecken

Das Segmentmodell **HVSQKN** dient der Beschreibung versetzter Strecken oder Kammern. Jedes Segment kann ein sogenanntes Zusatzvolumen besitzen, das Flüssigkeit und Radionuklide aufnehmen und transportieren kann, das aber nicht zum Strömungswiderstand des Segmentes beiträgt. Die Segmente konvergieren wie in [15] beschrieben. Der Anfangswert der Porosität wird als lokales Eingangsdatum vorgegeben, die Permeabilität berechnet sich aus der Permeabilitäts-Porositäts-Beziehung. Der Radionuklidtransport erfolgt advektiv mit dem Flüssigkeitsstrom sowie durch Diffusion und Dispersion. Zur genaueren Beschreibung des Radionuklidtransports in der Strecke kann diese feiner diskretisiert werden, indem sie in bis zu maximal 99 Blöcke unterteilt wird.

Das Segmentmodell **HKSQNN** dient ebenfalls der Beschreibung versetzter Strecken oder Kammern. Die Segmente enthalten aber ausschließlich nicht kompaktierbaren Versatz und konvergieren daher nicht. Die Porosität und die Permeabilität werden unabhängig voneinander als lokale Eingangsdaten vorgegeben. Der Radionuklidtransport erfolgt advektiv mit dem Flüssigkeitsstrom sowie durch Diffusion und Dispersion. Zur genaueren Beschreibung des Radionuklidtransports in der Strecke kann diese feiner diskretisiert werden, indem sie in bis zu maximal 99 Blöcke unterteilt wird.

Segmentmodelle für Einlagerungsbaue

Im in ISIBEL betrachteten Grubengebäude mit Einlagerung von BSK, HAW- und CSD-Kokillen wird das Bohrlochmodell **VBHRKN** verwendet. Das Segmentmodell dient der Beschreibung von Einlagerungsbohrlöchern. Durch Metallkorrosion kann Gas produziert werden, das in einem festgelegten Anteil des Hohlraumvolumens im Bohrloch gespeichert werden kann und dabei Flüssigkeit verdrängt. Außerdem kann aus anderen Segmenten freigesetztes Gas gesammelt werden und ebenfalls das Gasspeichervolumen füllen. Bei der anaeroben Metallkorrosion wird Wasser verbraucht. Der damit verbundene Flüssigkeitsverlust und die Salzausscheidung als Feststoff sowie die eventuelle Volumenzunahme des korrodierten Metalls können bei einer entsprechenden Pa-

rametrisierung des Segmentmodells berücksichtigt werden. In den vorliegenden Modellrechnungen wird diese Möglichkeit nicht berücksichtigt, um die Interpretation der Ergebnisse einfach zu halten. Das Bohrlochsegment konvergiert wie in [15] beschrieben. Der Anfangswert der Porosität wird aus der Porosität des Abfalls und der Porosität von gegebenenfalls zusätzlich eingebrachtem Versatz ermittelt. Die Permeabilität berechnet sich aus der für ein durchströmtes poröses Medium geltenden Permeabilitäts-Porositäts-Beziehung. Der Radionuklidtransport erfolgt advektiv mit dem Flüssigkeitsstrom sowie durch Diffusion und Dispersion.

Segmentmodelle für Lösungseinschlüsse im Salzgestein

Die Segmentmodelle **HLEUV1** und **VLEUV1** dienen der Beschreibung von größeren Lösungseinschlüssen, die sich in der Nähe von Strecken, Kammern oder Bohrlöchern des Grubengebäudes befinden können. Es wird angenommen, dass diese Lösungseinschlüsse bei der Erkundung bzw. der Auffahrung des Grubengebäudes unentdeckt geblieben sind und sich in der Nachbetriebsphase des Endlagers nach der Entstehung einer Wegsamkeit in die Grubenbaue entleeren können.

Der Zeitpunkt der Entstehung einer Wegsamkeit wird durch das Eingangsdatum $RBTY(2,k)$ für jeden Lösungseinschluss unabhängig vorgegeben. Vor Öffnung der Wegsamkeit steht die Flüssigkeit in dem Lösungseinschluss unter lokalem Gebirgsdruck. Nach der Öffnung der Wegsamkeit herrscht in dem Lösungseinschluss momentan der gleiche Druck wie in dem benachbarten Grubenbau.

Das Segment **HLEUV1S** wird stets horizontal in der Mitte des Nachbarsegments angeschlossen. Der Anfangswert des Fluiddrucks in der Mitte des Lösungseinschlusses ist nach Öffnung der Wegsamkeit somit gleich dem Mittelpunktswert im Nachbarsegment.

Das Segment **VLEUV1S** wird stets vertikal an der Sohle des Nachbarsegments angeschlossen. Der Anfangswert des Fluiddrucks in der Mitte des Lösungseinschlusses ist nach Öffnung der Wegsamkeit somit gleich dem hydrostatischen Druck im Nachbarsegment plus dem der halben Flüssigkeitssäule in dem Lösungseinschluss selbst. Zu diesem Zweck wird das Volumen des vertikalen Lösungseinschlusses vereinfachend als das eines Würfels mit vorgegebener Kantenlänge modelliert.

Der Wegsamkeit zwischen dem Lösungseinschluss und dem Grubenbau wird ein fiktiver Strömungswiderstand zugeordnet, der nur dazu dient, numerische Instabilitäten in der Berechnung der Flüssigkeitsströme zu vermeiden. Zur Simulation der gegebenenfalls klüftigen oder weitverzweigten Ausdehnung des Lösungseinschlusses wird dieser wie ein „versetzter“ Grubenbau mit einer vorgegebenen fiktiven Porosität modelliert. Der Einschluss unterliegt dem Konvergenzprozess, wodurch die Flüssigkeit aus dem Einschluss in den benachbarten Grubenbau ausgepresst wird. Die Konvergenz wird durch den Fluidruck und durch die abnehmende Porosität des „Versatzes“ in dem Lösungseinschluss behindert.

3.2.1.2 Modellierung des Zuflusses in ein Segment

Der Flüssigkeitszutritt in ein Segment k wird durch die Parameterkombination $RBTY(2,k)$, $RBEY(8,k)$ und $RBEY(25,k)$ gesteuert. Der Parameter $RBTY(1,k)$ gibt an, ab wann das Segment in der Segmentstruktur „existiert“, d.h. von welchem Zeitpunkt an die physikalischen und chemischen Prozesse, die im betrachteten Grubenbau ablaufen, berechnet werden. Dieser Flüssigkeitszutritt kann auf drei verschiedene Weisen erfolgen:

- kontinuierlicher Zustrom wegen eines Druckgradienten,
- kontinuierliche gezielte Auffüllung im Zeitintervall $RBTY(2,k)$ bis $RBEY(25,k)$,
- instantane Auffüllung zum Zeitpunkt $RBTY(2,k)$ mit einem vorgegebenen Flüssigkeitsvolumen $RBEY(8,k)$.

Bei der kontinuierlichen oder der instantanen Auffüllung kommt die Flüssigkeitsmenge aus einem nicht mit betrachteten Reservoir, d.h. es wird kein Zufluss simuliert. Die Auffüllung des Segments findet immer statt, wenn $RBTY(2,k) \geq RBTY(1,k)$ ist. Gilt ferner $RBEY(25,k) > RBTY(2,k)$, so findet eine kontinuierliche Auffüllung des Segments statt, andernfalls wird das Segment instantan zum Zeitpunkt $RBTY(2,k)$ gefüllt. Bei der instantanen Auffüllung kann ein Flüssigkeitsvolumen als $RBEY(8,k)$ angegeben werden, das zu dem bereits vorhandenen Flüssigkeitsvolumen addiert wird. Ist das sich dann ergebende Flüssigkeitsvolumen größer als das zur Verfügung stehende Hohlraumvolumen (Porenvolumen), wird das Flüssigkeitsvolumen auf das Hohlraumvolumen begrenzt.

Der Anfangswert des Fluiddrucks richtet sich nach der Höhe des Flüssigkeitsspiegels im Segment. Wird das Endlager als vollständig gefüllt angenommen, liegt der Anfangswert des Fluiddrucks beim hydrostatischen Druck entsprechend der Teufe.

3.2.2 Modelle für die Mobilisierung von Radionukliden

Bei Endlagern für hochradioaktive Abfälle kann eine Radionuklidmobilisierung aus verglastem HAW, aus Brennelementen und aus sonstigen Metallen erfolgen. Die Berechnung der Mobilisierung der Radionuklide aus den Abfallgebinden erfolgt im Modul LOPOS als Unterprogramm innerhalb der Segmentmodelle. Hierfür stehen im aktuellen Modul LOPOS drei Modelle zur Verfügung, die in bisherigen Sicherheitsanalysen eingesetzt wurden. Diese Modelle wurden für die hier durchgeführten Modellrechnungen überprüft, wobei geringe Korrekturen vorgenommen wurden. Da einige der Modelle seit längerer Zeit nicht mehr aktualisiert wurden, wurde ein Bedarf zur Weiterentwicklung identifiziert (Kapitel 4). Dieser Entwicklungsbedarf betrifft die Mobilisierung aus verglastem HAW sowie aus LWR- und HTR-Brennelementen, für die bereits konzeptuelle Modelle existieren, die aber noch nicht im Programm implementiert sind. Konzeptuelle Modelle für die Mobilisierung aus Brennelementen von Forschungsreaktoren liegen derzeit für das Modul LOPOS nicht vor. Eine Beschreibung der derzeit verfügbaren konzeptuellen Mobilisierungsmodelle ist [15] und [40] zu entnehmen.

Eine Mobilisierung kann nur nach dem Ausfall eines Behälters stattfinden. Der Ausfall der Behälter kann dabei in allen Mobilisierungsmodellen mit drei Zeitfunktionen berechnet werden, einem exponentiellen, einem normalverteilten und einem linearen Ausfall.

Als einziges derzeit in LOPOS voll einsatzfähiges Mobilisierungsmodell wurde das für die Mobilisierung aus Metallteilen identifiziert. Es modelliert eine Mobilisierung mit konstanter Rate und wird beispielsweise für die Berechnung der Mobilisierung aus den CSD-C-Behältern verwendet. Obwohl die Mobilisierungsraten aus den Hülzen und Strukturteilen eines Brennelements unterschiedlich sein können, erlaubt das Modell nur die Verwendung eines einzigen Wertes.

3.2.3 Grubengebäudestruktur und Eingangsdaten

Basierend auf dem im Projekt ISIBEL entwickelten Endlagerkonzept [16] wurde für die Konsequenzenanalyse eine Modellstruktur des Grubengebäudes entwickelt. Es wurde dabei das Konzept der reinen Bohrlochlagerung übernommen. Eine Streckenlagerung der abgebrannten Brennelemente in Pollux-Behältern wurde nicht berücksichtigt.

Bei der Übernahme des Endlagerkonzeptes wurden auch Vereinfachungen und Anpassungen vorgenommen, um das Strukturmodell übersichtlich zu halten und somit den Rechenaufwand und den Speicherbedarf der Ausgabedateien zu begrenzen. Dies ist gerechtfertigt, da im Rahmen von ISIBEL eine Bewertung des Instrumentariums für Langzeitsicherheitsanalysen durchgeführt werden soll und keine detaillierte Bewertung eines Endlagerkonzeptes. Das für ISIBEL erstellte Modell für ein Grubengebäude enthält folgende Vereinfachungen:

- Es gibt nur ein Einlagerungsfeld mit BSK-3, d.h. nicht das ganze zu erwartende Modellinventar aus [16] wurde übernommen,
- Erkundungssohle und Einlagerungssohle wurden zusammengefasst,
- die versetzte Lage der Beschickungsstrecken in einem Einlagerungsfeld wurde nicht abgebildet.

Die modellierte Struktur des Grubengebäudes mit den Bezeichnungen der einzelnen Segmente ist in Abbildung 3.3 dargestellt. Der Begriff INFRA-B steht für den Infrastrukturbereich. Dieser wird vereinfacht durch ein Segment modelliert, in dem alle Grubenbaue und Strecken des Infrastrukturbereichs des Endlagerbergwerks zusammengefasst sind. Die Abschlussbauwerke zwischen den Richtstrecken oder Zugangsstrecken (ZS) und dem Infrastrukturbereich sind mit den Kürzeln VZS gekennzeichnet. Das gesamte Grubengebäude ist in einen nördlichen und einen südlichen Teil gegliedert. Segmente auf der nördlichen Seite sind mit der Endung –N, Segmente auf der südlichen Seite mit der Endung –S gekennzeichnet. Die Segmente der Zugangsstrecken werden fortlaufend nummeriert.

Die Aufteilung der Zugangsstrecken in Segmente ist unterschiedlich und so gewählt, dass ein abzweigender Querschlag jeweils in der Mitte eines Segments ansetzen kann. Die gewählte Buchstabenkombination für die Querschläge ist QS. Alle Querschläge werden in jeweils drei Segmente aufgeteilt. Die Segmente des ersten Querschlags werden mit QS-1N für den nördlichen, QS-1M für den mittleren und QS-1S für den süd-

lichen Teil des Querschlags bezeichnet. Analog erfolgt die Bezeichnung der weiteren Querschläge 2 bis 4.

Die Beschickungsstrecken werden anhand der benachbarten Querschläge unterschieden, wobei die jeweils mittleren Beschickungsstrecken (M) im Modell stellvertretend für drei parallele Beschickungsstrecken stehen (der mittleren und den beiden gestrichelt dargestellten Strecken in Abbildung 3.3). Die Bezeichnung ist analog zu der der Querschläge, z.B. bezeichnet BS-1NW das westliche (W) Segment, das die Beschickungsstrecke repräsentiert, die vom Querschlagsegment QS-1N abzweigt.

Die Abmessungen der Modellsegmente sind in den Tabellen 3.1 und 3.2 angegeben. Bei den Querschnitten ist berücksichtigt, dass die Erkundungssohle und die Einlage-
sohle im Strukturmodell zusammengefasst sind. Als Versatzmaterial dient Salz-
grus, für das eine Anfangsporosität von 0,3 angenommen wird. Der Versatz wird als
kompaktierbar angenommen mit einer Grenzporosität von 10^{-3} (siehe Tabelle 3.10 zu
den allgemeinen Daten des Nahfeldmodells).

Tab. 3.1 Abmessungen der Modellsegmente für die Zugangsstrecken und den
Infrastrukturbereich

Segment	Querschnitt [m ²]	Länge [m]
SCHACHT	44,0	50,0
INFRA-B	1391,6	165,28
VZS-N	42,0	50,0
ZS-N1	42,0	50,0
ZS-N2	42,0	250,0
ZS-N3	42,0	50,0
ZS-N4	42,0	171,5
ZS-N5	42,0	50,0
ZS-N6	42,0	150,9
ZS-N7	42,0	50,0
ZS-N8	42,0	171,0
ZS-N9	42,0	50,0
VZS-S	23,0	50,0
ZS-S1	23,0	50,0
ZS-S2	23,0	250,0
ZS-S3	23,0	50,0
ZS-S4	23,0	171,5

Segment	Querschnitt [m ²]	Länge [m]
ZS-S5	23,0	50,0
ZS-S6	23,0	150,9
ZS-S7	23,0	50,0
ZS-S8	23,0	171,0
ZS-S9	23,0	50,0

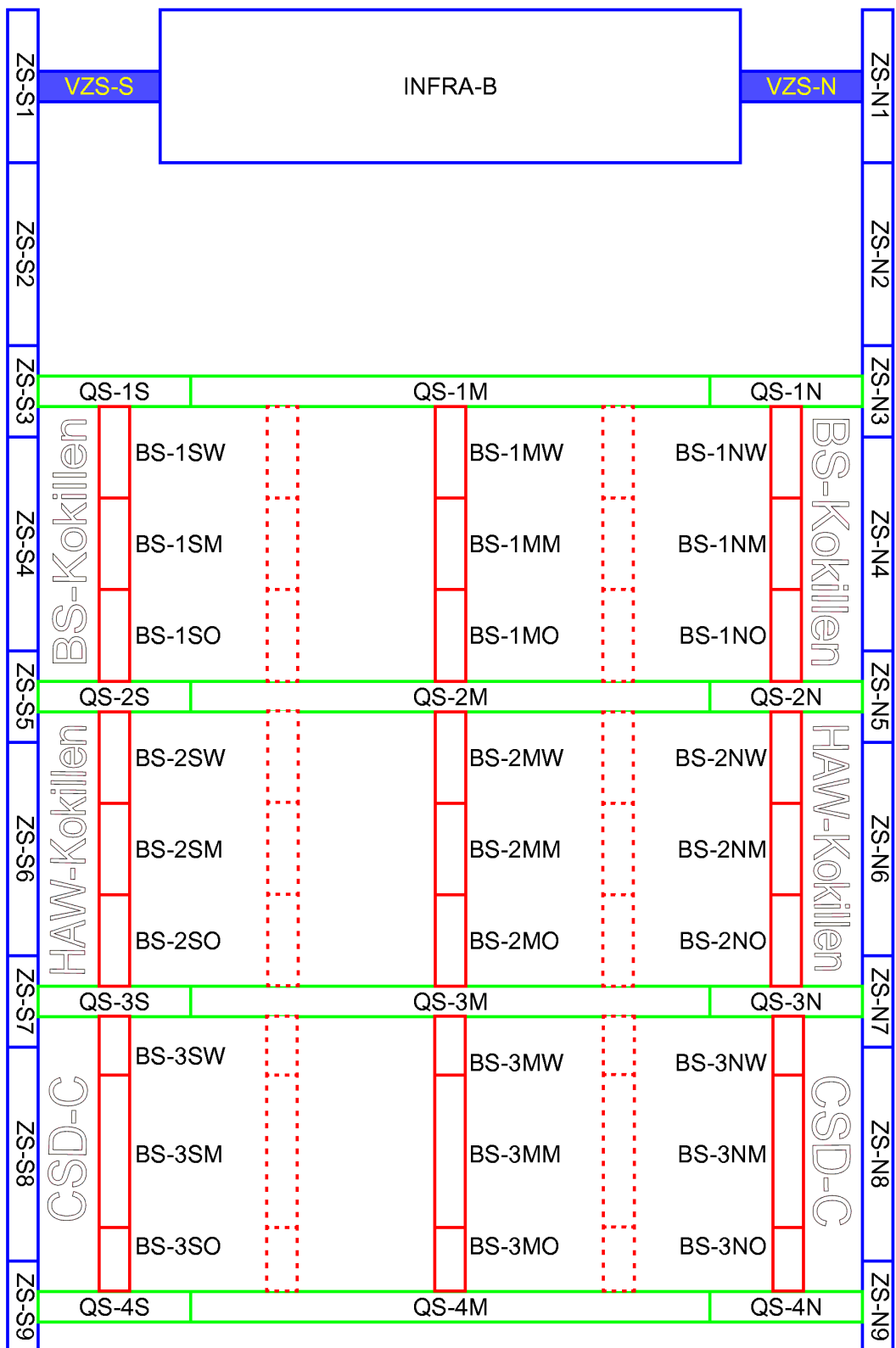


Abb. 3.3 Schematische Struktur des Grubengebäudes

Tab. 3.2 Abmessungen der Modellsegmente für die Querschläge und Beschickungsstrecken

Segment	Querschnitt [m ²]				Länge [m]			
	Feld 1	Feld 2	Feld3	Feld 4	Feld 1	Feld 2	Feld 3	Feld 4
QS-xN*	42,0	42,0	42,0	42,0	43,0	43,0	43,0	43,0
QS-xM	42,0	42,0	42,0	42,0	188,48	188,48	188,48	188,48
QS-xS	42,0	42,0	42,0	42,0	33,8	33,8	33,8	33,8
BS-xNW	31,0	31,0	31,0	-	70,0	63,0	24,0	-
BS-xNM	31,0	31,0	31,0	-	71,0	64,4	120,5	-
BS-xNO	31,0	31,0	31,0	-	70,0	63,0	24,0	-
BS-xMW	3-31,0	3-31,0	3-31,0	-	70,0	63,0	24,0	-
BS-xMM	3-31,0	3-31,0	3-31,0	-	71,0	64,4	120,5	-
BS-xMO	3-31,0	3-31,0	3-31,0	-	70,0	63,0	24,0	-
BS-xSW	31,0	31,0	31,0	-	70,0	63,0	24,0	-
BS-xSM	31,0	31,0	31,0	-	71,0	64,4	120,5	-
BS-xSO	31,0	31,0	31,0	-	70,0	63,0	24,0	-

* $x \in \{1,2,3,4\}$

Die von jeder Beschickungsstrecke ausgehenden Bohrlöcher haben einen Durchmesser von 0,45 m und sind 300 m tief, wovon die obersten zehn Meter mit Versatzmaterial gefüllt sind (Stopfen). Es bleiben damit 290 m für die Einlagerung der Abfallgebinde. Die Bohrlöcher werden nach dem Abfall unterschieden, der dort eingelagert ist. Es werden folgende Einlagerungsbehälter berücksichtigt:

- HAW-Kokillen (Länge 1,338 m, Durchmesser 0,430 m),
- CSD-C (Colis de déchet compactés, Länge $\leq 1,345$ m, Durchmesser $\leq 0,440$ m) und
- Brennstabkokillen (BSK, Länge 4,980 m, Durchmesser $\leq 0,440$ m).

Nicht berücksichtigt wurden Abfälle bzw. Behältertypen aus verschiedenen Forschungsreaktoren (CASTOR KNK, CASTOR AVR/THTR, CASTOR MTR 2), da für diese noch kein Konzept für eine Bohrlochlagerung vorliegt und zum Teil auch noch Abfallspezifikationen fehlen [16].

Im Grubengebäude werden anhand der berücksichtigten Abfallgebinde drei Einlagerungsfelder unterschieden:

1. **BSK-Feld:** In den Bohrlöchern BBSK-1NW bis BBSK-1NO und BBSK-1SW bis BBSK-1SO können entsprechend den Abmessungen von Bohrlöchern und Gebinden jeweils 58 BSK endgelagert werden. Da die mittleren Beschickungsstrecken-Segmente BS-1(S,M,N)M für drei parallele Beschickungsstrecken stehen, sind hier Modellsegmente mit dem Inventar von drei Bohrlöchern angehängt. Diese enthalten demzufolge je 174 BSK. Insgesamt sind **870 BSK** im vorderen Feld des Grubengebäudes eingelagert.
2. **HAW-Feld:** In den Bohrlöchern BHAW-2NW bis BHAW-2NO und BHAW-2SW bis BHAW-2SO werden jeweils 215 HAW-Kokillen endgelagert. Da wiederum die mittleren Beschickungsstrecken-Segmente BS-2(S,M,N)M für drei parallele Beschickungsstrecken stehen, sind hier Modellsegmente mit dem Inventar von drei Bohrlöchern angehängt. Diese enthalten demzufolge je 645 HAW-Kokillen. Im gesamten Feld sind **3225 HAW-Kokillen** deponiert.
3. **CSD-Feld:** Im östlichen Teil des Grubengebäudes werden in den Bohrlöchern an den nördlichen und südlichen Querschlägen (BS-3SO, BS-3SW, BS-3NO, BS-3NW) jeweils 213 CSD endgelagert. In den beiden mittleren Segmenten BS-3SM, BS-3NM werden fünf Bohrlöcher zusammengefasst (1065 CSD). Die mittleren Beschickungsstrecken des CSD-Feldes (BS-3M) stehen für drei parallele Strecken. Diese enthalten demzufolge 639 CSD im nördlichen und südlichen bzw. 3195 CSD im mittleren Segment. Das CSD-Feld enthält insgesamt **7455 CSD**. In diesem Wert sind CSD-C (kompaktierter mittelradioaktiver Abfall) und CSD-B (mittelradioaktive Reststoffe aus der Betriebsabwasseraufbereitung) zusammengefasst. Nach [16] werden ca. 6900 CSD-C und ca. 560 CSD-B erwartet. Eine Abfallspezifikation von CSD-B lag für ISIBEL nicht vor, deshalb wurde für alle CSD das gleiche Inventar angenommen, eine Annahme, die wahrscheinlich zu einer geringfügigen Überschätzung des Inventars führt.

Bis auf die Menge der BSK und die Brennelemente aus Forschungsreaktoren entspricht dieses Einlagerungsschema dem zu erwartenden Inventar aus der Wiederaufbereitung und den direkt endgelagerten, abgebrannten Brennelementen nach [16] und [22]. Bei der angenommenen Geometrie des Endlagers wird nur etwa ein Achtel der zu erwartenden Menge an BSK im BSK-Feld des Grubengebäudes berücksichtigt. Bei der Abschätzung der Anzahl Gebinde pro Beschickungsstrecke wurde von einer

maximalen Beladung der Einlagerungsbohrlöcher mit Abfallgebinden ausgegangen. Nicht berücksichtigt wurde, dass es aus mechanischen Gründen wahrscheinlich notwendig ist, nach einer bestimmten, geringen Anzahl von Gebinden zusätzlich jeweils Salzgrus einzubringen, um für einen radialen, mechanischen Lastabtrag des Gewichtes des Gebindesäule zu sorgen. Die Anzahl der Gebinde pro Bohrloch würde sich dann entsprechend verringern.

Das zu erwartende Inventar der einzelnen Behälter und das daraus abgeleitete Inventar vor der Einlagerung der Abfälle ist in den Tabellen 3.3 und 3.4 zusammengestellt. Es beruht auf den Inventarangaben in [9]. Bei den Modellrechnungen wird beispielhaft eine Zwischenlagerzeit von 30 Jahren angenommen (Tabelle 3.7), d.h. im Instrumentarium ist es möglich, beliebige Zeiten zu berücksichtigen, die zwischen der Entstehung eines Abfalls und dem Einlagerungszeitpunkt im Endlager liegen.

Tab. 3.3 Radionuklidinventare pro Gebinde, Gesamtinventar und Halbwertszeiten (Spalt- und Aktivierungsprodukte)

Nuklid	HAW [Bq/Geb.]	BSK [Bq/Geb.]	CSD [Bq/Geb.]	Gesamt [Bq]	T _{1/2} [a]	Gesamt [mol]
C-14	-	7,37·10 ¹⁰	1,4·10 ¹⁰	1,69·10 ¹⁴	5,730·10 ³	7,30·10 ¹
Cl-36	-	9,77·10 ⁰⁸	-	8,50·10 ¹¹	3,000·10 ⁵	1,93·10 ¹
Co-60	3,32·10 ¹³	1,63·10 ¹⁵	7,71·10 ¹³	2,10·10 ¹⁸	5,272·10 ⁰	8,38·10 ²
Ni-59	7,00·10 ⁰⁷	8,14·10 ¹¹	-	7,08·10 ¹⁴	7,500·10 ⁴	4,02·10 ³
Ni-63	9,50·10 ⁰⁹	1,16·10 ¹⁴	2,71·10 ¹³	3,03·10 ¹⁷	1,000·10 ²	2,29·10 ³
Se-79	1,72·10 ¹⁰	2,98·10 ¹⁰	5,51·10 ⁰⁷	8,17·10 ¹³	1,100·10 ⁶	6,79·10 ³
Sr-90	3,23·10 ¹⁵	5,99·10 ¹⁵	1,40·10 ¹³	1,57·10 ¹⁹	2,864·10 ¹	3,41·10 ⁴
Zr-93	8,92·10 ¹⁰	1,58·10 ¹¹	8,60·10 ⁰⁹	4,90·10 ¹⁴	1,500·10 ⁶	5,55·10 ⁴
Nb-94	8,18·10 ⁰⁶	1,36·10 ¹¹	-	1,18·10 ¹⁴	2,000·10 ⁴	1,79·10 ²
Mo-93	6,47·10 ⁰⁶	6,95·10 ⁰⁹	-	6,07·10 ¹²	3,500·10 ³	1,61·10 ⁰
Tc-99	6,19·10 ¹¹	1,04·10 ¹²	2,31·10 ⁰⁹	2,91·10 ¹⁵	2,100·10 ⁵	4,62·10 ⁴
Pd-107	4,65·10 ⁰⁹	8,33·10 ⁰⁹	-	2,22·10 ¹³	6,500·10 ⁶	1,09·10 ⁴
Sn-126	2,43·10 ¹⁰	4,47·10 ¹⁰	1,51·10 ⁰⁶	1,17·10 ¹⁴	2,345·10 ⁵	2,08·10 ³
I-129	1,65·10 ⁰⁴	2,44·10 ⁰⁹	5,31·10 ⁰⁶	2,16·10 ¹²	1,570·10 ⁷	2,56·10 ³
Cs-135	1,62·10 ¹⁰	2,45·10 ¹⁰	7,11·10 ⁰⁷	7,41·10 ¹³	2,000·10 ⁶	1,12·10 ⁴
Cs-137	4,67·10 ¹⁵	8,60·10 ¹⁵	1,51·10 ¹³	2,27·10 ¹⁹	3,017·10 ¹	5,17·10 ⁴
Sm-151	1,53·10 ¹³	2,00·10 ¹³	6,00·10 ¹⁰	6,71·10 ¹⁶	9,300·10 ¹	4,71·10 ²

Tab. 3.4 Radionuklidinventare pro Gebäude, Gesamtinventar und Halbwertszeiten (Zerfallsreihen)

Nuklid	HAW [Bq/Geb.]	BSK [Bq/Geb.]	CSD [Bq/Geb.]	Gesamt [Bq]	T _{1/2} [a]	Gesamt [mol]
Th-Reihe						
Pu-244	1,12·10 ⁰²	6,95·10 ⁰⁴	-	6,09·10 ⁰⁷	8,000·10 ⁰⁷	3,68·10 ⁻¹
Cm-244	1,13·10 ¹⁴	3,46·10 ¹⁴	9,51·10 ¹⁰	6,65·10 ¹⁷	1,810·10 ⁰¹	9,10·10 ⁰²
Pu-240	7,61·10 ¹⁰	3,83·10 ¹³	5,20·10 ¹⁰	3,40·10 ¹⁶	6,563·10 ⁰³	1,68·10 ⁰⁴
U-236	6,63·10 ⁰⁷	1,91·10 ¹⁰	-	1,68·10 ¹³	2,342·10 ⁰⁷	2,97·10 ⁰⁴
Th-232	5,65·10 ⁰⁰	2,10·10 ⁰⁰	-	2,01·10 ⁰⁴	1,41·10 ¹⁰	2,13·10 ⁻²
U-232	1,11·10 ⁰⁷	1,24·10 ⁰⁹	-	1,11·10 ¹²	6,890·10 ⁰¹	4,83·10 ⁻⁴
Np-Reihe						
Cm-245	1,11·10 ¹⁰	2,72·10 ¹⁰	-	5,93·10 ¹³	8,500·10 ⁰³	3,81·10 ⁰¹
Pu-241	1,27·10 ¹³	9,27·10 ¹⁵	1,00·10 ¹³	8,18·10 ¹⁸	1,435·10 ⁰¹	8,88·10 ⁰³
Am-241	6,20·10 ¹³	1,03·10 ¹³	3,51·10 ¹⁰	2,09·10 ¹⁷	4,322·10 ⁰²	6,84·10 ⁰³
Np-237	1,66·10 ¹⁰	2,63·10 ¹⁰	7,20·10 ⁰⁶	7,65·10 ¹³	2,144·10 ⁰⁶	1,24·10 ⁰⁴
U-233	1,83·10 ⁰⁴	4,12·10 ⁰⁶	-	3,64·10 ⁰⁹	1,592·10 ⁰⁵	4,38·10 ⁻²
Th-229	6,63·10 ⁰³	1,27·10 ⁰⁴	-	1,32·10 ⁰⁸	7,880·10 ⁰³	7,88·10 ⁻⁵
U-Reihe						
Cm-246	2,27·10 ¹⁰	6,81·10 ¹⁰	-	1,33·10 ¹⁴	4,730·10 ⁰³	4,74·10 ⁰¹
Pu-242	3,08·10 ⁰⁸	1,84·10 ¹¹	2,80·10 ⁰⁸	1,63·10 ¹⁴	3,750·10 ⁰⁵	4,63·10 ⁰³
Am-242	1,55·10 ¹¹	3,06·10 ¹¹	-	7,65·10 ¹⁴	1,410·10 ⁰²	8,16·10 ⁰⁰
U-238	6,67·10 ⁰⁷	1,86·10 ¹⁰	-	1,64·10 ¹³	4,468·10 ⁰⁹	5,53·10 ⁰⁶
Pu-238	4,28·10 ¹¹	2,61·10 ¹⁴	4,71·10 ¹¹	2,29·10 ¹⁷	8,774·10 ⁰¹	1,52·10 ⁰³
U-234	2,10·10 ⁰⁸	4,97·10 ¹⁰	-	4,39·10 ¹³	2,455·10 ⁰⁵	8,15·10 ⁰²
Th-230	3,17·10 ⁰⁶	9,61·10 ⁰⁵	-	1,11·10 ¹⁰	7,540·10 ⁰⁴	6,30·10 ⁻²
Ra-226	6,25·10 ⁰³	1,27·10 ⁰³	-	2,13·10 ⁰⁷	1,600·10 ⁰³	2,57·10 ⁻⁶
Am-Reihe						
Am-243	1,05·10 ¹²	2,13·10 ¹²	3,51·10 ⁰⁸	5,26·10 ¹⁵	7,370·10 ⁰³	2,93·10 ⁰³
Pu-239	4,54·10 ¹⁰	2,10·10 ¹³	3,00·10 ¹⁰	1,86·10 ¹⁶	2,411·10 ⁰⁴	3,40·10 ⁰⁴
U-235	3,51·10 ⁰⁶	7,77·10 ⁰⁸	-	6,87·10 ¹¹	7,038·10 ⁰⁸	3,66·10 ⁰⁴
Pa-231	1,22·10 ⁰⁶	1,98·10 ⁰⁶	-	5,66·10 ⁰⁹	3,276·10 ⁰⁴	1,40·10 ⁻²

Obwohl es neuere Daten des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS) zu den Abfallinventaren gibt [22], wurden diese Daten nicht verwendet, denn die dortige Angabe für das Inventar von Cm-245 erscheint viel zu hoch. Dies zeigt ein Vergleich mit den Angaben im Bericht [8] in Anhang C und mit Ergebnissen von Abbrandrechnungen der GNS [24]. In Tabelle 3.5 sind die Aktivitäten der Isotope Cm-243, Cm-244 und Cm-245 sowie die Aktivitätsverhältnisse Cm-243/Cm-244 und Cm-244/Cm-245 gemäß

den verschiedenen Quellen aufgelistet. Die Angaben aus [8] beziehen sich auf die Werte zum Zeitpunkt 01.01.2030 aus den Herkunftskategorien Wiederaufarbeitung (WA) und Brennelemente (BE) und stellen wie bei [22] eine Summe über die in Deutschland zu erwartenden Inventare in den Abfallkategorien dar. Die Angaben von GNS entstammen Abbrandrechnungen für eine Anreicherung von 3,5 % und einen Abbrand von 40 GWd/t_{SM} für die Zeitpunkte 10 und 100 Jahre nach Entnahme aus dem Reaktor und beziehen sich auf 1 Tonne Schwermetall.

Tab. 3.5 Aktivitätsinventare für ausgewählte Curium-Isotope [Bq] aus verschiedenen Quellen (siehe Text) und Aktivitätsverhältnisse

	Cm-243	Cm-244	Cm-245	243/245	244/245
BfS 2003	$2,80 \cdot 10^{15}$	* $3,56 \cdot 10^{17}$	$3,53 \cdot 10^{17}$	0,008	1,0
Buchheim 2005 (WA)	$1,81 \cdot 10^{15}$	$2,12 \cdot 10^{17}$	$3,77 \cdot 10^{13}$	48	5 623
Buchheim 2005 (BE)	$7,67 \cdot 10^{15}$	$6,41 \cdot 10^{17}$	$1,46 \cdot 10^{14}$	52,5	4 390
GNS (10 a)	$8,99 \cdot 10^{11}$	$1,14 \cdot 10^{14}$	$2,07 \cdot 10^{10}$	43,5	5 530
GNS (100 a)	$1,01 \cdot 10^{11}$	$3,75 \cdot 10^{12}$	$2,05 \cdot 10^{10}$	4,9	174

* keine Angabe in [22]; Wert wurde aus COGEMA-Datenblättern zu HAW-Kokillen abgeschätzt

Insbesondere aus den Aktivitätsverhältnissen ist zu erkennen, dass der in [22] angegebene Wert für die Aktivität von Cm-245 um mehrere Größenordnungen über den Werten der anderen Quellen liegt.

Die Überprüfung von drei anderen Leitnukliden aus den COGEMA-Abfällen zeigt dagegen keine signifikanten Abweichungen, siehe Tabelle 3.6. Aus Datenblättern der GNS zu Gehalten von Leitnukliden in HAW-Kokillen, die von der COGEMA zurückgeführt wurden, sind die Aktivitäten aus Mittelwerten über die Beladung von drei Transporten (jeweils 28 Kokillen) und der Annahme, dass insgesamt 3678 Kokillen der COGEMA in Deutschland anfallen, ermittelt worden.

Tab. 3.6 Aktivitätsinventare für die Leitnuklide Sr-90, Cs-137 und Am-241 in COGEMA HAW-Kokillen

	Sr-90	Cs-137	Am-241
BfS 2003	$1,25 \cdot 10^{19}$	$1,77 \cdot 10^{19}$	$1,73 \cdot 10^{17}$
GNS Datenblätter zu COGEMA Kokillen	$1,14 \cdot 10^{19}$	$1,79 \cdot 10^{19}$	$3,42 \cdot 10^{17}$

Weiterhin ist aufgefallen, dass es für die Abfallkategorie „Kompaktierte BE-Hülsen u. Technologieabfälle (COGEMA)“ keine Inventarangaben zu Uran- und Thoriumisotopen, dafür aber zu den Isotopen der Aktiniden Np, Pu, Am und Cm gibt.

Durch den Wärme erzeugenden Abfall erhöhen sich die Temperaturen in den Grubenbauen. Für die Zugangsstrecken-Segmente des Grubengebäudes wurden die in Abbildung 3.4 dargestellten Temperaturverläufe verwendet. Die Daten für die Abbildungen 3.4 bis 3.8 beruhen auf Berechnungen der Temperaturverteilung für das Projekt Systemanalyse Mischkonzept (SAM) [9]. Da das Grubengebäude aus [9] nicht mit dem hier beschriebenen Gebäude identisch ist, ist die Zuweisung geeigneter Temperaturdaten zum Teil schwierig, aber für die Untersuchungszwecke in ISIBEL ausreichend.

Die Temperaturverläufe sind jeweils durch die Segmentnamen charakterisiert. Die Abbildung 3.5 gibt die Temperaturentwicklungen für die Querschläge QS-1N bis QS-4S wieder, während die Abbildungen 3.6 bis 3.8 die Temperaturverläufe in den Segmenten der Beschickungsstrecken, in den Bohrlochstopfen und in den Bohrlöchern zeigen. Für letztere werden jeweils die Temperaturen auf dem Bohrlochrand in der vertikalen Mitte angesetzt. Die Temperatur auf dem Referenzniveau (Einlagerungssohle 840 m u. GOK) beträgt 310 K.

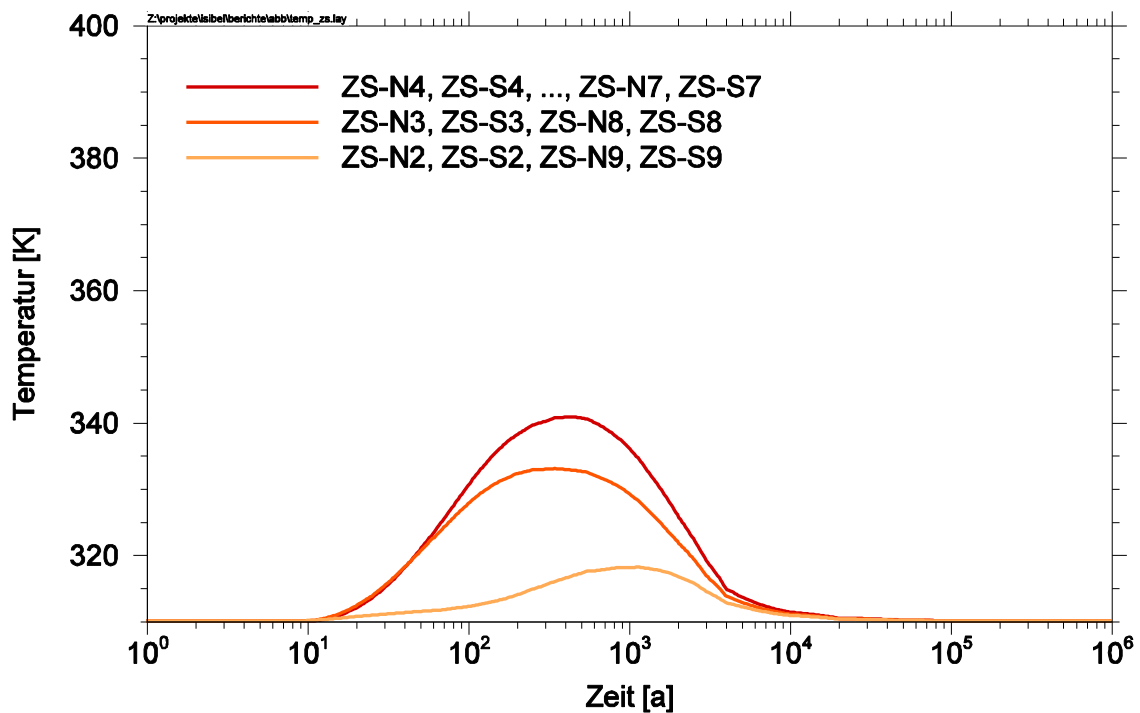


Abb. 3.4 Zeitliche Entwicklung der Temperatur in den Segmenten der Zugangsstrecken

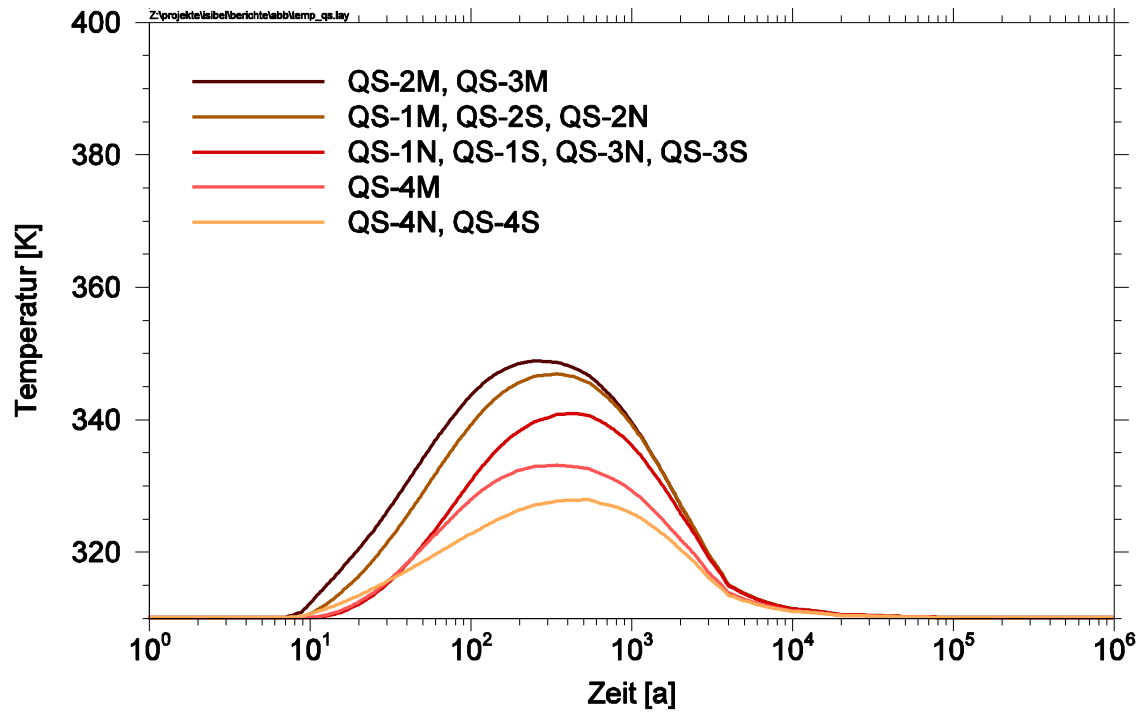


Abb. 3.5 Zeitliche Entwicklung der Temperatur in den Segmenten der Querschläge

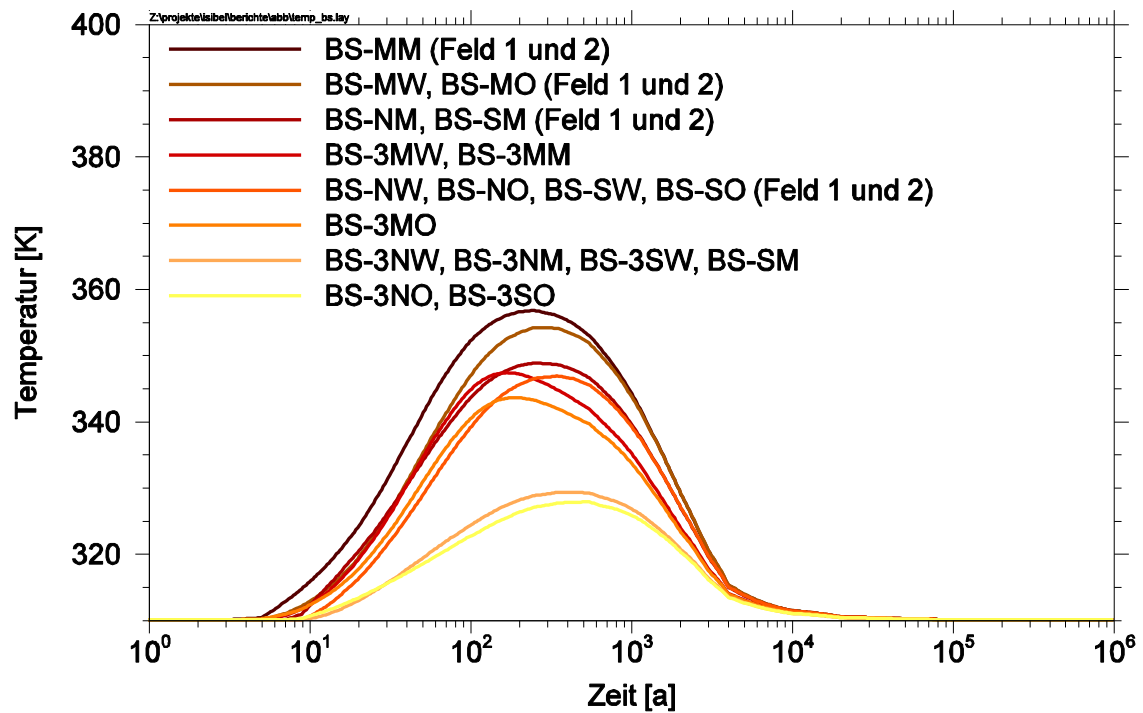


Abb. 3.6 Zeitliche Entwicklung der Temperatur in den Segmenten der Beschickungsstrecken

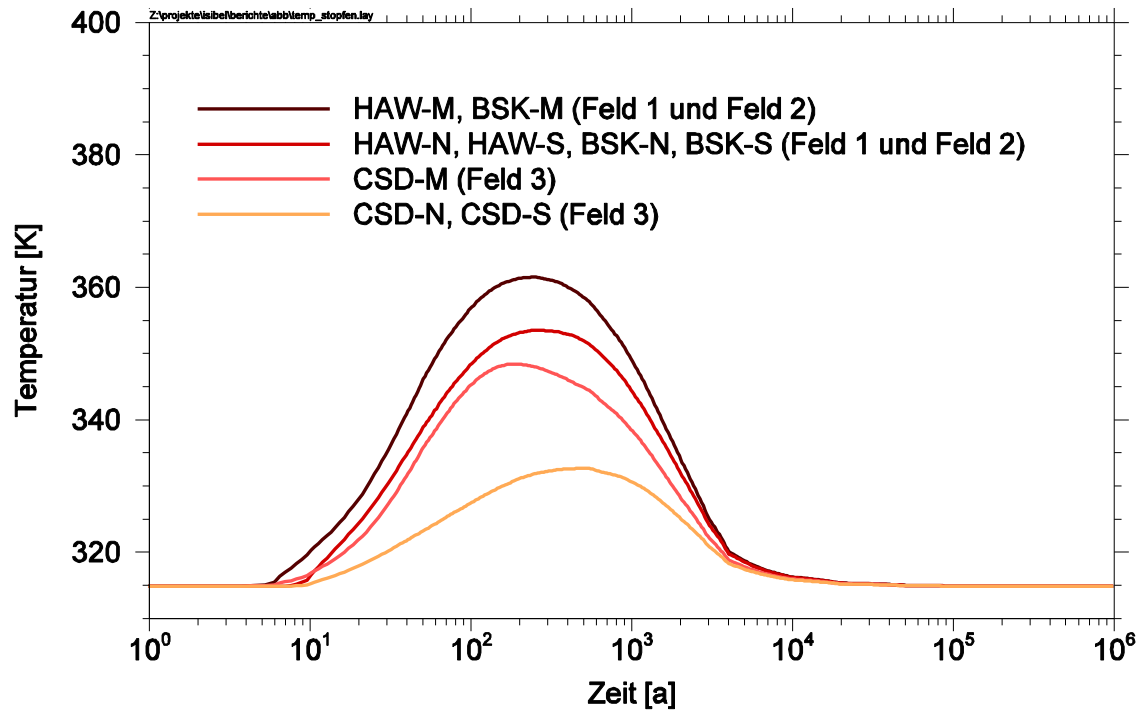


Abb. 3.7 Zeitliche Entwicklung der Temperatur in den Bohrlochstopfen

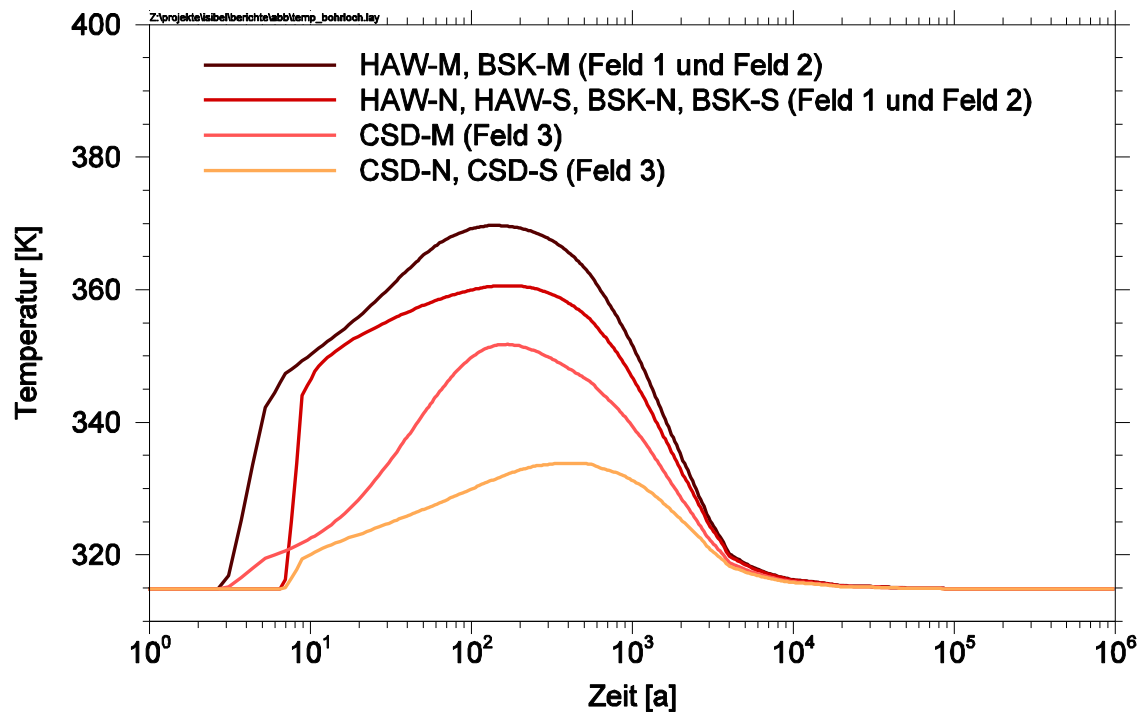


Abb. 3.8 Zeitliche Entwicklung der Temperatur in den Bohrlöchern

Bei der Mobilisierung der Radionuklide aus den Abfallgebänden werden der radioaktive Zerfall des Inventars, die Korrosion der Einlagerungsbehälter sowie die Zersetzung der Abfallmatrix berücksichtigt. Es wird für alle Gebinde eine gleich verteilte Lebensdauer mit einer mittleren Standzeit von 50 Jahren² angenommen, d.h. die Anzahl der ausgefallenen Behälter steigt innerhalb von 100 Jahren vom Zeitpunkt des Kontakts zwischen Lösung und Abfall linear von Null auf die Gesamtbehältermenge an. Für den Behälterausfall können unterschiedliche Funktionen verwendet werden: gleichförmig, exponentiell oder normal verteilt. Mit diesen Funktionen lassen sich alle in einem HAW-Endlager zu berücksichtigenden Abfallgebände modellieren.

Tab. 3.7 Allgemeine Modellparameter zur Mobilisierung

Parameter	Dimension	BSK	HAW	CSD
Zwischenlagerzeit	a	30	30	30
mittlere Standzeit der Behälter	a	50	50	50
Behälterausfallfunktion		linear	linear	linear
Mobilisierungsrate(n)	1/a	Tab. 3.9	f(T), Abb. 3.9	konstant
Gasbildung		nein	nein	nein

Eine Gasbildung wurde in den Modellrechnungen nicht berücksichtigt, um die Auswertung zu vereinfachen. Sie findet aber bei einem Lösungszutritt statt (Korrosion der Metallteile) und kann prinzipiell mit dem vorhandenen Instrumentarium berücksichtigt werden. In Abbildung 3.9 sind beispielhaft für ein Bohrloch aus dem HAW-Feld die Mobilisierungsrate und die Anzahl der ausgefallenen Behälter für zwei unterschiedliche Szenarien (siehe Kapitel 3.3) aufgetragen. Im Gegensatz zu den Brennelementen und dem MAW aus den CSD wird für den HAW der Einfluss der Temperatur auf die Mobilisierung berücksichtigt (siehe auch Abbildung 3.10). Der Kurvenverlauf der Mobilisierungsrate zeigt deutlich den Einfluss der Temperatur, die durch einen Arrheniusterm in der Mobilisierungsrate berücksichtigt ist.

² Die Standzeit von 50 Jahren ist willkürlich angenommen worden, beruht aber auf Daten aus [9] für Brennstabkockillen. Es sind beliebige Werte der mittleren Standzeit möglich, beispielsweise auch der Wert Null, wenn ein Ausfall durch mechanisches Versagen unterstellt werden kann.

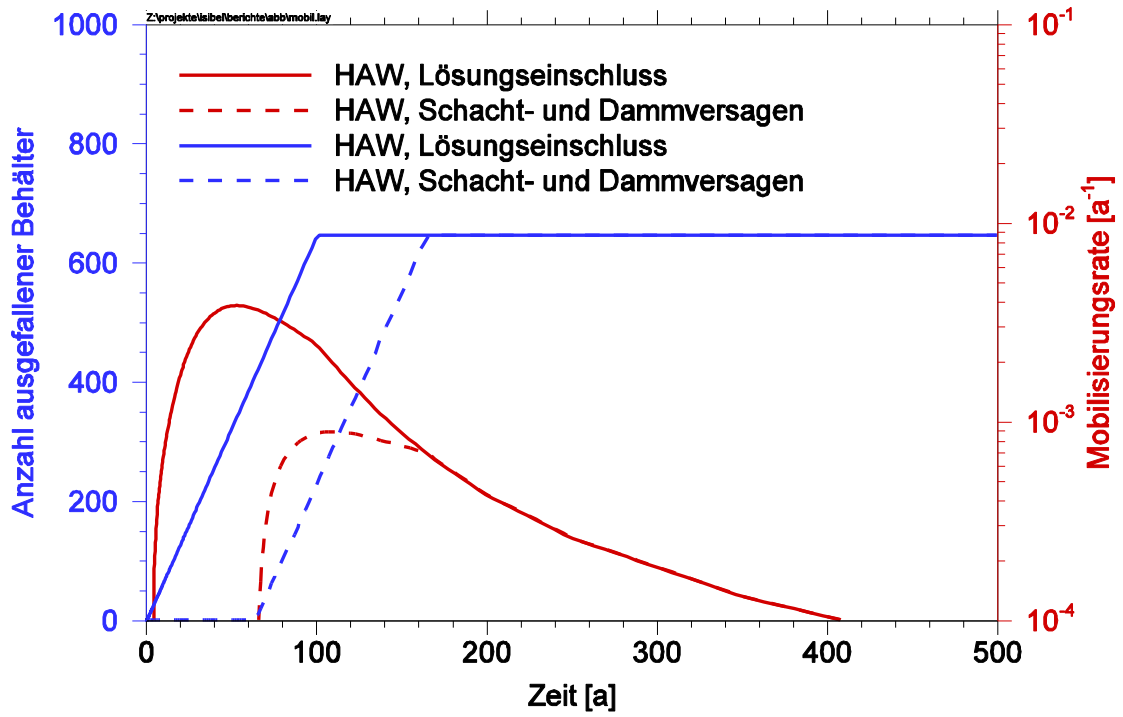


Abb. 3.9 Mobilisierung aus HAW-Kokillen für zwei ausgewählte Szenarien

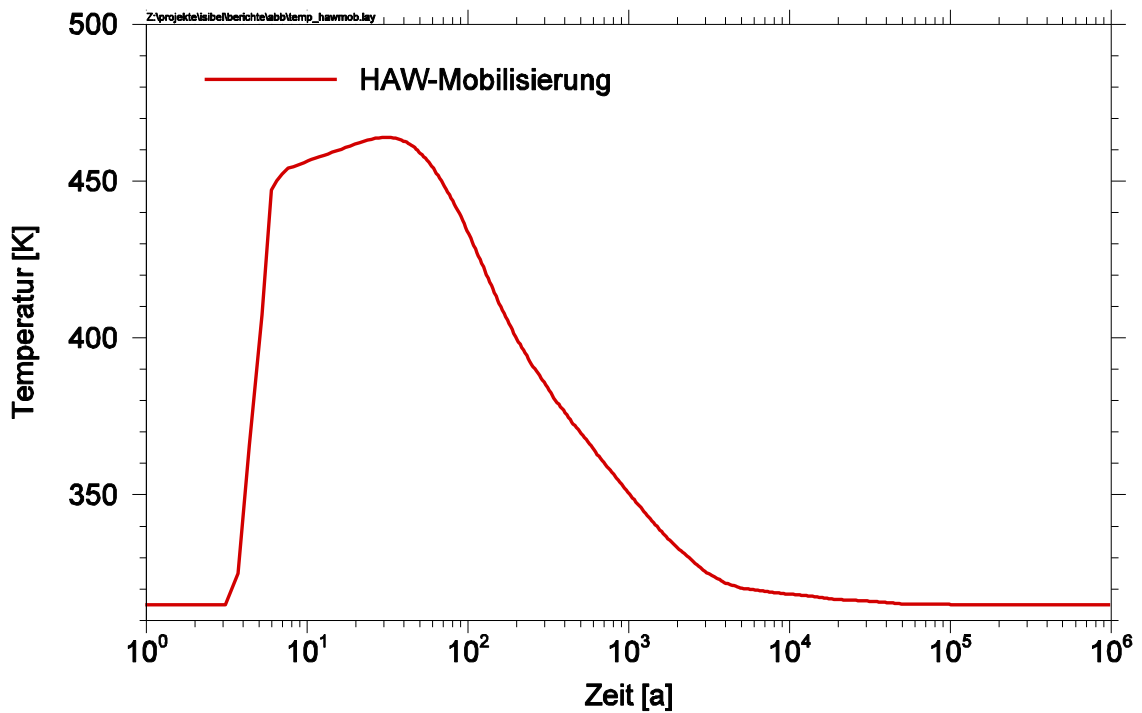


Abb. 3.10 Zeitentwicklung der Temperatur für die Mobilisierung von HAW

Die Mobilisierung der Radionuklide aus den abgebrannten Brennelementen erfolgt aus den folgenden Bereichen [20]:

- die Brennstoffmatrix, aus der die Radionuklide über einen sehr langen Zeitraum (Wert entsprechend experimenteller Ergebnisse: 1 Million Jahre) freigesetzt werden,
- die Metallteile des Brennelementes einschließlich der Hüllrohre der Brennstäbe, aus denen der wesentliche Anteil der Aktivierungsprodukte während einiger hundert Jahre nach dem Ausfall des Behälters freigesetzt wird (einige hundert Jahre gemäß experimenteller Ergebnisse zur Korrosion von Zirkalloy),
- das Inventar, das annähernd instantan nach dem ersten Kontakt mit Wasser freigesetzt wird (instant release fraction, IRF); dies umfasst vor allem den Gasraum und die Kornoberfläche der Brennstoffmatrix.

Für die beiden erstgenannten Bereiche wird eine konstante Mobilisierungsrate angenommen.

Die Verteilung des Radionuklidinventars auf die drei genannten Bereiche des Brennelementes ist in Tabelle 3.8 wiedergegeben. Für jeden Bereich wird eine eigene Mobilisierungsrate definiert, siehe Tabelle 3.9. Neuere experimentelle Ergebnisse des Forschungszentrums Karlsruhe zeigen, dass die Mobilisierung aus den Hüllrohren und den Kopf- und Fußstücken unterschiedlich ablaufen, so dass in Zukunft ein vierter Brennelementebereich, die Kopf- und Fußstücke, modelliert werden sollte.

Tab. 3.8 Elementspezifische Inventaranteile in den einzelnen Bereichen eines LWR-Brennelementes [20]

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

Tab. 3.9 Relative Freisetzungsraten in den Abfallbereichen [20]

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

3.3 Ergebnisse (Konsequenzenanalyse)

Die in diesem Kapitel zusammengestellten Ergebnisse beruhen auf Modellrechnungen mit dem Programmpaket EMOS ([10], [40]). Vorrangiges Ziel der Berechnungen ist es, die Möglichkeiten zur Durchführung von Konsequenzenanalysen anhand der ausgewählten Szenarien zu analysieren und die Vollständigkeit des Instrumentariums zu bewerten. Zu diesem Zweck wurden auch Kombinationen von Szenarien betrachtet, die wegen ihrer sehr geringen Eintrittswahrscheinlichkeit auszuschließen sind. Eine sicherheitstechnische Bewertung der berechneten Modellergebnisse für die verschiedenen betrachteten Szenarien ist daher nicht angebracht. Die nachfolgenden Aussagen zu den Ergebnissen sollen nur eine Orientierung über das Systemverhalten geben und die Bedeutung bestimmter Ereignisabläufe dokumentieren.

Der jeweilige Simulationszeitraum der durchgeführten Modellrechnungen beträgt in Anlehnung an die heutzutage in Deutschland diskutierte Nachweiszeit eine Million Jahre ([3]). Für diesen Zeitraum wurden folgende Szenarien untersucht (Kapitel 2):

- Versagen des Schachtverschlusses,
- Versagen der Streckenverschlüsse zwischen Infrastrukturbereich und restlichen Grubenbauen,
- Zutritt von Lösungen aus begrenzten Lösungseinschlüssen im Wirtsgestein.

Aus diesen drei Grundszenerarien wurden anschließend weitere kombinierte Szenarien abgeleitet. Zusätzlich zu diesen Freisetzungsszenarien wurde für Vergleichszwecke das Referenzszenario gerechnet.

Für die Bewertung der Rechenergebnisse werden als Funktionsindikatoren der Zeitpunkt der Freisetzung von Lösung aus dem Schacht und die während der Simulationszeit freigesetzte Lösungsmenge eingesetzt. Es wird dabei angenommen, dass die Freisetzung nur über die flüssige Phase erfolgt, jedoch nicht über die Gasphase. Ein Transport von Radionukliden in der Gasphase ist beispielsweise für Radiokohlenstoff, Jod oder Radon möglich. Von Relevanz ist in einem HAW-Endlager jedoch hauptsächlich Radiokohlenstoff, der bei der Zersetzung von organischen Materialien in großen Mengen entstehen kann und dann in Form von Methan (CH_4) oder Kohlendioxid (CO_2)

in der Gasphase vorliegt. Mit dem vorhandenen Instrumentarium kann der Transport in der Gasphase nicht berechnet werden³.

Die Eingangsdaten für die Berechnung der Szenarien sind unterschiedlichen Dokumenten entnommen. Auf die Modellierung und die Daten zur Grubengebäudestruktur, zu den Abfallinventaren und den Mobilisierungsmodellen sowie zu den Temperaturen wurde bereits in Kapitel 3.2 eingegangen. Die im Folgenden angegebenen Daten entstammen aus den Projekten WIGRU [20] und SAM [9]. Es sei an dieser Stelle nochmals darauf hingewiesen, dass alle Eingangsdaten als generische Daten zu verstehen sind, die nur dazu dienen sollen, die Anwendbarkeit des Instrumentariums zu testen.

Die allgemeinen Daten in Tabelle 3.10 entstammen hauptsächlich der SAM-Studie [9]. Dieser Tabelle ist auch zu entnehmen, ob sich bei den Daten um gemessene Daten oder reine Modellparameter handelt und ob es sich um Daten aus vorhandenen generischen Studien handelt oder ob diese Daten allein für die Berechnungen in diesem Kapitel gültig sind. Die Löslichkeiten der Radionuklide im Grubengebäude sind in Tabelle 3.11 angegeben. Sorption wurde im Grubengebäude nicht berücksichtigt; dies ist aber prinzipiell mit den vorhandenen Modellen in LOPOS möglich.

Für den Fall, dass es zu einem Kontakt zwischen radioaktivem Abfall und Lösung kommt, werden als weitere Indikatoren die Strahlenexposition und der Zeitpunkt des Maximums der Strahlenexposition ausgegeben. Zur Berechnung der jährlichen Strahlenexposition wurden für diese Szenarien in EMOS das Fernfeldmodul CHETLIN [21] mit linearer Sorption (Allgemeine Daten siehe Tabelle 3.12, k_d -Werte siehe Tabelle 3.13) und das Biosphärenmodell EXCON [25] (Dosiskonversionsfaktoren siehe Tabelle 3.14) im Anschluss an das Nahfeldmodell LOPOS [15] verwendet. Dabei werden Sorption, Verdünnung und radioaktiver Zerfall im Deckgebirge und im Grundwasserleiter berücksichtigt.

³ Dies gilt streng genommen für das Modul LOPOS aus dem Programmpaket EMOS, das keinen Gasfluss berechnen kann. International gibt es Programme, die einen Zweiphasenfluss in einem Grubengebäude berechnen können, beispielsweise das Programm KAFKA der Firma Colenco. In diesen Programmen ist dann aber die Berechnung der Mobilisierung und des Transports von Radionukliden nur eingeschränkt möglich.

Die berechneten Strahlenexpositionen werden im Rahmen dieses Projektes allerdings nicht als Sicherheitsindikator interpretiert, sie gelten vielmehr wie die anderen beschriebenen Größen als Vergleichsgrößen zur Beurteilung der verschiedenen Szenarien und zur Überprüfung der Vollständigkeit des verwendeten Instrumentariums.

Tab. 3.10 Allgemeine Daten für das Nahfeldmodul LOPOS

Parameter	Dimension	Wert	Typ
mittlere Gesteinsdichte	kg/m ³	2 300*	a
mittlere Dichte der Lösung	kg/m ³	1 200*	a
dynamische Zähigkeit der Lösung	Pa·s	1,5·10 ^{-3*}	a
Referenzniveau	m u. GOK	840*	a
Gebirgstemperatur auf dem Referenzniveau	K	310*	a
geothermischer Gradient	K/m	0,03*	a
Gebirgsdruck auf dem Referenzniveau	MPa	18*	a
hydrostatischer Druck auf dem Referenzniveau	MPa	10*	a
Referenzporosität (Porosität, unterhalb der eine Stützwirkung des Versatzes unterstellt wird)	-	0,3*	p
Grenzporosität (Porosität, die durch Konvergenz zu sehr späten Zeiten angestrebt wird)	-	0,001*	p
Referenzkonvergenzrate (Konvergenzrate ohne Wirksamkeit von Stützwirkungen durch Druck, Versatz, usw.)	1/a	0,01*	a
Aktivierungsenergie im Konvergenzansatz	K ⁻¹	6 500*	p
Spannungsexponent	-	4*	a
Parameter der Permeabilitäts-Porositäts-Beziehung	m ²	2,0·10 ^{-9*}	p
Exponent der Permeabilitäts-Porositäts-Beziehung	-	4,5*	p
Schachtpermeabilität	m ²	10 ⁻¹⁷	
Permeabilität der Streckenverschlüsse	m ²	10 ⁻¹⁷	
Anfangsporosität der Bohrlochverschlüsse	-	0,3*	
Anfangsporosität des Versatzes	-	0,3*	

a Messdaten bzw. abgeleitete Daten

p Modellparameter

* generische Daten, hauptsächlich aus [9];

Tab. 3.11 Löslichkeiten der Radionuklide im Grubengebäude [mol/m³]

Element	Löslichkeit	Element	Löslichkeit
C	1,0·10 ¹	I	unbeschränkt
Cl	unbeschränkt	Cs	unbeschränkt
Co	unbeschränkt	Sm	1,0·10 ⁻¹
Ni	1,0·10 ⁻¹	Eu	unbeschränkt
Se	1,0·10 ⁻¹	Pb	unbeschränkt
Rb	unbeschränkt	Ra	1,0·10 ⁻³
Sr	1,0·10 ⁰	Th	1,0·10 ⁻³
Zr	1,0·10 ⁻³	Pa	1,0·10 ⁻³
Cd	unbeschränkt	U	1,0·10 ⁻¹
Nb	1,0·10 ⁻¹	Np	1,0·10 ⁻²
Mo	1,0·10 ⁻¹	Pu	1,0·10 ⁻³
Tc	1,0·10 ⁻¹	Am	1,0·10 ⁻²
Pd	1,0·10 ⁻¹	Cm	1,0·10 ⁻²
Sn	1,0·10 ⁻¹		

Generische Daten aus [9]; Daten sind für konkreten Standort zu aktualisieren

Tab. 3.12 Allgemeine Daten für das Deckgebirge (eindimensionaler Transport)

Parameter	Dimension	Wert
Länge des Modellgebietes	m	9394
Querschnittsfläche des Gebietes	m ²	36 900
natürlicher Grundwasserstrom	m ³ /a	48 000
Dispersionslänge	m	65
molekularer Diffusionskoeffizient	m ² /a	10 ⁻²⁰
Porosität	-	0,2
Gesteinsdichte	kg/m ³	2 500

Generische Daten aus [9]; Daten sind für konkreten Standort zu aktualisieren

Tab. 3.13 Sorptionskoeffizienten für das Deckgebirge

Element	Sorptionskoeffizient [m ³ /kg]	Element	Sorptionskoeffizient [m ³ /kg]
C	5,0·10 ⁻³	Sm	1,0
Cl	1,0	Eu	1,0
Ni	1,0·10 ⁻²	Pb	4,0·10 ⁻²
Se	3,0·10 ⁻⁴	Po	1,0
Rb	1,0·10 ⁻³	Ra	9,0·10 ⁻⁴
Sr	5,0·10 ⁻⁴	Ac	4,0·10 ⁻²
Zr	1,0·10 ⁻¹	Th	3,0·10 ⁻¹
Nb	1,0·10 ⁻¹	Pa	1,0
Mo	1,0·10 ⁻³	U	2,0·10 ⁻³
Tc	7,0·10 ⁻³	Np	3,0·10 ⁻²
Pd	1,0·10 ⁻²	Pu	1,0
Sn	2,0·10 ⁻¹	Am	1,0
I	5,0·10 ⁻⁴	Cm	1,0
Cs	1,0·10 ⁻³		

Generische Daten aus [9]; Daten sind für konkreten Standort zu aktualisieren

Tab. 3.14 Dosiskonversionsfaktoren für die Biosphäre (Personengruppe > 17 Jahre)
aus [1]

Nuklid	Dosiskonversionsfaktor [(Sv/a)/(Bq/m ³)]	Nuklid	Dosiskonversionsfaktor [(Sv/a)/(Bq/m ³)]
C-14	4,6·10 ⁻⁸	Am-241	8,0·10 ⁻⁷
Cl-36	3,5·10 ⁻⁸	Np-237	4,7·10 ⁻⁶
Co-60	3,9·10 ⁻⁶	U-233	3,9·10 ⁻⁶
Ni-59	4,9·10 ⁻⁹	Pa-233	8,8·10 ⁻⁹
Ni-63	1,1·10 ⁻⁹	Th-229	1,7·10 ⁻⁵
Se-79	3,4·10 ⁻⁷	Ra-225	1,1·10 ⁻⁷
Sr-90	1,8·10 ⁻⁷	Ac-225	3,7·10 ⁻⁸
Zr-93	3,7·10 ⁻⁸	Pu-242	9,4·10 ⁻⁷
Nb-94	3,1·10 ⁻⁶	Am-242	7,6·10 ⁻⁷
Mo-93	3,2·10 ⁻⁷	Pu-238	7,5·10 ⁻⁷
Tc-99	8,8·10 ⁻⁹	U-238	7,1·10 ⁻⁷
Sn-126	1,6·10 ⁻⁵	Th-234	4,8·10 ⁻⁹
I-129	5,6·10 ⁻⁷	U-234	1,4·10 ⁻⁶
Cs-135	5,7·10 ⁻⁸	Th-230	3,7·10 ⁻⁵
Cs-137	9,5·10 ⁻⁷	Ra-226	3,0·10 ⁻⁵
Sm-151	3,2·10 ⁻¹⁰	Pb-210	2,3·10 ⁻⁶
Cm-244	3,8·10 ⁻⁷	Po-210	4,9·10 ⁻⁶
Pu-240	9,6·10 ⁻⁷	Am-243	2,0·10 ⁻⁶
U-236	5,6·10 ⁻⁷	Pu-239	9,8·10 ⁻⁷
Th-232	1,1·10 ⁻⁴	U-235	3,3·10 ⁻⁶
Ra-228	2,4·10 ⁻⁶	Pa-231	4,0·10 ⁻⁵
U-232	5,4·10 ⁻⁶	Ac-227	1,0·10 ⁻⁵
Th-228	1,3·10 ⁻⁶	Th-227	1,9·10 ⁻⁸
Cm-245	1,4·10 ⁻⁶	Ra-223	1,1·10 ⁻⁷
Pu-241	1,8·10 ⁻⁸		

Für die Szenarien, in der es zu einer Freisetzung von Radionukliden kommt, werden zusätzliche Indikatoren aus Kapitel 3.1 betrachtet, die zum gegenwärtigen Zeitpunkt mit den vorhandenen Werkzeugen der Langzeitsicherheitsanalyse berechnet werden können. Dies geschieht beispielhaft für das kombinierte Szenario „Gemeinsames Schacht- und Dammversagen“. Für die Ausgabe der anderen in Kapitel 3.1 beschriebenen Indikatoren müssen noch entsprechende Postprocessing-Werkzeuge erarbeitet werden. Eine Beurteilung des dafür erforderlichen Aufwandes erfolgt in Kapitel 4.

3.3.1 Referenzszenario

Die wahrscheinliche Entwicklung des Endlagerstandortes wird durch das Referenzszenario beschrieben (siehe Kapitel 2.2), d.h. die Entwicklung des Standorts ist zu keinem Zeitpunkt gestört, beispielsweise weder durch einen Lösungszutritt aus einem Lösungseinschluss oder einen Lösungszutritt von außen. In diesem Szenario kommt es während der Simulationszeit nicht zu einer Freisetzung von Radionukliden in die Biosphäre (Tabelle 3.15).

Tab. 3.15 Ergebnisse aus dem Referenzszenario

Rechenlauf	Beginn der Freisetzung von Lösung [a]	Freigesetzte Lösungsmenge [m ³]	Max. effektive Strahlenexposition [Sv/a]	Zeitpunkt des Maximums [a]
Referenzlauf	891,1	989,6	0	-

Es gelangt nur wenig Lösung über den Schachtverschluss in den Infrastrukturbereich des Endlagerbergwerkes. Die Kompaktion lösungsgefüllter Hohlräume durch die Konvergenz und die damit verbundene Zunahme der Strömungswiderstände in den Strecken führen zu einer Strömungsumkehr des Lösungsstroms nach ca. 900 Jahren. Am Ende der Simulationszeit sind lediglich der Infrastrukturbereich und benachbarte Streckensegmente gefüllt (blaue Bereiche in Abbildung 3.11). Wegen der angenommenen Grenzporosität bleiben diese Bereiche auch nach einer Million Jahre noch mit einer geringen Menge Lösung gefüllt. Da die Lösung nicht soweit in das Grubengebäude eingedrungen ist, dass sie mit den Abfällen in Kontakt treten konnte, werden keine Radionuklide freigesetzt.

Wie in Kapitel 2.2 ausgeführt, wurde nicht das „reale“ Verhalten des Schachtverschlusses abgebildet (konstante Permeabilität über alle Zeiten), sondern aus Gründen des Vergleichs mit den anderen Szenarien eine vollständige Dichtheit des Schachtverschlusses über 50 Jahre unterstellt. Außerdem wurde angenommen, dass der Verschluss den Referenzwert der Permeabilität dann über die gesamte Modellzeit beibehält, obwohl er gemäß Auslegungskriterium nur eine begrenzte Zeit (in der Größenordnung von einigen tausend Jahren) den Anforderungen genügen muss. Es ist eine Weiterentwicklung des Instrumentariums erforderlich, um eine dadurch verursachte Änderung der Permeabilität nach einem bestimmten Zeitpunkt berücksichtigen zu können, siehe Kapitel 4.2.

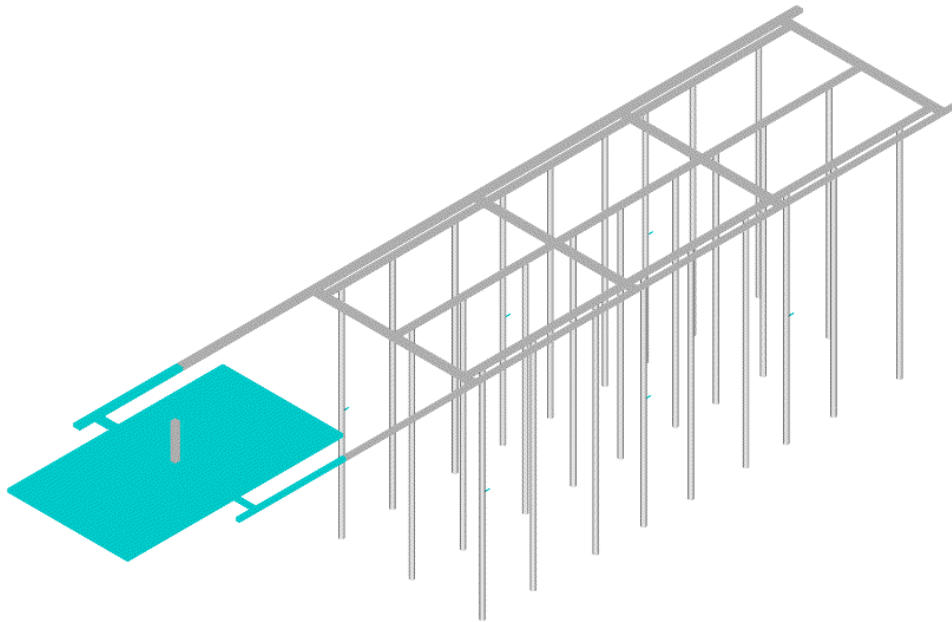


Abb. 3.11 Die mit Lösung gefüllten Bereiche des Grubengebäudes im Referenzszenario nach einer Million Jahre

3.3.2 Versagen des Schachtverschlusses

Im Szenario zum Versagen des Schachtverschlusses wird angenommen, dass nach 50 Jahren die ursprüngliche Verschlusspermeabilität (k_s) von 10^{-17} m^2 um den Faktor 10 auf 10^{-16} m^2 (Variante S1), den Faktor 100 auf 10^{-15} m^2 (Variante S2) bzw. den Faktor 1000 auf 10^{-14} m^2 (Variante S3) ansteigt. Alle anderen Abschlussbauwerke bleiben über den gesamten Simulationszeitraum unverändert, was, wie bereits in Kapitel 3.3.1 ausgeführt, derzeit aus modelltechnischen Gründen nicht anders zu modellieren ist. Diese Modellierung erlaubt jedoch eine genauere Untersuchung der Auswirkungen, die nur auf dem Schachtversagen beruhen. Würde gleichzeitig ein Ausfall der Abschlussbauwerke nach Ende der Auslegungszeit unterstellt, wären die Auswirkungen schwieriger zu diskutieren.

Durch die gegenüber dem Referenzfall höhere Permeabilität des Schachtverschlusses kann mehr Lösung in den Infrastrukturbereich eindringen. Je schneller der Infrastrukturbereich gefüllt ist, desto früher wird auch wieder Lösung nach außen freigesetzt (Tabelle 3.16). Durch die intakten Streckenverschlüsse zwischen dem Infrastrukturbereich und den Zugangsstrecken dringt zwar Lösung in die Richtstrecken vor; die Lösung kann jedoch die Abfälle in den Bohrlöchern im Simulationszeitraum nicht

erreichen. Abbildung 3.12 zeigt dies exemplarisch für den ungünstigsten Fall des Schachtversagens in der Variante S3.

Tab. 3.16 Ergebnisse der Rechenläufe zum Störfallszenario „Versagen des Schachtverschlusses“

Rechenlauf	Beginn der Freisetzung von Lösung [a]	Freigesetzte Lösungsmenge [m ³]	Max. effektive Strahlenexposition [Sv/a]	Zeitpunkt des Maximums [a]
Variante S1 ($k_S = 10^{-16} \text{ m}^2$)	402,0	4 950,7	0	-
Variante S2 ($k_S = 10^{-15} \text{ m}^2$)	154,3	13 283,6	0	-
Variante S3 ($k_S = 10^{-14} \text{ m}^2$)	61,8	21 333,7	0	-

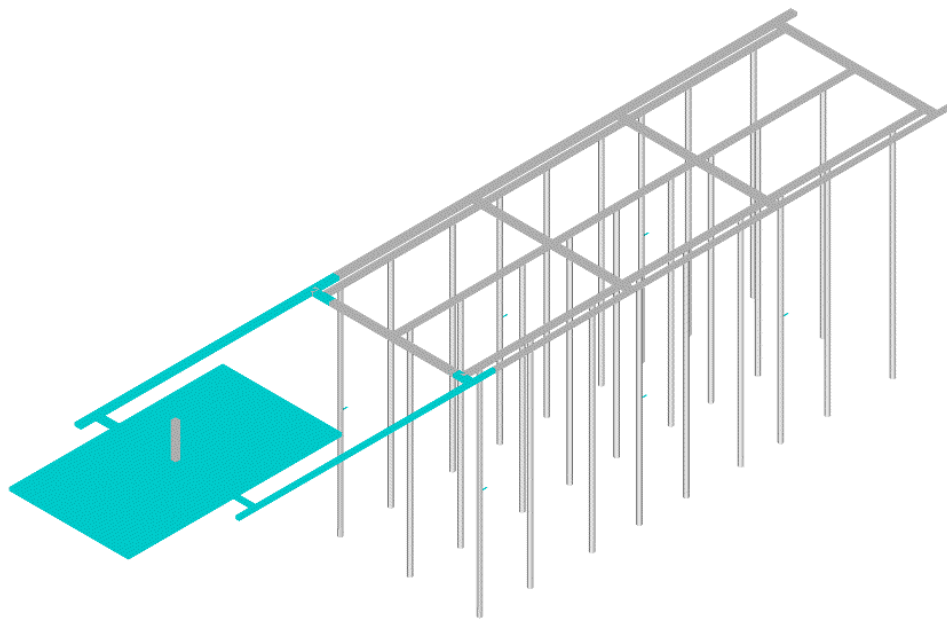


Abb. 3.12 Die gefüllten Bereiche des Grubengebäudes im Szenario „Versagen des Schachtverschlusses (Variante S3)“ nach einer Million Jahre

3.3.3 Versagen der Streckenverschlüsse zwischen Infrastrukturbereich und restlichen Grubenbauen

Das Versagen der Streckenverschlüsse zwischen Infrastrukturbereich und dem restlichen Grubengebäude, die im Folgenden auch als Verschlussbauwerke⁴ bezeichnet werden, hat als alleiniger Prozess nur geringe Auswirkungen auf die Modellergebnisse. Der Beginn der Freisetzung von Lösung und die Menge der freigesetzten Lösung liegen im Bereich der Werte des Referenzszenarios. Eine Freisetzung von Radionukliden findet demnach auch bei einer Erhöhung der Permeabilitäten der Verschlussbauwerke (k_D) um den Faktor 10 auf 10^{-16} m^2 (Variante D1), den Faktor 100 auf 10^{-15} m^2 (Variante D2) bzw. den Faktor 1000 auf 10^{-14} m^2 (Variante D3) nicht statt (Tabelle 3.17).

Tab. 3.17 Ergebnisse der Rechenläufe zum Störfallszenario „Versagen der Streckenverschlüsse zwischen Infrastrukturbereich und restlichen Grubenbauen“ (kurz Versagen der Streckenverschlüsse)

Rechenlauf	Beginn der Freisetzung von Lösung [a]	Freigesetzte Lösungsmenge [m^3]	Max. effektive Strahlenexposition [Sv/a]	Zeitpunkt des Maximums [a]
Variante D1 ($k_D = 10^{-16} \text{ m}^2$)	857,8	990,1	0	-
Variante D2 ($k_D = 10^{-15} \text{ m}^2$)	845,9	984,6	0	-
Variante D3 ($k_D = 10^{-14} \text{ m}^2$)	845,4	985,6	0	-

Abbildung 3.13 zeigt, dass die Lösung gegenüber dem Referenzszenario weiter in das Grubengebäude vorgedrungen ist. Die Abfälle werden aber auch im ungünstigsten Fall nicht erreicht (Variante D3).

⁴ Einige Verschlussbauwerke werden auch als Dämme bezeichnet, daher wird im Folgenden als Kürzel ein D verwendet.

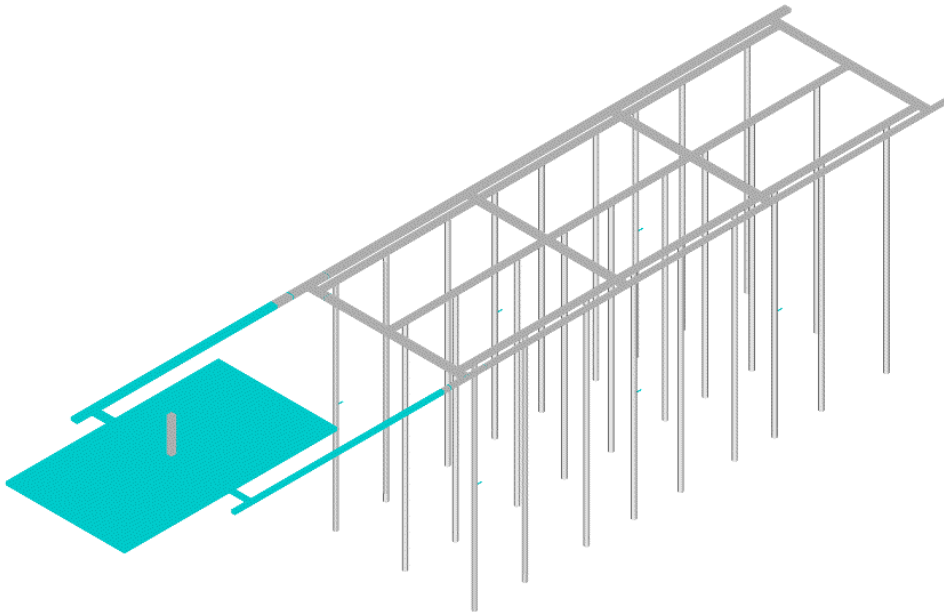


Abb. 3.13 Die gefüllten Bereiche des Grubengebäudes im Szenario „Versagen der Streckenverschlüsse (Variante D3)“ nach einer Million Jahre

3.3.4 Lösungszutritt aus begrenzten Lösungseinschlüssen

Bei Berücksichtigung eines Lösungszutritts aus Lösungseinschlüssen (LE) im Wirtsgestein als mögliche gestörte Entwicklung des Endlagersystems weichen das Konvergenzverhalten der lösungsgefüllten Bohrlöcher und damit die Lösungsströme durch das Grubengebäude von den bisher betrachteten Szenarien ab: Während bei den bisher betrachteten Szenarien nur Lösung von außen – d.h. aus Richtung des Infrastrukturbereichs, der über den Schacht Verbindung zum Deckgebirge hat – eindringen kann und somit einen vergleichsweise langen Weg zum eingelagerten Abfall hat, ist bei einem Lösungszutritt aus einem Lösungseinschluss ein direkter Kontakt zwischen eingelagertem Abfall und Lösung möglich.

Im betrachteten Szenario werden sechs Lösungseinschlüsse mit jeweils 100 m^3 Lösung angenommen, die an verschiedenen Stellen im Grubengebäude angetroffen werden und jeweils im Kontakt mit einem mit Abfall gefüllten Bohrloch stehen (Abbildung 3.14). Dieser Lösungszutritt „von innen“ hat für die Langzeitsicherheit des Endlagers zwei wichtige Effekte: Neben dem sofortigen Kontakt der Lösung mit dem radioaktiven Abfall verlangsamt der sich aufbauende Fluiddruck die Konvergenz der lösungsgefüllten Bohrlöcher. Je nach Strömungswiderstand in den Bohrlochstopfen kann der Fluid-

ruck deutlich über den hydrostatischen Druck der Flüssigkeitssäulen steigen.⁵ Die langsamere Konvergenz ermöglicht dann einen Lösungsaustausch zwischen Bohrlöchern und Beschickungsstrecken über einen längeren Zeitraum.

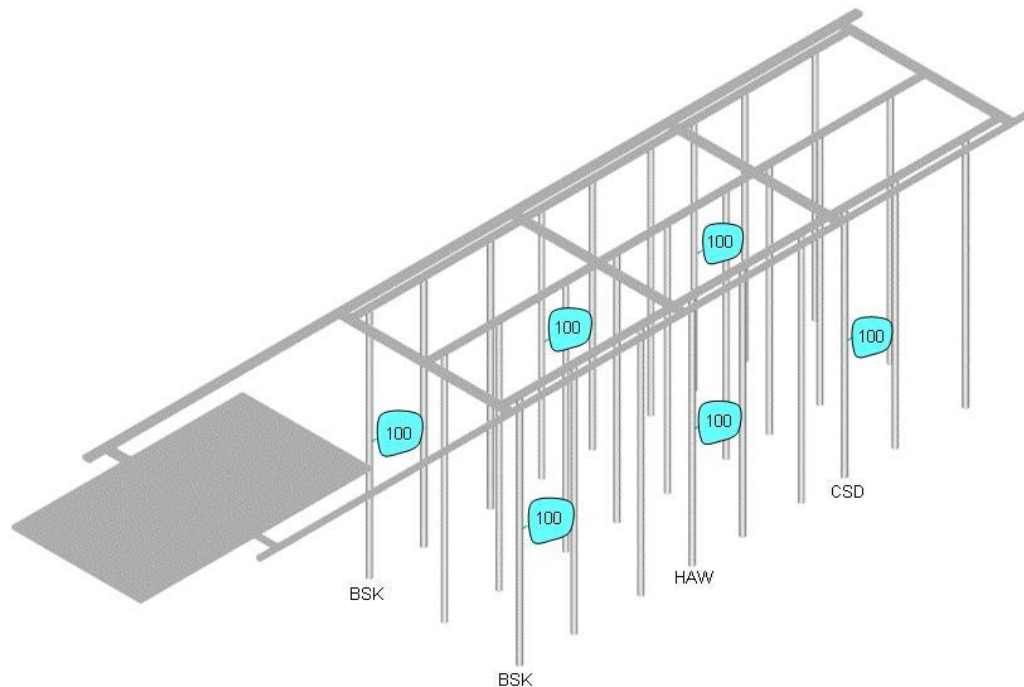


Abb. 3.14 Lage der sechs Lösungseinschlüsse (jeweils 100 m³ Lösung)

Wie in Tabelle 3.18 ersichtlich, kommt es bei der modellierten Verteilung von Lösungseinschlüssen infolge dieser Effekte auch zu einem Austritt von Radionukliden aus dem Endlagerbergwerk.

Tab. 3.18 Ergebnisse des Szenarios „Lösungszutritt aus begrenzten Lösungseinschlüssen“

Rechenlauf	Beginn der Freisetzung von Lösung [a]	Freigesetzte Lösungsmenge [m ³]	Max. effektive Strahlenexposition [Sv/a]	Zeitpunkt des Maximums [a]
Variante LE	887,1	1 137,4	3,43·10 ⁻⁶	2,521·10 ⁶

⁵ Der hydrostatische Druck der Flüssigkeitssäule in den Bohrlöchern beträgt in der Mitte der Bohrlöcher etwa 1,8 MPa. Dieser Druck steigt hydraulisch auf einen Wert von ca. 20 MPa an.

Die maximale Strahlenexposition tritt erst sehr spät nach mehr als einer Million Jahre auf. Zu diesem Zeitpunkt tritt aber nur noch sehr wenig Lösung aus dem Grubengebäude aus, so dass die errechneten effektiven Strahlenexpositionen gering sind und durch Diffusion aus dem Grubengebäude verursacht werden (Abbildung 3.15). Für die Freisetzungsszenarien wurde deshalb der Simulationszeitraum auf 10^7 erhöht, um die diffusive Freisetzung aus dem Grubengebäude mit zu berücksichtigen (Abbildung 3.16).

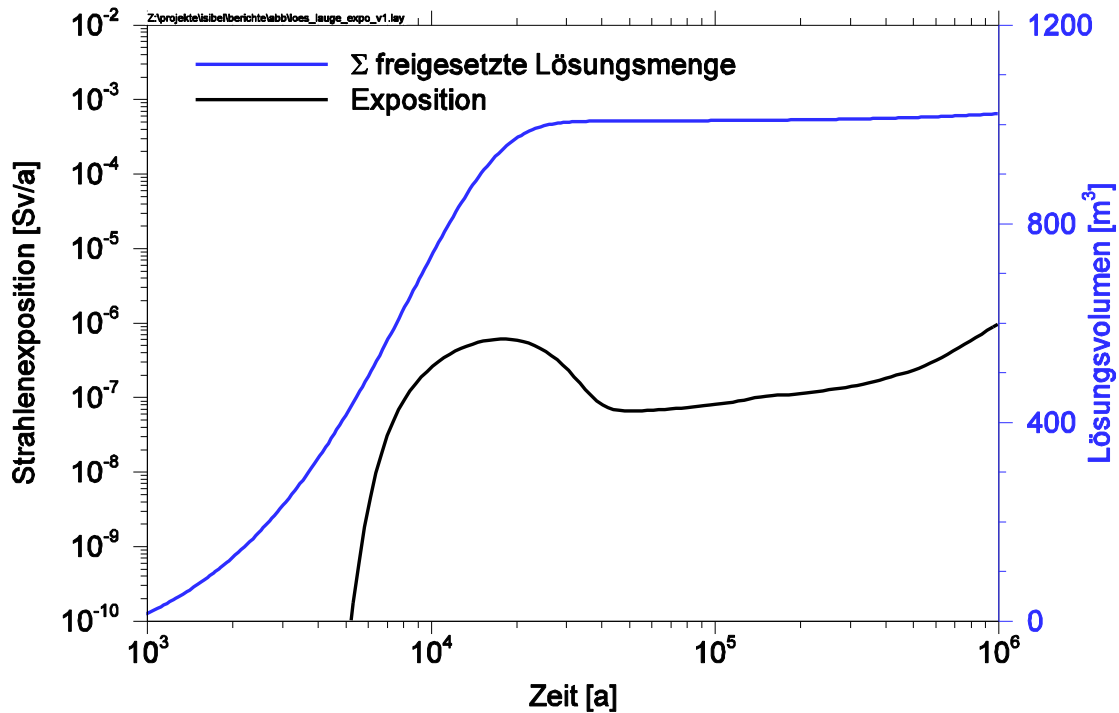


Abb. 3.15 Zeitliche Entwicklung der Strahlenexposition und Summenkurve der freigesetzten Lösungsmenge für das Szenario „Lösungszutritt aus begrenzten Lösungseinschlüssen“

3.3.5 Kombinierte Szenarien

Bei den kombinierten Szenarien gilt es zu unterscheiden zwischen Szenarien mit und ohne begrenzten Lösungseinschluss, da diese sich in ihrem Modellverhalten unterscheiden (Kapitel 3.3.4). Zuerst wird das gemeinsame Versagen des Schachtverschlusses und der Streckenverschlüsse untersucht, mit einer Erhöhung der Permeabilitäten des Schachtverschlusses und der Streckenverschlüsse um jeweils den Faktor 10 (Variante SD1 auf 10^{-16} m^2), den Faktor 100 (Variante SD2 auf 10^{-15} m^2) bzw. den Faktor 1000 (Variante SD3 auf 10^{-14} m^2).

Anschließend werden die Fälle Versagen des Schachtverschlusses und Lösungszutritt aus Lösungseinschlüssen (SLE), Versagen der Streckenverschlüsse und Lösungszutritt aus Lösungseinschlüssen (DLE) sowie gemeinsames Versagen des Schachtverschlusses und der Streckenverschlüsse und Lösungszutritt aus Lösungseinschlüssen (SDLE) untersucht. Damit der Umfang der Rechenergebnisse nicht zu unübersichtlich wird, werden die Permeabilitäten für den Schachtverschluss bzw. die Streckenverschlüsse direkt von 10^{-17} auf 10^{-14} m^2 erhöht.

Tab. 3.19 Ergebnisse der kombinierten Szenarien für die gestörten Entwicklungen

Rechenlauf	Beginn der Freisetzung von Lösung [a]	Freigesetzte Lösungsmenge [m^3]	Max. effektive Strahlenexposition [Sv/a]	Zeitpunkt des Maximums [a]
Variante SD1 ($k_S, k_D = 10^{-16} \text{ m}^2$)	417,1	5 007,9	-	0
Variante SD2 ($k_S, k_D = 10^{-15} \text{ m}^2$)	153,6	14 315,0	-	0
Variante SD3 ($k_S, k_D = 10^{-14} \text{ m}^2$)	83,6	28 822,2	$3,37 \cdot 10^{-4}$	$5,33 \cdot 10^4$
Variante SLE $k_S = 10^{-14} \text{ m}^2$ $k_D = 10^{-17} \text{ m}^2$	61,9	21 715,1	$8,57 \cdot 10^{-6}$	$1,77 \cdot 10^4$
Variante DLE $k_S = 10^{-17} \text{ m}^2$ $k_D = 10^{-14} \text{ m}^2$	839,7	1 314,1	$4,30 \cdot 10^{-6}$	$9,74 \cdot 10^3$
Variante SDLE ($k_S, k_D = 10^{-14} \text{ m}^2$)	81,2	29 777,2	$1,07 \cdot 10^{-3}$	$4,86 \cdot 10^4$

Alle Szenarien mit einem Lösungszutritt aus begrenzten Lösungseinschlüssen und das Szenario eines gemeinsamen Versagens des Schachtverschlusses und der Streckenverschlüsse führen zu einem Austritt von Radionukliden aus dem Grubengebäude. Alle diese Szenarien sind allerdings als sehr gering wahrscheinlich einzustufen. Abbildung 3.16 vergleicht die resultierenden Strahlenexpositionen. Dabei zeigt sich, dass bei einem gemeinsamen Ausfall aller Verschlussbauwerke in der Biosphäre Expositionen resultieren, die über dem Wert von $0,3 \text{ mSv/a}$ der Strahlenschutzverordnung liegen.

Bleibt zumindest ein Verschlussbauwerk erhalten, bleiben die resultierenden Expositionen unter diesem Wert.⁶

Die Bedeutung des Ausfalls aller Verschlüsse zeigt auch ein Vergleich der Strahlenexposition mit den freigesetzten Lösungsmengen für die Szenarien „Lösungszutritt aus begrenzten Lösungseinschlüssen“ (Abbildung 3.15) und „gemeinsames Versagen des Schachtverschlusses und der Streckenverschlüsse und Lösungszutritt aus Lösungseinschlüssen“ (Abbildung 3.17). Aus dem letzteren Szenario resultiert eine deutlich höhere Strahlenexposition (bis zu drei Größenordnungen) und das bei größeren freigesetzten Lösungsmengen. Bei Szenarien ohne intakte Verschlussbauwerke ist das Grubengebäude nach wenigen Jahren vollständig gefüllt (Abbildung 3.18).

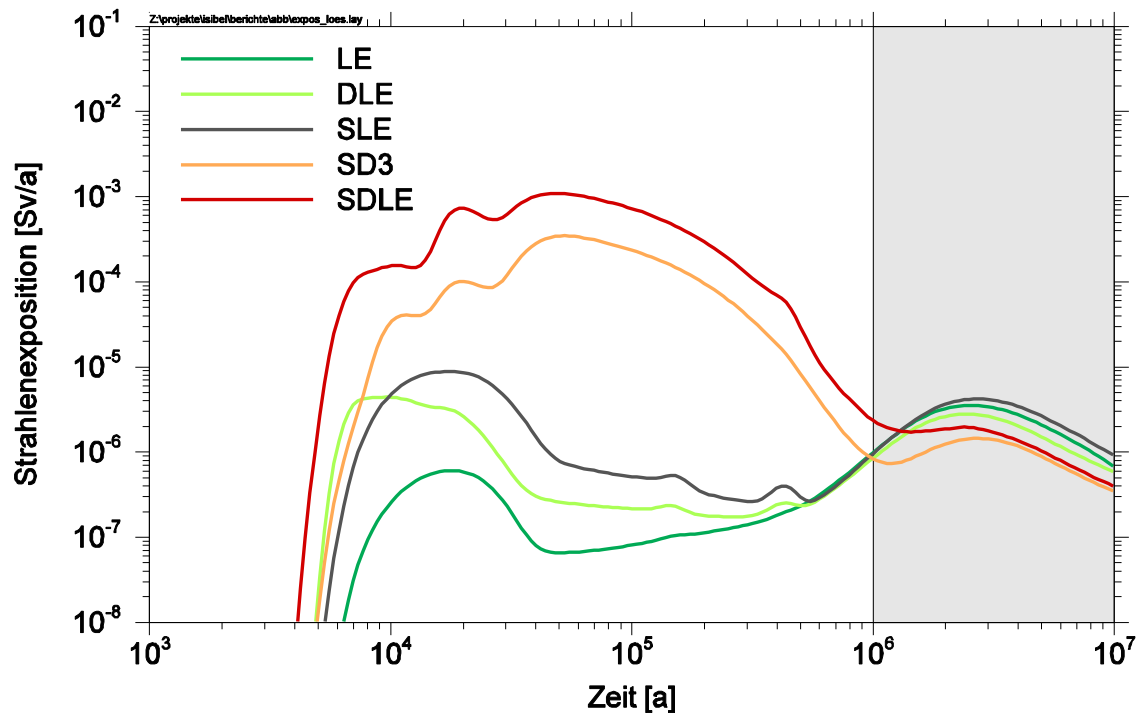


Abb. 3.16 Strahlenexposition für die kombinierten Szenarien mit einer Freisetzung von Radionukliden (Szenarien: LE = Lösungseinschluss, D = Versagen der Streckenverschlüsse (Dämme), S = Versagen des Schachtverschlusses)

⁶ Wie eingangs erwähnt, dienen die Berechnungen in diesem Kapitel nicht einer Bewertung der Szenarien im Sinne der Strahlenschutzverordnung und die berechneten Strahlenexpositionen werden nur zum Vergleich verwendet.

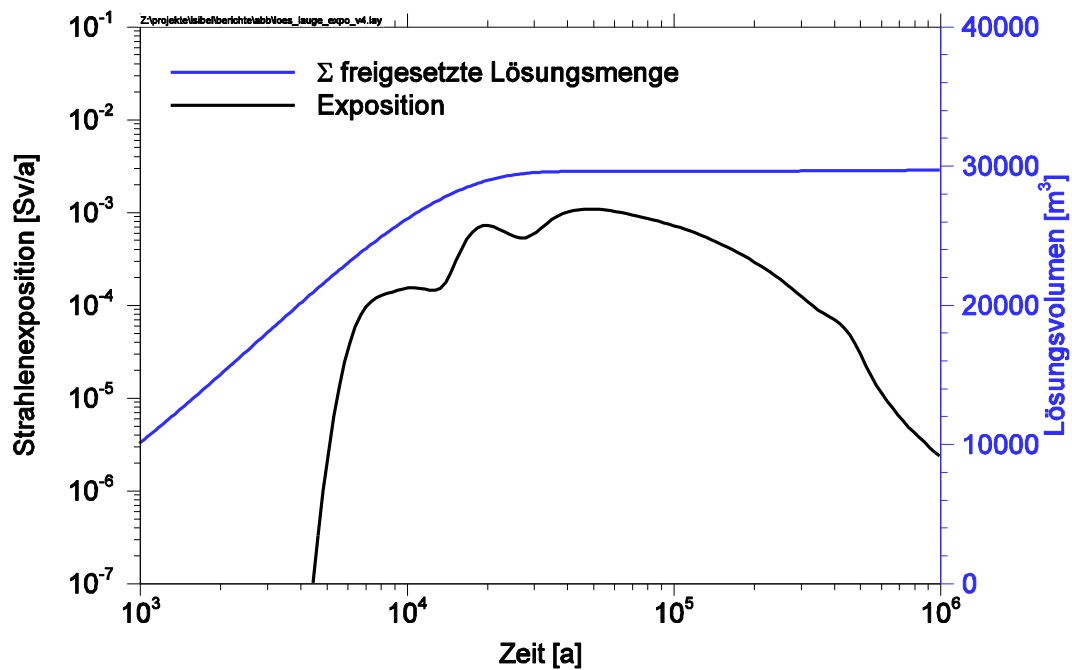


Abb. 3.17 Zeitliche Entwicklung der Strahlensexposition und Summenkurve der freigesetzten Lösungsmenge für das Szenario „gemeinsames Versagen des Schachtverschlusses und der Streckenverschlüsse mit Lösungseinschlüssen (SDLE)“

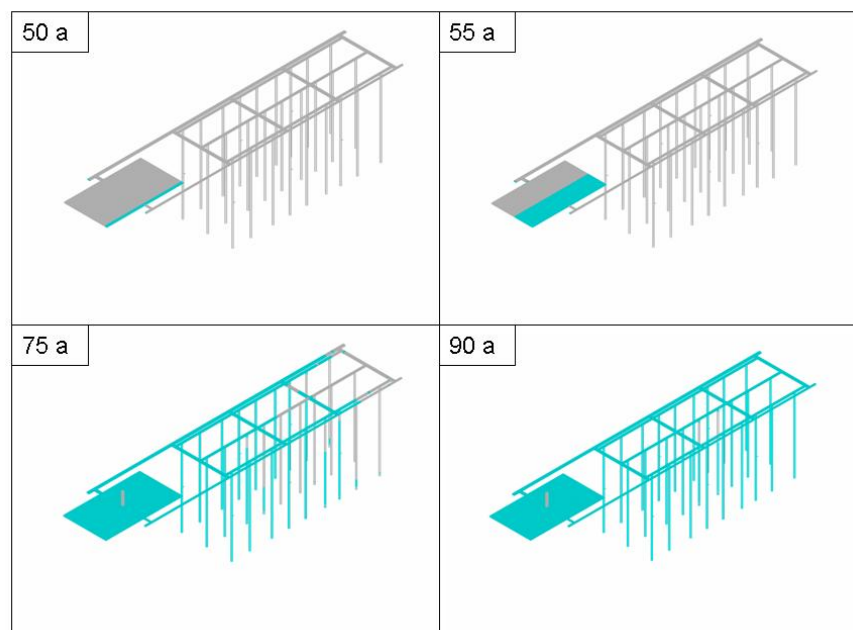


Abb. 3.18 Auffüllung des Grubengebäudes für das Szenario „gemeinsames Versagen des Schachtverschlusses und der Streckenverschlüsse“ nach dem Versagen des Schachtverschlusses

3.3.6 Berechnung weiterer Indikatoren

Alle Szenarien, bei denen es zu einer Freisetzung kommt, sind als wenig wahrscheinlich oder als auszuschließen einzustufen. Insbesondere das Szenario „(frühzeitiges) gemeinsames Versagen des Schachtverschlusses und der Streckenverschlüsse“ ist wegen der sehr geringen Eintrittswahrscheinlichkeit auszuschließen. Es wurde aber für die im Folgenden dargestellten Untersuchungen gewählt, um zu testen, ob die Indikatoren aus Kapitel 3.1, die auf dem Prinzip der Isolation der Abfälle beruhen, mit den Werkzeugen von EMOS zur Zeit angewandt werden können, unabhängig von den derzeit noch stattfindenden kontroversen Diskussionen zu diesen Indikatoren. Es wurde festgestellt, dass zum Teil geeignete Werkzeuge für eine schnelle Auswertung der jeweiligen Modellergebnisse fehlen, um den neuen Indikatoren, z.B. nach [3], gerecht zu werden. Die folgende Auswertung dient als Überblick, was zur Zeit berechnet werden kann und wurde in Anlehnung an Arbeiten des Projekts WIGRU [36] erstellt, in dem diese Werkzeuge entwickelt werden sollen bzw. schon entwickelt worden sind. Eine detaillierte Beschreibung der Indikatoren findet sich in [3].

3.3.6.1 Rückhaltung von Radionukliden im Endlager

Der aus dem Grubengebäude im Nachweiszeitraum freigesetzte Anteil der eingelagerten Radionuklide bezogen auf das Gesamtinventar bei Einlagerung ist in den Tabellen 3.20 und 3.21 wiedergegeben. Für das Gesamtinventar wird die Rückhaltung in mol% berechnet (Tabelle 3.22). Nach [3] sollte die Rückhaltung mindestens 99,99 mol% betragen, d.h. einem Verhältnis von freigesetztem zu eingelagertem Inventar von 10^{-4} entsprechen. Für das betrachtete Szenario „gemeinsames Versagen des Schachtverschlusses und der Streckenverschlüsse“ ist die Rückhaltung 99,983 mol%, für diesen Fall wird das Kriterium also nicht erfüllt, kommt ihm aber sehr nahe. Die Einzelbilanzen werden in der aktuellen Version von EMOS ausgegeben, eine Aufsummierung erfolgt derzeit noch nicht.

Tab. 3.20 Freisetzung der Spalt- und Aktivierungsprodukte für das Szenario „gemeinsames Versagen des Schachtverschlusses und der Streckenverschlüsse“

Nuklid	Inventar [Bq]	Inventar [mol]	freigesetzt [Bq]	freigesetzt [mol]	Verhältnis [-]
C-14	$1,68 \cdot 10^{14}$	$7,27 \cdot 10^{01}$	$9,39 \cdot 10^{13}$	$4,07 \cdot 10^{00}$	$5,59 \cdot 10^{-02}$
Cl-36	$8,50 \cdot 10^{11}$	$1,93 \cdot 10^{01}$	$2,61 \cdot 10^{10}$	$5,92 \cdot 10^{-01}$	$3,07 \cdot 10^{-02}$
Co-60	$4,07 \cdot 10^{16}$	$1,62 \cdot 10^{01}$	-	-	-
Ni-59	$7,08 \cdot 10^{14}$	$4,01 \cdot 10^{03}$	$1,59 \cdot 10^{10}$	$8,98 \cdot 10^{-02}$	$2,24 \cdot 10^{-05}$
Ni-63	$2,46 \cdot 10^{17}$	$1,86 \cdot 10^{03}$	$1,16 \cdot 10^{09}$	$8,79 \cdot 10^{-06}$	$4,73 \cdot 10^{-09}$
Se-79	$8,17 \cdot 10^{13}$	$6,79 \cdot 10^{03}$	$1,64 \cdot 10^{10}$	$1,36 \cdot 10^{00}$	$2,01 \cdot 10^{-04}$
Sr-90	$7,62 \cdot 10^{18}$	$1,65 \cdot 10^{04}$	$8,38 \cdot 10^{07}$	$1,81 \cdot 10^{-07}$	$1,10 \cdot 10^{-11}$
Zr-93	$4,90 \cdot 10^{14}$	$5,55 \cdot 10^{04}$	$1,44 \cdot 10^{08}$	$1,63 \cdot 10^{-02}$	$2,94 \cdot 10^{-07}$
Nb-94	$1,18 \cdot 10^{14}$	$1,79 \cdot 10^{02}$	$4,49 \cdot 10^{10}$	$6,78 \cdot 10^{-02}$	$3,80 \cdot 10^{-04}$
Mo-93	$6,03 \cdot 10^{12}$	$1,60 \cdot 10^{00}$	$8,34 \cdot 10^{10}$	$2,21 \cdot 10^{-02}$	$1,38 \cdot 10^{-02}$
Tc-99	$2,91 \cdot 10^{15}$	$4,62 \cdot 10^{04}$	$6,60 \cdot 10^{10}$	$1,05 \cdot 10^{00}$	$2,27 \cdot 10^{-05}$
Pd-107	$2,22 \cdot 10^{13}$	$1,09 \cdot 10^{04}$	$9,99 \cdot 10^{08}$	$4,90 \cdot 10^{-01}$	$4,49 \cdot 10^{-05}$
Sn-126	$1,17 \cdot 10^{14}$	$2,08 \cdot 10^{03}$	$7,73 \cdot 10^{09}$	$1,37 \cdot 10^{01}$	$6,60 \cdot 10^{-05}$
I-129	$2,16 \cdot 10^{12}$	$2,56 \cdot 10^{03}$	$4,16 \cdot 10^{11}$	$4,94 \cdot 10^{02}$	$1,93 \cdot 10^{-01}$
Cs-135	$7,41 \cdot 10^{13}$	$1,12 \cdot 10^{04}$	$3,12 \cdot 10^{12}$	$4,72 \cdot 10^{02}$	$4,21 \cdot 10^{-02}$
Cs-137	$1,14 \cdot 10^{19}$	$2,59 \cdot 10^{04}$	$7,62 \cdot 10^{09}$	$1,74 \cdot 10^{-05}$	$6,70 \cdot 10^{-10}$
Sm-151	$5,63 \cdot 10^{16}$	$3,77 \cdot 10^{02}$	$5,45 \cdot 10^{09}$	$3,83 \cdot 10^{-05}$	$1,02 \cdot 10^{-07}$

Tab. 3.21 Freisetzung der Radionuklide der Zerfallsreihen für das Szenario „gemeinsames Versagen des Schachtverschlusses und der Streckenverschlüsse“

Nuklid	Inventar [Bq]	Inventar [mol]	freigesetzt [Bq]	freigesetzt [mol]	Verhältnis [-]
Th-Reihe					
Pu-244	$6,09 \cdot 10^{07}$	$3,68 \cdot 10^{-01}$	$5,08 \cdot 10^{04}$	$3,07 \cdot 10^{-04}$	$8,34 \cdot 10^{-04}$
Cm-244	$2,11 \cdot 10^{17}$	$2,88 \cdot 10^{02}$	-	-	-
Pu-240	$3,51 \cdot 10^{16}$	$1,74 \cdot 10^{04}$	$2,47 \cdot 10^{09}$	$1,22 \cdot 10^{-03}$	$7,03 \cdot 10^{-08}$
U-236	$1,68 \cdot 10^{13}$	$2,98 \cdot 10^{04}$	$6,01 \cdot 10^{08}$	$1,06 \cdot 10^{00}$	$3,57 \cdot 10^{-05}$
Th-232	$4,49 \cdot 10^{04}$	$4,77 \cdot 10^{-02}$	$1,52 \cdot 10^{05}$	$1,61 \cdot 10^{-01}$	$3,37 \cdot 10^{00}$
U-232	$8,22 \cdot 10^{11}$	$4,28 \cdot 10^{-03}$	-	-	-
Np-Reihe					
Cm-245	$5,92 \cdot 10^{13}$	$3,80 \cdot 10^{01}$	$2,65 \cdot 10^{09}$	$1,70 \cdot 10^{-03}$	$4,47 \cdot 10^{-05}$
Pu-241	$1,92 \cdot 10^{18}$	$2,08 \cdot 10^{03}$	$2,65 \cdot 10^{09}$	$2,87 \cdot 10^{-06}$	$1,38 \cdot 10^{-09}$
Am-241	$4,01 \cdot 10^{17}$	$1,31 \cdot 10^{04}$	$1,75 \cdot 10^{10}$	$5,73 \cdot 10^{-04}$	$4,37 \cdot 10^{-08}$
Np-237	$7,97 \cdot 10^{13}$	$1,29 \cdot 10^{04}$	$1,94 \cdot 10^{09}$	$3,14 \cdot 10^{-01}$	$2,44 \cdot 10^{-05}$
U-233	$1,38 \cdot 10^{10}$	$1,66 \cdot 10^{-01}$	$7,84 \cdot 10^{08}$	$9,43 \cdot 10^{-03}$	$5,67 \cdot 10^{-02}$
Th-229	$1,55 \cdot 10^{08}$	$9,22 \cdot 10^{-05}$	$7,51 \cdot 10^{08}$	$4,47 \cdot 10^{-04}$	$4,85 \cdot 10^{00}$
U-Reihe					
Cm-246	$1,32 \cdot 10^{14}$	$4,72 \cdot 10^{01}$	$4,20 \cdot 10^{09}$	$1,50 \cdot 10^{-03}$	$3,18 \cdot 10^{-05}$
Pu-242	$1,63 \cdot 10^{14}$	$4,63 \cdot 10^{03}$	$1,37 \cdot 10^{08}$	$3,87 \cdot 10^{-03}$	$8,37 \cdot 10^{-07}$
Am-242	$6,60 \cdot 10^{14}$	$7,03 \cdot 10^{00}$	$2,08 \cdot 10^{05}$	$2,21 \cdot 10^{-09}$	$3,14 \cdot 10^{-10}$
Pu-238	$1,83 \cdot 10^{17}$	$1,21 \cdot 10^{03}$	$8,54 \cdot 10^{05}$	$5,66 \cdot 10^{-09}$	$4,66 \cdot 10^{-12}$
U-238	$1,64 \cdot 10^{13}$	$5,53 \cdot 10^{06}$	$2,51 \cdot 10^{06}$	$8,46 \cdot 10^{-01}$	$1,53 \cdot 10^{-07}$
U-234	$6,14 \cdot 10^{13}$	$1,14 \cdot 10^{03}$	$2,89 \cdot 10^{10}$	$5,36 \cdot 10^{-01}$	$4,71 \cdot 10^{-04}$
Th-230	$2,57 \cdot 10^{10}$	$1,46 \cdot 10^{04}$	$4,70 \cdot 10^{09}$	$2,68 \cdot 10^{-02}$	$1,83 \cdot 10^{-01}$
Ra-226	$2,53 \cdot 10^{08}$	$3,06 \cdot 10^{04}$	$4,18 \cdot 10^{09}$	$5,06 \cdot 10^{-04}$	$1,65 \cdot 10^{01}$
Am-Reihe					
Am-243	$5,24 \cdot 10^{15}$	$2,92 \cdot 10^{03}$	$4,67 \cdot 10^{09}$	$2,60 \cdot 10^{-03}$	$8,90 \cdot 10^{-07}$
Pu-239	$1,86 \cdot 10^{16}$	$3,39 \cdot 10^{04}$	$4,43 \cdot 10^{09}$	$8,07 \cdot 10^{-03}$	$2,38 \cdot 10^{-07}$
U-235	$6,88 \cdot 10^{11}$	$3,66 \cdot 10^{04}$	$3,61 \cdot 10^{07}$	$1,92 \cdot 10^{00}$	$5,26 \cdot 10^{-05}$
Pa-231	$6,10 \cdot 10^{09}$	$1,51 \cdot 10^{-02}$	$7,13 \cdot 10^{07}$	$1,76 \cdot 10^{-04}$	$1,17 \cdot 10^{-02}$

Tab. 3.22 Gesamte Freisetzung des Inventars im Grubengebäude

Nuklid	Inventar [Bq]	Inventar [mol]	freigesetzt [Bq]	freigesetzt [mol]	Verhältnis (mol) Freisetzung zu Inventar
Gesamt	$2,21 \cdot 10^{19}$	$5,87 \cdot 10^{06}$	$1,33 \cdot 10^{13}$	$9,79 \cdot 10^{02}$	$1,667 \cdot 10^{-04}$

3.3.6.2 Veränderung der Konzentration der Elemente Uran und Thorium in der Randzone des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches

Die über den Schacht aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich freigesetzten Radionuklidmengen und die daraus resultierenden Konzentrationen am Rand des einschlusswirksamen Gebirgsbereichs werden in EMOS bislang für jedes Radionuklid einzeln aufgeführt. Die ausgegebene Einheit ist dabei Bq/m^3 . Deshalb müssen für diesen Indikator alle Konzentrationen der Uran- bzw. Thoriumisotope in die gewünschte Einheit konvertiert und aufsummiert werden. Die berechneten maximalen Konzentrationen für Thorium und Uran treten nach etwa 160 000 Jahren auf und betragen etwa $9 \mu\text{g/l}$ bzw. $95 \mu\text{g/l}$ (Abbildung 3.19 bzw. 3.20). Sie sind aufgrund der – gemäß der Berechnungsvorschrift des Indikators – fehlenden Barrieren höher als natürliche Konzentrationen (Uran- und Thoriumkonzentrationen in natürlichen Wässern liegen zwischen $0,01$ und $1 \mu\text{g/l}$), da für den Indikator angenommen wird, dass das gesamte freigesetzte Inventar an Uran und Thorium an einer einzigen Stelle freigesetzt und unverdünnt in die Geosphäre entlassen wird. Hinzu kommt, dass Sorption im Grubengebäude nicht berücksichtigt wurde.

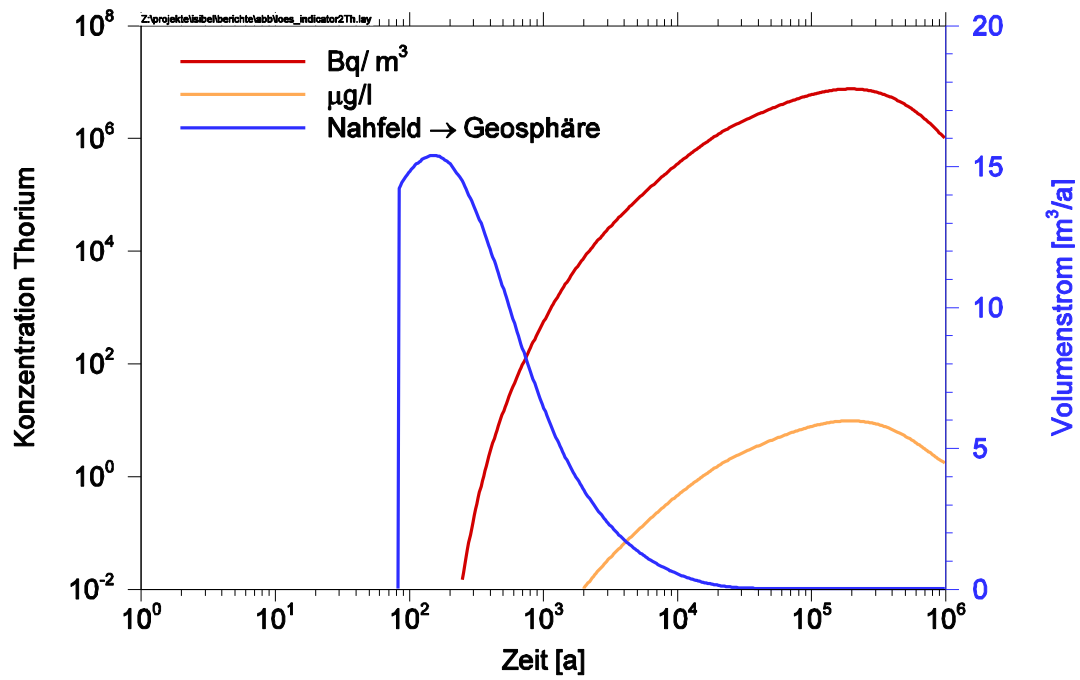


Abb. 3.19 Zeitlicher Verlauf der aus dem Grubengebäude freigesetzten Lösungsmenge und der entsprechenden Thorium-Gesamtkonzentration [in Bq/m^3 und $\mu\text{g}/\text{l}$]

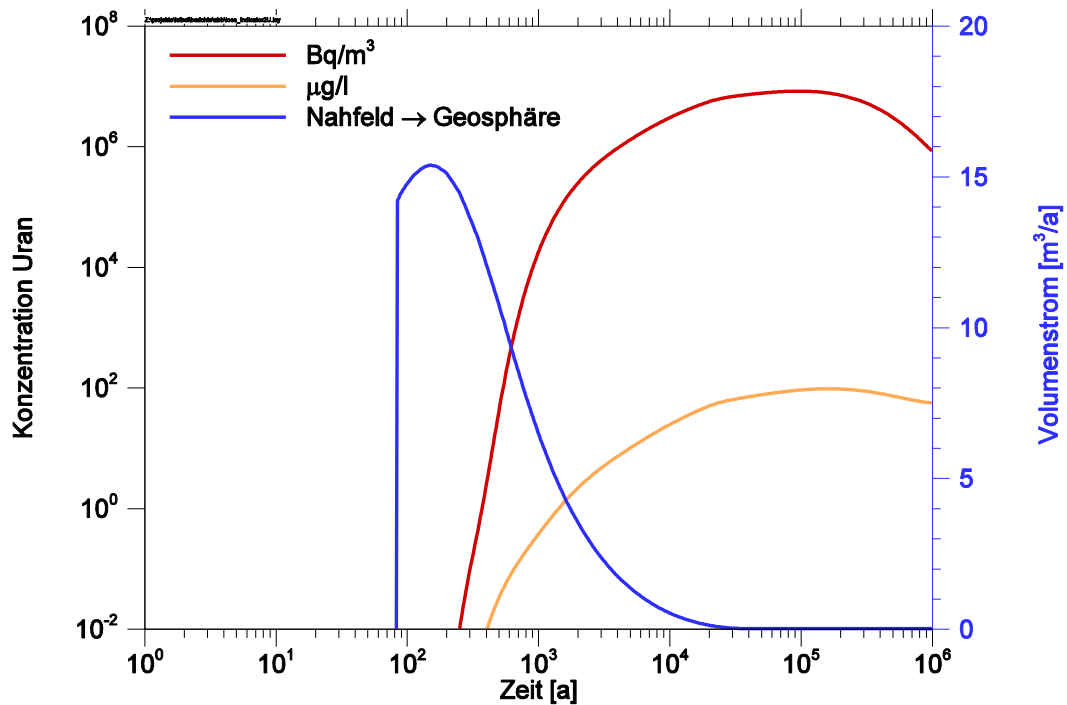


Abb. 3.20 Zeitlicher Verlauf der aus dem Grubengebäude freigesetzten Lösungsmenge und der entsprechenden Uran-Gesamtkonzentration [in Bq/m^3 und $\mu\text{g}/\text{l}$]

3.3.6.3 Beitrag zur Energiedichte aufgrund radioaktiver Strahlung im Porenwasser der Randzone des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches durch aus dem Endlager freigesetzte Radionuklide

Der Indikator „Beitrag zur Energiedichte aufgrund radioaktiver Strahlung im Porenwasser der Randzone des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches durch aus dem Endlager freigesetzte Radionuklide“ kann mit den bisherigen Werkzeugen noch nicht berechnet werden.

3.3.6.4 Radiotoxizität der aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich freigesetzten Radionuklide

Um den Radiotoxizitätsstrom aus dem Nahfeld bewerten zu können, wurde mit dem Modul EXMAS aus den Radionuklidströmen aus dem Grubengebäude eine Exposition unter Verwendung der Dosiskonversionsfaktoren aus Tabelle 3.14 berechnet. EXMAS unterscheidet sich von dem Modul EXCON nur insofern, dass die Strahlenexposition aus den Radionuklid-Massenströmen und nicht aus Radionuklidkonzentrationen (im oberflächennahen Grundwasser) berechnet wird. Die Verdünnung wurde aus einem Volumenstrom in der Geosphäre von 15 000 m³/a berechnet⁷. Da dieser Wert linear in die berechnete Strahlenexposition eingeht, ist die Ermittlung des Volumenstroms wichtig für ein zukünftiges Genehmigungsverfahren. Dosisbestimmende Radionuklide sind vor allem C-14 und CS-137 bis zu einem Zeitpunkt von etwa 25 000 Jahren, danach bestimmen die Radionuklide Ra-226 und Th-226 die Strahlenexposition. Im Zeitraum zwischen 100 und 25 000 Jahren liegen die Toxizitäten über dem Wert gemäß der Strahlenschutzverordnung [3].

⁷ In [3] wird vorgeschlagen, die Radiotoxizität aus der Division der berechneten Radionuklidströme durch den jährlichen Wasserbedarf der kritischen Gruppe und Multiplikation mit den Dosiskonversionsfaktoren zu bestimmen. Hier wurde alternativ zur Division durch den jährlichen Wasserbedarf mit einer Verdünnung von 15 000 m³/a gerechnet. Dieser Wert ist willkürlich gewählt, aber in der Größenordnung von natürlich auftretenden Grundwasserströmen über Salzstöcken wie am Referenzstandort [9].

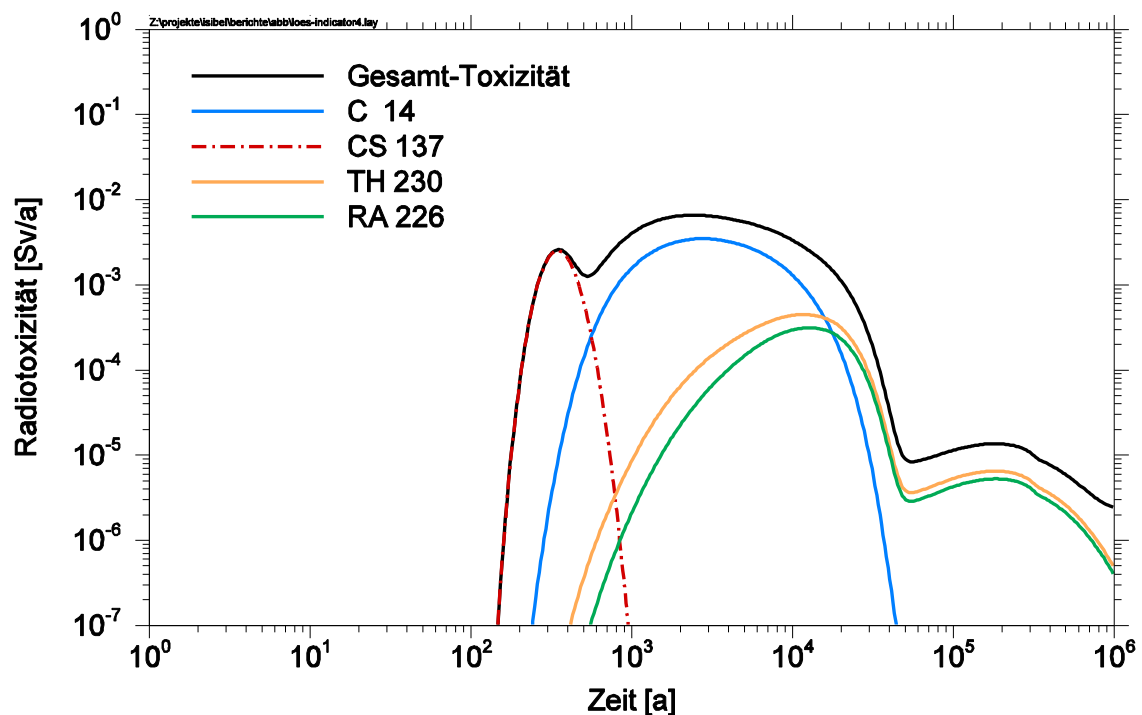


Abb. 3.21 Radiotoxizität der aus dem Grubengebäude austretenden Radionuklide (Gesamt-Toxizität und Auswahl bestimmender Radionuklide)

3.3.6.5 Veränderung der Aktivitätskonzentration von Radionukliden im oberflächennahen Grundwasser

Der Indikator „Veränderung der Aktivitätskonzentration von Radionukliden im oberflächennahen Grundwasser“ kann mit den existierenden Ergebnisausgaben berechnet werden. In Abbildung 3.22 ist die zeitliche Entwicklung dieses Indikators für fünf in der Natur anzutreffende Radionuklide dargestellt. Zusätzlich eingezeichnet sind in natürlichen Wässern gemessene Werte für diese Radionuklide (repräsentiert durch Linien gleicher Farbe: die horizontale blaue Linie repräsentiert z. B. den für Th-230 gemessenen Wert von 0,2 mBq/l, usw.), wobei Ra-226 und U-234 diese Werte überschreiten.

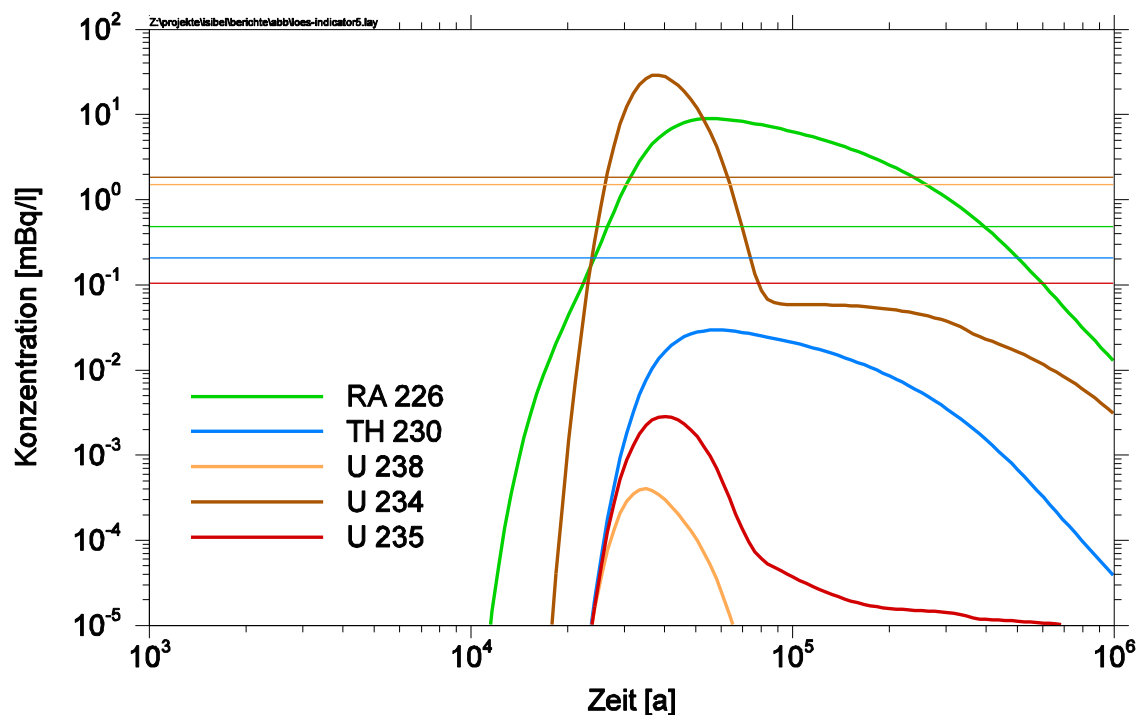


Abb. 3.22 Zeitlicher Verlauf der Aktivitätskonzentration ausgewählter Radionuklide im Grundwasser (weitere Erläuterungen siehe Text)

3.3.6.6 Jährliche individuelle Strahlenexposition

Der Indikator „jährliche individuelle Strahlenexposition“ wurde schon in den vorherigen Kapiteln untersucht und wird hier nicht noch einmal diskutiert.

3.3.6.7 Zusammenfassung

Mit dem in den vorangegangenen Kapiteln vorgestellten Modellergebnissen wurde beispielhaft dargelegt, inwieweit das Programmpaket EMOS neuen Anforderungen, die sich der Diskussion um die Sicherheitsprinzipien und Schutzziele der Endlagerung ergeben werden, gerecht werden kann. Dabei wird außer Acht gelassen, ob die hier diskutierten Indikatoren letztendlich in der jetzigen Form in die Sicherheitsanforderungen eingehen werden. Auch die Eintrittswahrscheinlichkeit des jeweils betrachteten Szenarios spielte bei der Analyse keine Rolle. Es handelt sich lediglich um eine erste Bewertung, ob die zur Zeit diskutierten Indikatoren von dem vorhandenen Instrumentarium für ein Endlager in einer Salzformation anwendbar sind. Die errechneten Resultate sind

dabei nicht belastbar, alleine schon wegen nicht ausreichenden Informationen zum Inventar.

Die Ergebnisse zeigen das grundsätzliche Problem bei der Bewertung von radiologischen Konsequenzen in einer Salzformation, wenn Indikatoren angewandt werden, die die Isolationsfähigkeit eines Endlagers untersuchen. Nur sehr unwahrscheinliche Szenarien, d.h. solche mit einer geringen Eintrittswahrscheinlichkeit, liefern überhaupt eine Freisetzung. Für eine genauere Bewertung der Strahlenexpositionen müssten umfassendere Analysen durchgeführt werden. Ein Vergleich von anderen Wirtsgesteinen mit Steinsalzformationen ist mit den Indikatoren, die auf dem Isolationsprinzip beruhen, sehr schwierig.

3.3.7 Natürliche Analoga

Ursprünglich war es die Intention von Analoga-Studien, numerische Daten wie Korrosionsraten oder Sorptionskoeffizienten zur direkten Verwendung in Langzeitsicherheitsanalysen abzuleiten. Diese Vorgehensweise war aber nur selten erfolgreich, da es sich als sehr schwierig erwies, aus komplexen natürlichen Systemen, in denen die Anfangs- und Randbedingungen meist nur ungenau bekannt sind, sichere und fundierte Daten abzuleiten. Es gibt nur wenige Beispiele, bei denen dies tatsächlich erfolgt ist. So sind Eindringtiefen für die Matrixdiffusion in geklüftetem kristallinem Gestein, die im Felslabor Grimsel ermittelt wurden, in der Schweizer Sicherheitsanalyse Kristallin-I verwendet worden [29].

Für Langzeitsicherheitsanalysen für ein Endlager im Salz wurden bisher keine Werte für Modellparameter aus Analoga-Studien verwendet. Dies ist aus den oben genannten Gründen auch durch zukünftige Studien nur sehr schwer erreichbar. Es ist aber vorstellbar, durch geeignete zukünftige Analoga-Studien zumindest die Größenordnung, bzw. oberen Grenzen für Parameterwerte abzusichern. Ein Beispiel aus der Vergangenheit betrifft die Ermittlung von Sorptionswerten im Deckgebirge Morsleben. Hierzu wurden Laborexperimente an ausgewählten Sediment- bzw. Grundwassersystemen durchgeführt. Die Größenordnung der im Labor ermittelten Werte konnte durch In-situ gemessene K_d -Werte für die dort natürlich vorkommenden Elemente Sr, U, Th sowie Seltene-Erden-Elemente als Homologe für dreiwertige Actiniden in vielen Fällen untermauert werden [11], [12]. Dabei wurde bei den In-situ gemessenen K_d -Werten der in den natürlichen Sedimenten sorbierte Anteil durch geeignete Extraktionsmethoden

ermittelt. Da für den Langzeitsicherheitsnachweis Morsleben letztendlich kein Kredit von der Sorption im Deckgebirge genommen wurde, kamen diese Ergebnisse nicht zur Anwendung. Entsprechende Studien sind aber an jedem anderen Standort möglich.

In ähnlicher Weise könnten auch andere Parameter, wie z.B. an anderen Salzstöcken ermittelte Subrosionsraten [19] oder Kompaktionsraten für Salzversatz, die aus Bohrkernen von in der Vergangenheit verfüllten Salzbergwerken gewonnen werden [6], zur Absicherung der in Modellansätzen der Langzeitsicherheitsanalyse eingesetzten Daten verwendet werden.

4 Zusammenfassung der Ergebnisse

Im Folgenden wird auf die Ergebnisse der einzelnen Arbeitsschritte des vorliegenden Berichtes eingegangen und der daraus abzuleitende F+E-Bedarf identifiziert.

4.1 Diskussion der Ergebnisse

Mit Hilfe von FEP aus dem Katalog [18] wurden Szenarien für die gestörte Entwicklung des Endlagersystems identifiziert. Dabei wurde ein „top-down-approach“ verwendet. In Verbindung mit der Vorgehensweise nach PROSA können auf diese Weise Szenarien ermittelt werden, die alle vorstellbaren gestörten Entwicklungen des Standorts abdecken. Das Instrumentarium für die Entwicklung der Szenarien steht also zur Verfügung und die Methodik (PROSA und top-down-approach) wird als angemessen beurteilt. Bei der Darstellung der entwickelten Szenarien in leicht zugänglichen Abbildungen zur Erhöhung der Transparenz des Verfahrens besteht allerdings noch Handlungsbedarf.

Für die ungestörte Entwicklung und die unter Kapitel 2.2 identifizierten Szenarien wurden Modellrechnungen mit dem Programmpaket EMOS durchgeführt, um zu untersuchen, inwieweit die vorhandenen Werkzeuge der Konsequenzenanalyse in der Lage sind, solche Szenarien zu modellieren und die Sicherheit eines potenziellen Endlagers zu beurteilen. Neben der Beurteilung der Modelle standen auch Fragen zu den Eingabedaten dieser Modelle im Blickpunkt, besonders die Abfalldaten und die Geometrie der Grubenbaue. Es sollte zudem geklärt werden, ob die ausgegebenen Daten zur Berechnung der Indikatoren gemäß den in Diskussion befindlichen Sicherheitsanforderungen bei der Beurteilung von Endlagern ausreichen.

Die untersuchten Szenarien wurden hier unabhängig von der Wahrscheinlichkeit ihres Auftretens betrachtet. In einem zukünftigen Verfahren für einen Endlagerstandort sind die Eintrittswahrscheinlichkeiten jedoch zu berücksichtigen und nur solche Szenarien weiter zu betrachten, deren Eintrittswahrscheinlichkeit einen vorzugebenden Wert überschreitet. Dadurch könnte die Situation entstehen, dass – anders als in den hier unterstellten Freisetzungsszenarien – keines der wahrscheinlichen und weniger wahrscheinlichen Szenarien zu einer Freisetzung von Radionukliden aus dem Grubengebäude führt.

4.1.1 Konzeptuelle Modelle

In den Nahfeldmodulen des Programmpakets EMOS werden die folgenden Prozesse und Effekte modelliert. An dieser Stelle wird darauf eingegangen, inwieweit gemäß den berechneten Ergebnissen die aktuellen Modellierungen dieser Prozesse und Effekte für einen Langzeitsicherheitsnachweis geeignet sind:

- Lösungsbewegung inklusive Lösungszutritt in das Grubengebäude. Die aktuellen Modelle sind zur Beschreibung der Lösungsbewegung im Grubengebäude geeignet und können bei Bedarf den aktuellen Anforderungen angepasst werden. Programmanpassungen erfolgen jeweils auf der Ebene der Segmentmodelle.
- Mobilisierung von Radionukliden aus Abfallgebinden inklusive Behälterausfall. Es stehen für die meisten Arten von hochaktiven Abfällen geeignete Mobilisierungsmodelle zur Verfügung. Einige Modelle sind zu aktualisieren. Modelle für die Mobilisierung aus Brennelementen von Forschungsreaktoren stehen nicht zur Verfügung.
- Rückhaltung von Radionukliden durch Löslichkeitsgrenzen und Sorption. Die vorhandenen Modelle sind geeignet.
- Transport von Radionukliden durch Advektion, Dispersion und Diffusion. Die vorhandenen Modelle sind geeignet.
- Gasbildung. Die vorhandenen Modelle sind geeignet.
- Gasausbreitung. Die vorhandenen Modelle wurden im Rahmen von ISIBEL nicht geprüft. Sie beschreiben den Transport von Gasen nur ansatzweise; ein echter Gastransport wird nicht modelliert, insbesondere kein Transport von Radionukliden in der Gasphase. Falls die Gasbildung in einem HAW-Endlager nicht vernachlässigt werden kann, sind die vorhandenen Modelle nicht ausreichend.
- Gebirgskonvergenz. Das vorhandene Modell zur Beschreibung der Gebirgskonvergenz ist geeignet. Es wurde auch in anderen Projekten eingesetzt und geprüft.
- Permeabilitäts-Porositäts-Beziehung für kompaktierbaren Versatz. Das vorhandene Modell ist prinzipiell geeignet. Das Verhalten bei kleinen Porositäten ist jedoch weiter zu untersuchen; dies ist Gegenstand des aktuellen Forschungsprojektes REPOPERM [35], siehe auch Kapitel 4.2.4.4.

- Temperaturentwicklung. Die Temperaturentwicklung im Grubengebäude wird mit Hilfe von Computerprogrammen als Überlagerung der Temperaturfelder der einzelnen Wärmequellen berechnet und als ASCII-Tabellen abgelegt. Die aktuellen Temperaturen werden in LOPOS für jeden Grubenbau aus diesen Tabellen übernommen.
- Radioaktiver Zerfall. Das vorhandene Modell ist geeignet.

Für alle Modelle gilt, dass gegebenenfalls in einem Genehmigungsverfahren aktualisierte Modellparameter ermittelt werden müssen.

In den Fernfeldmodulen des Programmpakets EMOS werden die folgenden Prozesse und Effekte modelliert. An dieser Stelle wird darauf eingegangen, inwieweit gemäß den berechneten Ergebnissen die aktuellen Modellierungen dieser Prozesse und Effekte für einen Langzeitsicherheitsnachweis geeignet sind:

- Transport von Radionukliden durch Advektion, Konvektion, Dispersion und Diffusion. Die aktuellen Modelle sind zur Beschreibung des Radionuklidtransports geeignet. Es existieren Modelle zur Berücksichtigung von ein- oder mehrdimensionalem Transport.
- Rückhaltung von Radionukliden durch Sorption. Die vorhandenen Modelle sind geeignet. Es existieren Modelle zur Berücksichtigung linearer und nichtlinearer Sorption sowie von Matrixdiffusion.
- Radioaktiver Zerfall. Das vorhandene Modell ist geeignet.

Zur Berechnung der Radionuklidausbreitung in der Biosphäre, bzw. zur Berechnung hypothetischer Strahlenexpositionen wurden die in den EMOS-Modulen EXCON und EXMAS verfügbaren Modelle verwendet. Sie verwenden Dosiskonversionsfaktoren, die aus Modellrechnungen ermittelt werden, die die Rechenvorschriften nach der AVV abbilden [32], [1]. Eine Beurteilung der Biosphärenmodelle war nicht Bestandteil des ISIBEL-Projektes, so dass die Module unverändert eingesetzt wurden. Sie werden als in zukünftigen Verfahren einsetzbar eingeschätzt, wobei gegebenenfalls aktualisierte Eingangsdaten – vor allem Dosiskonversionsfaktoren – zu verwenden sind. Es ist Aufgabe des Gesetzgebers, die Berechnungsvorschriften und Daten zur Ermittlung von Strahlenexpositionen vorzugeben. Dies betrifft gegebenenfalls auch die Aktualisierung der Biosphärenmodelle zur Ermittlung aktualisierter Dosiskonversionsfaktoren.

4.1.2 Eingabedaten für die Modelle

Das Grubengebäude des Endlagers am Referenzstandort hat eine relativ einfache Struktur, so dass die Geometrie des im Endlagerkonzept entworfenen Grubengebäudes [16] im Modell detailliert umgesetzt werden konnte. Trotzdem wurden Vereinfachungen vorgenommen – beispielsweise wurden die mittleren Einlagerungsstrecken und die davon abgehenden Bohrlöcher sowie die Einlagerungs- und die Abwettersohle in den Zugangsstrecken jeweils in Modellsegmenten zusammengefasst –, die auf die Berechnung der Ergebnisse nur einen sehr geringen Einfluss haben. Dies gilt auch für Einlagerungsfelder, die die gleiche Abfallkategorie enthalten, und bei Bedarf zusammengefasst werden können. In einem Genehmigungsverfahren ist jeweils zu belegen, dass eine Zusammenfassung und Vereinfachung einer Struktur gerechtfertigt ist. Prinzipiell lassen sich auch komplexe Grubengebäudestrukturen mit dem vorhandenen Instrumentarium bearbeiten.

Das im Endlagerkonzept entworfene Grubengebäude wurde für die Rechnungen mit dem Modul LOPOS nicht exakt abgebildet; zur Vereinfachung wurden die drei Abfallarten genau auf drei Einlagerungsfelder aufgeteilt, siehe Kapitel 3.2.3, und es wurde nur ein BSK-Teilfeld berücksichtigt. Das BSK-Feld kann daher nur etwa ein Achtel der zu erwartenden abgebrannten Brennelemente aufnehmen. Die unterstellten Mengen an HAW-Kokillen und CSD-C lassen sich dagegen im modellierten Grubengebäude unterbringen. Die vorgenommene Vereinfachung erlaubt eine klare Diskussion der bei den Rechnungen auftretenden Effekte und schränkt die spätere Anwendung der Werkzeuge auf ein komplettes Grubengebäude nicht ein.

Im Gegensatz zur Geometrie sind die Informationen über die Mengen der anfallenden Abfallbinde und des radioaktiven Inventars widersprüchlich und lückenhaft. Je nach Berechnungsverfahren und Abfallherkunft werden stark abweichende Inventare für die einzelnen Abfallarten angegeben. Für ISIBEL wurde auf bereits in früheren Projekten verwendete und dort geprüfte Inventardaten zurückgegriffen (Kapitel 3.2.3).

Das plastische Verhalten von Steinsalz verursacht die Reduktion von aufgefahrenen Hohlräumen aufgrund der Gebirgskonvergenz. Die Konvergenz wird mit Hilfe von gebirgsmechanischen Rechenprogrammen ermittelt und über Parameter-Fitting in die Modelle der Rechenprogramme für die Langzeitsicherheitsanalysen (z.B. LOPOS) übernommen. Diese Trennung der Rechenprogramme ist auch in Zukunft sinnvoll und notwendig.

Die in ISIBEL verwendeten Daten zu Löslichkeiten, Rückhaltung und Quellterm wurden aus früheren Projekten entnommen. Für die Endlagerung einiger Abfallgebinde, beispielsweise direkt endgelagerter LWR-Brennelemente in Pollux-Behältern oder verglasten HAW in Kokillen, hat das FZK/INE im Auftrag des BfS geochemische Modellrechnungen zur Bestimmung des Milieus und der Löslichkeiten durchgeführt. Erste Ansätze zur Kopplung von Transportcodes mit geochemischen Codes wurden realisiert [28] und können nach einer Weiterentwicklung dieser Codes und nach Vorliegen schnellerer Computer-Hardware eingesetzt werden, um Löslichkeiten und Rückhaltung von Radionukliden in den Sicherheitsanalysen genauer abzubilden.

Im FEP-Katalog von ISIBEL wurde festgestellt, dass Gase in einem HAW-Endlager auftreten können, wobei die Mengen je nach Endlagerkonzept variieren. Die Auswirkungen von Gasen auf die Ausbreitung der Radionuklide in einem Grubengebäude wurden jedoch in den Modellrechnungen von ISIBEL nicht untersucht. Dabei wurde angenommen, dass die zu frühen Zeiten gebildeten Gase das Grubengebäude ungehindert verlassen und dass zu späten Zeiten nur sehr geringe Mengen an Gasen gebildet werden.

Die Daten für das Fernfeld wurden in den Modellrechnungen unverändert aus alten Projekten übernommen [9]. Diese Daten bezogen sich ebenfalls auf den Referenzstandort, sind aber eventuell überholt, da das Projekt sehr lange zurückliegt. Als generische Daten sind sie für vorbereitende Langzeitsicherheitsanalysen ausreichend.

Die Daten für die Biosphäre (Dosiskonversionsfaktoren, Wasserentnahmestelle in Fernfeld) sind aus alten Projekten übernommen [9]. Diese Daten lehnen sich an die AVV der Strahlenschutzverordnung an und entsprechen damit dem aktuellen gesetzlichen Standard. Sie werden mit separaten Rechenprogrammen ermittelt, in denen die Ausbreitungspfade der Radionuklide in der Biosphäre modelliert werden.

4.1.3 Numerische Modelle

Die in Kapitel 4.1.1 angegebenen konzeptuellen Modelle werden in den Rechenprogrammen in geeigneter Weise durch numerische Modelle umgesetzt. Die Umsetzung ist in dem vorhandenen Instrumentarium gut; das Instrumentarium ist Bestandteil von qualifizierten Codes und wurde in mehreren Anwendungen erprobt. Folgende Aspekte sind zu beachten:

- Zur Berechnung der Lösungsbewegung inklusive Lösungszutritt in das Grubengebäude können Programmanpassungen jeweils auf der Ebene der Segmentmodelle erfolgen und auf diese Weise den standortspezifischen Erfordernissen gerecht werden.
- Für die Berechnung der Mobilisierung von Radionukliden aus Abfallgebinden inklusive Behälterausfall sind einige numerische Modelle entsprechend dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik zu aktualisieren. Für Brennelemente aus Forschungsreaktoren müssen gegebenenfalls neue Modelle entwickelt werden.
- Über die eventuelle Implementierung anderer Verfahren zur Berechnung des Transports von Radionukliden durch Advektion, Konvektion, Dispersion und Diffusion wird derzeit im Rahmen des nationalen Projekts ADEMOS [33] diskutiert. Hierdurch sollen die Programmpflege und die Transparenz der eingesetzten Methoden verbessert werden.
- In den vorhandenen Segmentmodellen werden Temperaturdaten durch Einlesen aus Tabellen eingegeben. Das Temperaturfeld kann nicht in den Nahfeldmodulen berechnet werden; hierfür sind externe Programme erforderlich. Diese Vorgehensweise kann auch in zukünftigen Verfahren eingesetzt werden und ist prinzipiell geeignet. Es ist jedoch zu prüfen, ob es sinnvoll ist, die Temperatur direkt in den Nahfeldmodulen zu berechnen.

Für alle Modelle gilt, dass gegebenenfalls in einem Genehmigungsverfahren aktualisierte Modellparameter ermittelt werden müssen.

In den Fernfeldmodulen des Programmpakets EMOS werden die folgenden Prozesse und Effekte modelliert, die alle für einen Langzeitsicherheitsnachweis geeignet sind:

- Transport von Radionukliden durch Advektion, Dispersion und Diffusion. Es existieren Module zur Berücksichtigung von ein- oder mehrdimensionalem Transport, die jeweils unterschiedliche Anforderungen berücksichtigen.
- Rückhaltung von Radionukliden durch Sorption. Es existieren Module zur Berücksichtigung linearer und nichtlinearer Sorption sowie von Matrixdiffusion.
- Radioaktiver Zerfall.

Bei der Modellierung der Freisetzungsszenarien zeigte sich, dass die Berücksichtigung von Lösungseinschlüssen, die z.B. bei der Erkundung nach dem Abteufen von Bohrlöchern nicht detektiert wurden, einige Anpassungen bei den Segmentmodellen für Bohrlöcher erforderte. Diese waren mit den bisherigen Segmentmodelltypen nicht zufriedenstellend abzubilden. Teilweise ergaben sich Inkonsistenzen in den Massenbilanzen, die auf Instabilitäten in der Numerik wegen ungeeigneter Anfangswertbelegung im Segmentmodell für den Lösungseinschluss und die Zeitschrittsteuerung zurückzuführen waren. Auch wenn im Projekt ISIBEL keine Programmierarbeiten geplant waren, mussten diese Inkonsistenzen beseitigt werden, d.h. die Segmentmodelle für die Bohrlöcher angepasst werden, um einen Vergleich der Szenarien zu ermöglichen. Das Modell zur Beschreibung eines Lösungseinschlusses existierte nur in einer älteren Version von EMOS für das Modul REPOS. Es musste für das Nahfeldmodul LOPOS angepasst werden. Hierbei waren insbesondere die unterschiedlichen Teufen von Strecken, Bohrlöchern und Lösungseinschlüssen zu berücksichtigen. Die Anfangswertbelegung für den Flüssigkeitsdruck im Lösungseinschluss nach Entstehen einer Wegsamkeit zum Bohrloch bedurfte einiger numerischer Anpassungen. Diese Anpassungen sind zusammen mit weiteren kleinen Programmänderungen detailliert in Kapitel 3.2.1 beschrieben.

4.1.4 Ausgabedaten der Modelle

Für die Auswertungen von Szenarienrechenläufen sind die vorhandenen Ausgabedateien und Werkzeuge von EMOS gut geeignet. Auch eine visuelle Ausgabe einiger Rechenergebnisse lässt sich durch die vorhandene Schnittstelle zwischen dem Nahfeldmodul LOPOS und einem CAD-System durchführen und dient u.A. ebenfalls dem Vergleich der Rechenergebnisse unterschiedlicher Szenarien. Die visuelle Ausgabe

der Geometrie des Grubengebäudes hilft darüber hinaus, Fehler in den Eingabedateien zu finden.

Weniger geeignet sind die vorhandenen Werkzeuge, wenn neue Indikatoren für die Bewertung der Langzeitsicherheit verwendet werden sollen, z.B. wenn die Isolation der hochradioaktiven Abfälle als zentrale Sicherheitsfunktion des Endlagersystems betrachtet wird. Hier zeigte sich, dass nicht alle Ausgabegrößen für die Aufbereitung der benötigten Daten zur Verfügung stehen. Tabelle 4.1 fasst die Ergebnisse hinsichtlich des Auswertungs- und Entwicklungsaufwandes für ein Endlager im Salz in ISIBEL betrachteten Indikatoren zusammen.

Tab. 4.1 Zusammenstellung der untersuchten Indikatoren und Beurteilung des Auswertungs- und Entwicklungsaufwandes

Indikator	Auswertungsaufwand			Entwicklungsaufwand		
	klein	mittel	hoch	klein	mittel	hoch
Jährliche individuelle Strahlenexposition (inkl. Zeitpunkt des Maximums)		x		x		
Menge der ausgepressten Lösung	x			x		
Zeitpunkte des Beginns der Freisetzung von Lösung und Radionukliden aus dem Grubengebäude	x			x		
Konzentrationen von ausgewählten Radionukliden im oberflächennahen Grundwasser		x		x		
Konzentrationen von Uran und Thorium in der Lösung, die aus dem Grubengebäude ausgepresst wird		x			x	
Relative Freisetzung von Radionukliden aus dem Grubengebäude			x	x		
Radiotoxizität der aus dem einschlusswirksamen Gebirgsbereich freigesetzten Radionuklide	x				x	
Energiedichte aufgrund radioaktiver Strahlung im Porenwasser der Randzone des einschlusswirksamen Gebirgsbereiches			x			x

4.1.5 Szenarienvergleich

Bei intaktem Endlager kommt es zu keiner Freisetzung von Radionukliden aus dem Grubengebäude. Auch das Versagen eines einzelnen Bauwerkes, ob Schachtver-

schluss oder Verschlussbauwerk zwischen Infrastrukturbereich und Zugangsstrecken, verursacht keine Freisetzung innerhalb des Simulationszeitraumes. Mit Hilfe der Ausgabedaten und mit visuellen Methoden wurde nachvollzogen, wie weit die zutretende Lösung im Simulationszeitraum jeweils in das Grubengebäude eindringt. Es zeigte sich, dass das Versagen des Schachtverschlusses mehr Einfluss auf die Modellergebnisse hat als ein Versagen eines Verschlussbauwerkes im Inneren des Endlagers. Aber erst bei einem gemeinsamen Versagen beider Verschlussbauwerke dringt die zutretende Lösung während des Simulationszeitraumes bis in die Einlagerungsorte vor, und es kommt zu einer Freisetzung von Radionukliden in die Geosphäre.

Bei Szenarien, bei denen ein Lösungseinschluss im Wirtsgestein berücksichtigt wird, der in Kontakt mit einem Einlagerungsbohrloch steht, kommt es bei den berücksichtigten Lösungsvolumina immer zu einer Freisetzung von Radionukliden aus dem Grubengebäude, da die Lösung kontaminiert ist und durch die Konvergenz aus dem Grubengebäude gepresst wird. Einen wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis hat hierbei jedoch die unterstellte Grenzporosität, die allen Segmenten eine zwar geringe aber nicht verschwindende Permeabilität zuweist. Die freigesetzte Menge ist bei intakten Verschlussbauwerken im Simulationszeitraum sehr klein und führt zu sehr geringen potenziellen Strahlenexpositionen. Werden alle Szenarien miteinander verknüpft – Zutritt aus einem Lösungseinschluss im Wirtsgestein und Ausfall aller Verschlussbauwerke – so sind die berechneten potenziellen Strahlenexpositionen hoch. Da es sich hierbei wegen der sehr geringen Eintrittswahrscheinlichkeit jedoch um ein auszuschließendes Szenario handelt, sind diese berechneten Konsequenzen nicht relevant.

4.2 Identifizierter F+E-Bedarf

Aus der Szenarienentwicklung, der Modellierung ausgewählter Szenarien und den durchgeführten Rechnungen wurde ein noch erforderlicher F+E-Bedarf identifiziert, der im Folgenden – nach Themen aufgeschlüsselt – behandelt wird.

4.2.1 FEP und Szenarien

Für einen konkreten Endlagerstandort sind nach der in Kapitel 2 beschriebenen Vorgehensweise alle relevanten Freisetzungsszenarien zu ermitteln. Dabei werden unter Umständen FEP identifiziert, die bisher im FEP-Katalog nicht beschrieben sind und

daher neu dargestellt werden müssen. Die FEP-Auswahl und die Szenarienanalyse sind also standortspezifisch und müssen die in diesem Bericht vorgelegten Ergebnisse ergänzen.

Szenarien für die Behandlung der Prozesse in der Biosphäre sind gegebenenfalls zu untersuchen, wie in Kapitel 2 dargelegt wurde. Diese Untersuchungen erfolgen auf „Prozesslevel“ (vergleichbar zu Untersuchungen zum geochemischen Milieu oder zu gebirgsmechanischen Rechnungen zur Ermittlung von Konvergenzraten) und sind daher nur mittelbar (über die Bereitstellung von Dosiskonversionsfaktoren) Bestandteil einer Langzeitsicherheitsanalyse. Es wird davon ausgegangen, dass die Abbildung der Prozesse in der Biosphäre analog zur heute geltenden AVV zur StrlSchV [1] auch in Zukunft durch entsprechende regulatorische Vorgaben bestimmt wird.

Für bisher nicht betrachtete Szenarien ist jeweils zu prüfen, ob neue Module oder neue Modelle für die vorhandenen Module zu entwickeln sind. Nach derzeitigem Kenntnisstand lassen sich die derzeit bekannten Szenarien mit dem Nahfeldmodul LOPOS und anderen Modulen von EMOS abbilden, jedoch sind gegebenenfalls Programmanpassungen erforderlich, z.B. bei der Betrachtung von Human-Intrusion-Szenarien oder bei der Betrachtung von Eiszeiten.

4.2.2 Eingabedaten

Bezüglich der realen Struktur des Grubengebäudes ist zu klären, ob Vereinfachungen, bzw. Verbesserungen in Details, möglich sind. Auch wenn in den vorliegenden Untersuchungen keine relevanten Freisetzungen berechnet wurden, sind Verbesserungen des Strukturmodells denkbar. Durch Parametervariationen als begleitende Rechnungen während einer Grubengebäudeplanung lassen sich Strukturen optimieren. Beispielsweise könnte sich die Langzeitsicherheit verbessern, wenn ein Einlagerungsfeld nicht durch zwei, sondern nur durch einen Querschlag jeweils zugänglich ist, oder wenn die relativ hohen Beschickungsstrecken durch Bohrlöcher mit der Erkundungssole verbunden werden, um potenziell gebildete Gase besser abzuleiten. Bei diesen Strukturüberlegungen ist auch festzulegen, an welchen Stellen der Bohrlöcher, Querschläge und Zugangsstrecken Verschlüsse erforderlich sind und welche Anforderungen gegebenenfalls an diese Verschlüsse zu stellen sind (geometrische Abmessungen, Materialien, Durchlässigkeiten, usw.). Eine Optimierung der Anordnung der Felder (z.B. relativ kalte Felder am Ende des Grubengebäudes, d.h. weit weg vom

Schachtbereich) oder der Einlagerungsweise (z.B. Mischung von relativ kalten Abfällen mit heißen Abfällen in einem Bohrloch) ist zusätzlich möglich.

Weitere Arbeiten zu Einzeleffekten in einem Grubengebäude im Salinar sind im Rahmen anderer derzeit laufender nationaler und internationaler F+E-Projekte (WIGRU [36], PAMINA [34]) vorgesehen.

Eine wichtige ausstehende Aufgabe ist die Ermittlung des tatsächlich zu erwartenden Inventars aller Schadstoffe im Endlager, d.h. der Radionuklide und der chemotoxischen Stoffe für alle Abfallarten. Durch die politisch vorgegebenen Rahmenbedingungen ist das zu erwartende Abfallaufkommen prinzipiell bekannt, so dass die Erstellung eines vollständigen Inventars als eine der nächsten Aufgaben sinnvoll ist. Dabei bedarf es eines gewissen Aufwands, die Inventare von Abfällen aus Forschungsreaktoren oder anderen, ähnlichen Quellen zusammenzustellen, da beispielsweise Abbranddaten für alle einzulagernden Brennelemente ermittelt werden müssen. In diesem Zusammenhang ist auch zu klären, ob es für alle einzulagernden Abfallarten Modelle für die Mobilisierung der Schadstoffe gibt, oder ob solche Modelle noch zu entwickeln sind.

Die Eingabedaten für die Berechnung der Konvergenz sind standortspezifisch. Anhand von gebirgsmechanischen Modellrechnungen müssen die für das in LOPOS implementierte Modell erforderlichen Daten ermittelt werden. Es wäre sinnvoll, einen generischen Datensatz für die Konvergenz zu ermitteln, der für vorläufige Rechnungen eingesetzt werden könnte. Die derzeit verfügbaren Daten sind nicht abgesichert und bilden im Prinzip die Konvergenz nach, wie sie in alten Rechnungen [9] verwendet wurde. Neuere Modellansätze und Daten werden derzeit im Rahmen des PAMINA-Projektes durch Vergleich mit gebirgsmechanischen Rechnungen ermittelt bzw. überprüft. Für ein zukünftiges Genehmigungsverfahren müssen die gebirgsmechanischen Rechnungen für jeden konkreten Standort durchgeführt werden.

Für ein Endlager mit hochaktiven, Wärme erzeugenden Abfällen müssen Temperaturen berechnet werden. Bisher erfolgt diese Berechnung mit separaten Rechenprogrammen auf Prozesslevel, und die Ergebnisse werden als ASCII-Tabellen in die Rechenprogramme für Langzeitsicherheitsanalysen übernommen. Auch in Zukunft wird diese Trennung als sinnvoll erachtet. Für ein Genehmigungsverfahren muss das Temperaturfeld gegebenenfalls für mehrere Grubengebäude-Geometrien ermittelt werden.

Bezüglich der Gase in einem HAW-Endlager ist zu untersuchen, ob Gase berücksichtigt werden müssen oder nicht. In den Instrumentarien für einen Langzeitsicherheitsnachweis (LOPOS) sind vereinfachte Modelle für den Transport von Gasen und für die Auswirkungen der Gase auf den Radionuklidtransport enthalten und einsatzbereit. Die Kopplung von Gas- und Flüssigkeitstransport in den entsprechenden Modulen – eventuell unter expliziter Abbildung eines Zweiphasen-Flusses – und die Auswirkungen der Gase auf den Schadstofftransport werden derzeit untersucht [33]. Aus den Ergebnissen dieser Untersuchungen kann geschlossen werden, ob und in welcher Weise Gase in zukünftigen Genehmigungsverfahren zu berücksichtigen sind. Unabhängig davon sind Daten zu den Mengen der gebildeten Gase und zur Kinetik der dabei ablaufenden Prozesse auf den aktuellen Stand zu bringen.

Auch andere Eingabedaten sind standortspezifisch und müssen in einem entsprechenden Genehmigungsverfahren bestimmt werden, beispielsweise Sorptionsparameter und Löslichkeiten. In vorbereitenden Langzeitsicherheitsanalysen reichen diese generischen Werte aus, so dass kein unmittelbarer Forschungsbedarf besteht. Es wird jedoch empfohlen, vorhandene geochemische Modellrechnungen zur Bestimmung des Milieus und der Löslichkeiten auf dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik zu wiederholen und für neu hinzugekommene Abfallgebindearten – beispielsweise CSD-C – zu ergänzen, so dass ein einheitlicher Stand der Daten erreicht wird.

Die für ein Genehmigungsverfahren erforderlichen Daten für das Fernfeld müssen für einen konkreten Standort ermittelt werden. Dies betrifft die Ermittlung von Ausbreitungspfaden, Sorptionsdaten entlang der Ausbreitungspfade und Grundwasserströmungen. Hierzu sind gegebenenfalls mehrdimensionale Strömungs- und Transportrechnungen mit geeigneten Rechenprogrammen durchzuführen, um mit Hilfe von Particle Tracking die Eingangsdaten für die Rechenprogramme zur Langzeitsicherheitsanalyse zu ermitteln. Ergänzende Labor- und In-situ-Untersuchungen zur Sorption der auftretenden Gesteinsschichten sind durchzuführen und geologische Daten zum Aufbau des Fernfelds zu erheben. Ein Messprogramm zur Ermittlung der Grundwasserströmung ist erforderlich.

Die Daten für die Biosphäre (Dosiskonversionsfaktoren, Wasserentnahmestelle in Fernfeld) müssen für ein Genehmigungsverfahren dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik entsprechen. Es ist Aufgabe des Gesetzgebers, die Verfahrensweise für die Ermittlung von Dosiskonversionsfaktoren festzulegen.

4.2.3 Ausgabedaten

Sofern sich – wie derzeit in der Diskussion – die gesetzlichen Anforderungen an einen Langzeitsicherheitsnachweis in naher Zukunft ändern, müssen für die Berechnung der dann geforderten Indikatoren zusätzliche Ausgabedaten bereitgestellt werden. Dies betrifft nach derzeitigem Kenntnisstand die folgenden Daten:

- Energiedichte aufgrund ionisierender Strahlung,
- Radiotoxizitäten (inklusive Summenbildung),
- Gesamtaktivitäten aller Radioisotope eines Elements (Uran und Thorium)

Für diese neuen Indikatoren sind in den Instrumentarien entsprechende Berechnungsmethoden zu implementieren.

4.2.4 Modelle

Für eine Anwendung des Nahfeldmoduls LOPOS in zukünftigen Verfahren sind einige Modelle zu ergänzen oder zu ändern. Die Modelle für die Fernfeldmodule des Programmpaketes EMOS sind weitgehend auf dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik. Die Modelle für die Abbildung in der Biosphäre wurden nicht untersucht. Einige Modellentwicklungen für das Nahfeldmodul werden im Rahmen von derzeit laufenden Projekten (z.B. im nationalen Vorhaben ADEMOS) stattfinden.

4.2.4.1 Mobilisierungsmodelle

Das in [41] beschriebene konzeptuelle Mobilisierungsmodell für verglasten hochaktiven Abfall berücksichtigt unter Anderem die Entwicklung der Konzentration von Silizium in der Lösung bei der Matrixkorrosion. Dieses Modell ist in der aktuellen Version von LOPOS nicht implementiert und sollte ergänzt werden.

Das ebenfalls in [41] beschriebene konzeptuelle Mobilisierungsmodell für abgebrannte LWR-Brennelemente berücksichtigt vier statt bisher drei Bereiche des Brennelements (Brennstoffmatrix, Zwischenräume in der Matrix, Hüllrohre sowie Kopf- und Fußstücke). Dieses Modell ist in der aktuellen Version von LOPOS nicht implementiert und sollte ergänzt werden, obwohl nur marginale Änderungen gegenüber der bisherigen Version zu erwarten sind.

Für die Mobilisierung aus abgebrannten Brennelementen aus HTR und Forschungsreaktoren liegen teilweise keine numerischen Modelle für das Modul LOPOS vor. Das aus [9] vorliegende konzeptuelle Modell für HTR-Brennelemente sollte übernommen werden; für Brennelemente aus Forschungsreaktoren sind Mobilisierungsmodelle zu entwickeln und in die Rechenprogramme zu übernehmen.

4.2.4.2 Segmentmodelle für spezielle Grubenbaue

Obwohl das derzeit verwendete Segmentmodell für ein Einlagerungsbohrloch prinzipiell für die geplanten Anwendungen geeignet ist, ist eine Weiterentwicklung zu empfehlen. Dies betrifft zum Einen die Berücksichtigung der Teufe entlang eines Bohrloches bei der Berechnung der Konvergenz und des Drucks und zum Anderen die eventuell vorgesehene Unterteilung von Bohrlöchern mit Zwischenstopfen, die mit dem derzeitigen Modell nicht abgebildet werden kann.

Die Modellierung der Flutung von Segmenten auf unterschiedlicher und zum Teil auch auf gleicher Teufe ist nicht ausreichend modelliert. Es gibt im derzeitigen Modell mehrere Vereinfachungen, die bei einer Weiterentwicklung behoben werden sollten. Beispielsweise sollte ein Modell entwickelt werden, das zuverlässig die Flutung eines leeren Bohrlochs von oben bei hoher Permeabilität des Stopfens erlaubt. Auch die Flutung von Segmenten auf gleicher Teufe, aber mit unterschiedlicher Höhe sollte – unter Berücksichtigung der LOPOS-spezifischen Kopplung von Segmenten auf Mittelpunktsniveau – verbessert werden. Auch die Berechnung von Strömungswiderständen bei der kontinuierlichen Flutung von Segmenten sollte noch genauer untersucht werden. Letzteres wird im Rahmen von PAMINA vom grundsätzlichen Vorgehen her betrachtet.

Die Segmentmodelle zur Beschreibung von Strömungsbarrieren sollten erweitert werden, um mehrere – über einen Zeitbereich jeweils konstante – Werte der Permeabilität ansetzen zu können. Beispielsweise hat es sich in den Modellrechnungen (siehe Kapitel 3) als erforderlich erwiesen, eine vorgegebene Permeabilität für eine gewisse Anfangsperiode anzusetzen und nach einem angenommenen Ausfall der Barriere durch eine erhöhte Permeabilität zu ersetzen. Durch ein solches Modell könnte auch ein unterschiedliches Barrierenversagen durch Korrosion, die entweder unter trockenen Bedingungen oder unter Beteiligung von Feuchtigkeit abläuft, abgebildet werden.

4.2.4.3 Modellierung der Gasspeicherung und der Gasfreisetzung

In den konzeptuellen Modellen des Nahbereichsmoduls LOPOS werden die Gasspeicherung und Gasfreisetzung nur stark vereinfacht berücksichtigt. Der Transport eines Gases kann nicht explizit berechnet werden, sondern wird implizit durch Eingabedaten aus vorangehenden Berechnungen mit anderen Programmen vorgegeben. Da die Auswirkungen von Gasen auf die Freisetzung von Radionukliden gravierend sein können, sollten konzeptuelle Modelle zur Abbildung des Gastransports entwickelt und gegebenenfalls in LOPOS implementiert werden. Dies betrifft vor Allem Fragestellungen zur Berücksichtigung eines Zwei-Phasen-Transports.

Bevor diese konzeptuellen Modelle zum Gastransport entwickelt werden, ist zu klären, wie stark die Gasbildung in einem Endlager für hoch radioaktive Abfälle ist. Falls die Gasbildung gering ist, können die Auswirkungen der Gase im Endlager vernachlässigt werden und eine Programmentwicklung wäre unnötig.

4.2.4.4 Versatzkompaktion bei sehr kleinen Porositäten

Ein wesentlicher Effekt für den Transport von Schadstoffen in einem Endlager im Salzgestein ist die Gebirgskonvergenz. Sie hängt stark von der Porosität der kompaktierbaren Materialien in den aufgefahrenen Grubenbauen ab. Insbesondere bei sehr kleinen Porositäten ist jedoch das Konvergenzverhalten, das aufgrund von gebirgsmechanischen Rechnungen prognostiziert wird, sehr ungenau bekannt. Zukünftige gebirgsmechanische Untersuchungen zur Versatzkompaktion bei sehr geringen Porositäten sind daher zu verfolgen und gegebenenfalls neue konzeptuelle Modelle für die dabei ablaufenden Prozesse zu entwickeln. Die numerischen Modelle der Konvergenz im Nahbereichsmodul LOPOS sind dann entsprechend anzupassen. Nach derzeitigem Kenntnisstand ist jedoch zu erwarten, dass neue Erkenntnisse bezüglich der Konvergenz bei sehr geringen Porositäten alleine durch Parameteranpassungen – ohne Programmänderungen – berücksichtigt werden können.

4.2.4.5 Modelle für das Fernfeld

Die derzeit in den Fernfeldmodulen verwendeten Transportmodelle berücksichtigen die Matrixdiffusion und Sorptionsprozesse in unterschiedlichem Ausmaß. Es ist zu prüfen, ob eines der Modelle den Bedarf für eine Langzeitsicherheitsanalyse abdeckt. Gege-

benenfalls muss eines der Modelle für einen konkreten Fall angepasst werden, beispielsweise durch Einfügen eines numerischen Modells für die Matrixdiffusion.

4.3 Gesamtergebnis

Es wurden Freisetzungsszenarien identifiziert und die zugehörigen FEP in einer Liste zusammengestellt und beschrieben. Ein Verfahren, wie eine vollständige Liste von Freisetzungsszenarien entwickelt werden kann, wurde identifiziert.

Ein Konzept für die Bewertung der Langzeitsicherheit eines Standorts im Salinar wurde entwickelt und angewendet. Untersuchungen zur Kritikalität in der Nachbetriebsphase wurden nicht in diesem Bericht durchgeführt, sondern gemeinsam mit der Betriebsphase behandelt [16]. Für ausgewählte Freisetzungsszenarien wurden die relevanten Eingangsdaten zusammengestellt und Lücken in der Datenbasis aufgezeigt. Die in den Instrumentarien zur Sicherheitsbewertung vorliegenden Modelle wurden bezüglich der Anwendbarkeit auf Endlager hochradioaktiver Abfälle untersucht und fehlende oder zu verbessernde Modelle identifiziert.

Eine abschließende Bewertung über den Einsatz von Indikatoren ist noch nicht möglich. Es sind weitere Untersuchungen insbesondere für die Beurteilung für gestörte Entwicklungen von Endlagersystemen und den Vergleich von Indikatoren für unterschiedliche Wirtsgesteine notwendig. Dementsprechend laufen bereits nationale und internationale F+E-Projekte (WIGRU, PAMINA), die sich intensiver mit dem Einsatz von Indikatoren beschäftigen.

Die Erprobung des Instrumentariums für ausgewählte Szenarien zeigt, dass das Instrumentarium prinzipiell einsetzbar ist; es waren dafür allerdings bereits einige Programmanpassungen erforderlich. Weitere Lücken in den numerischen Programmen wurden identifiziert und eine Weiterentwicklung der Programme vorgeschlagen. Dies betrifft die Module für das Nahfeld eines Endlagers; die Module für das Fernfeld und die Biosphäre wurden als ausreichend festgestellt.

In der Anwendung des Instrumentariums zeigte sich, dass bei ungestörter Entwicklung des Standorts keine Freisetzung zu erwarten ist. Für gestörte Entwicklungen sind die berechneten Konsequenzen sehr gering, wenn wahrscheinliche und weniger wahrscheinliche Szenarien betrachtet werden. Kombinierte Szenarien ergeben zwar größere Konsequenzen, sind aber aufgrund ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit auszuschließen.

Langzeitsicherheitsanalysen können auch für eine Optimierung von Endlagerkonzepten verwendet werden, die z.B. durch eine Vertauschung der Einlagerungsfelder erreicht werden kann. Optimierungen waren im Rahmen von ISIBEL nicht vorgesehen, sollten aber im Rahmen von Verfahren erfolgen.

Tabelle 4.2 stellt abschließend den ermittelten FuE-Bedarf des in diesem Bericht getesteten, vorhandenen Instrumentariums für die Szenarientwicklung und die Konsequenzenanalyse schlagwortartig zusammen.

Tab. 4.2 Zusammenstellung des ermittelten FuE-Bedarfs

Instrumentarium	Komponente	Offene Fragen
Szenarientwicklung	FEP-Katalog	Anpassung des FEP-Katalogs an den Standort
	Szenariendefinition	Ermittlung von Eintrittswahrscheinlichkeiten
		Behandlung der Biosphäre
Konsequenzenanalyse	Eingabedaten	Radionuklidinventar für alle Abfallarten
		Temperaturfelder für neue Endlagerkonzepte
		Aktualisierter Konvergenzdatensatz
	Ausgabedaten	Anpassung der Ausgabe an neue Indikatoren
	Modelle	Mobilisierung aus BE aus HTR und Forschungsreaktoren
		Konzeptuelles Modell für HAW-Mobilisierung
		Zweiphasenströmung im Grubengebäude
		Flutung von Segmentmodellen
		Erweiterung der Segmentmodelle zur Beschreibung von Strömungsbarrieren
	Konvergenzverhalten bei sehr kleinen Porositäten	

5 Literatur

- [1] Allgemeine Verwaltungsvorschrift zu §45 Strahlenschutzverordnung: Ermittlung der Strahlenexposition durch die Ableitung radioaktiver Stoffe aus kerntechnischen Anlagen oder Einrichtungen (21. Februar 1990). Erschienen im Bundesanzeiger, 42. Jg. Nummer 64a (1990).
- [2] Baltés, B.; Beuth, T.: Behandlung des Szenariums „Menschliches Eindringen“ in ein Endlager für radioaktive Abfälle. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-A-3259, Köln, 2005.
- [3] Baltés, B.; Röhlig, K.-J., Kindt, A.: Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle in tiefen geologischen Formationen. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-A-3358, Köln, 2007.
- [4] Bechthold, W., Smailos, E., Heusermann, S., Bollingerfehr, W., Bazargan Sabet, B., Rothfuchs, T., Kamlot, P., Grupa, J., Olivella, S., Hansen, F.D.: Backfilling and Sealing of Underground Repositories for Radioactive Waste in Salt (BAMBUS-II Project). Commission of the European Communities, EUR 20621 EN, 2004.
- [5] Becker, D.-A.; Buhmann, D.; Storck, R.; Alonso, J.; Cormenzana, J.-L.; Hugl, M.; van Gemert, F.; O'Sullivan, P.; Laciok, A.; Marivoet, J.; Sillen, X.; Nordman, H.; Vieno, T.; Niemeyer, M.: Testing of Safety and Performance Indicators (SPIN), EUR 19965 EN, European Commission, Brussels, 2003.
- [6] Brenner, J.; Feddersen, H.K.; Gies, H.; Miehe, R.; Rothfuchs, T., Storck, R.: Untersuchung von Altversatz als Analogon zur Konvergenz und Kompaktierung versetzter untertägiger Hohlräume im Salz über lange Zeiträume – Phase I. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-147, Braunschweig, 1999.
- [7] Brennecke, P.; Kleemann, U.; Ranft, M.; Stier-Friedland, G.; Wollrath, J.: Sicherheitsanforderungen an die Endlagerung hochradioaktiver Abfälle. Dokumentation und Ergebnisse des Workshops am 6. und 7. März 2007. Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), SE-IB-21/07, Salzgitter, 2007.

- [8] Buchheim, B; von Fellenberg, H., Rohr, D.: Ermittlung von Art und Menge chemotoxischer Stoffe in allen Arten radioaktiver Abfälle und Bewertung ihrer Freisetzung im Hinblick auf das Schutzziel des Wasserhaushaltsgesetzes. Anhang C. Abschlussbericht für BfS, 2005.
- [9] Buhmann, D.; Nies, A.; Storck, R.: Analyse der Langzeitsicherheit von Endlagerkonzepten für wärmeerzeugende radioaktive Abfälle. GSF-Bericht 27/91. GSF – Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit GmbH, Braunschweig, 1991.
- [10] Buhmann, D.: Das Programmpaket EMOS. Ein Instrumentarium zur Analyse der Langzeitsicherheit von Endlagern. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-159, Braunschweig, 1999.
- [11] Geckeis, H., Klenze, R., Kim, J.-I.: Solid water interface reactions of actinides and homologues: Sorption onto Mineral surfaces. *Radiochim. Acta* 87, 13-21, 1999.
- [12] Geckeis, H.; Vejmělka, P.; Degering, D.; Pohlmann, C.; Gompper, K.; Hentschel, D.; Kim, J.-I.: In-situ distribution of trace metals in a natural aquifer overlying the nuclear repository site Morsleben, Germany. In: *Proceedings of the workshop on 'Mineral/water interactions close to equilibrium'*. FZKA 6291, 1999.
- [13] Gomit, J.M.; Hirsekorn, R.-P.; Martens, K.-H.; Prij, J.: Evaluation of elements responsible for the effective engaged dose rates associated with the final storage of radioactive waste: EVEREST project. – Final report, Volume 3b, EUR 17449/3b EN, Luxemburg, 1997.
- [14] Hirsekorn, R.-P.; Storck, R.; Brassler, T.; Herbert, H.-J.; Kühle, T.; Müller-Lyda, I., Rothfuchs, T.: Szenarienentwicklung und Bewertung der Langzeitsicherheit der Untertagedeponie Riedel. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-A-2583, Köln, 1998.

- [15] Hirsekorn, R.-P.; Boese, B.; Buhmann, D.: LOPOS: Programm zur Berechnung der Schadstofffreisetzung aus netzwerkartigen Grubengebäuden. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-157, Braunschweig, 1999.
- [16] ISIBEL „Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW“, Konzeptionelle Endlagerplanung und Zusammenstellung des endzulagernden Inventars, DBE TECHNOLOGY GmbH, Peine, 2008.
- [17] ISIBEL „Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW“, FEP-Generierung und Szenarienentwicklung, BGR, Hannover, 2008.
- [18] ISIBEL „Überprüfung und Bewertung des Instrumentariums für eine sicherheitliche Bewertung von Endlagern für HAW“: FEP-Katalog für einen HAW-Standort im Wirtsgestein Salz. Version 01. Gemeinsamer Bericht von DBETec, BGR und GRS. Peine, Hannover, Braunschweig, 2008.
- [19] Jaritz W. (1994): Die Entwicklungsgeschichte des Standortes Gorleben als natürliches Langzeitverhalten eines Barrierensystems. Z. dt. Geol. Ges. 145, 192-206.
- [20] Keesmann, S.; Noseck, U.; Buhmann, D.; Fein, E.; Schneider, A.: Modellrechnungen zur Langzeitsicherheit von Endlagern in Salz- und Granitformationen. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-206, Braunschweig, 2005.
- [21] Kühle, T.; Zude, F.; Lührmann, L.: Das eindimensionale Transportprogramm CHET1 unter Berücksichtigung der Sorption nach dem K_d -Konzept. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-124, Braunschweig, 1996.
- [22] Kugel, K.; Möller, K.: Modellinventar radioaktiver/ nicht radioaktiver Abfallinhaltsstoffe in einem zukünftigen Endlager. Bundesamt für Strahlenschutz, vorläufiger Bericht, Stand: Dezember 2003.

- [23] W. Kunz, Gesellschaft für Nuklear-Service, Persönliche Mitteilung, 2007.
- [24] M. Lochny, Gesellschaft für Nuklear-Service, Persönliche Mitteilung, 2004.
- [25] Lührmann, L.; Noseck, U.; Storck, R.: Spent Fuel Performance Assessment (SPA) for a hypothetical repository in crystalline formations in Germany. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-154, Braunschweig, 2000.
- [26] Mazurek, M.; Pearson, F. Joe; Volckart, G.; Bock, H.: Features, Events and Processes Evaluation. Catalogue for Argillaceous Media. – NEA-Report 4437, ISBN 92-64-02148-5, Organisation for Economic Co-operation and Development, Paris, 2003.
- [27] Mengel, K.: Herkunft und Migration mineralgebundener Gase in marinen Evaporiten. Abschlussbericht. Technische Universität Clausthal, Clausthal-Zellerfeld, 2005.
- [28] Moog, H.; Keesmann, S.: Modellierung des reaktiven Stofftransports im Nahfeld eines Endlagers. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-225, Braunschweig, 2007.
- [29] NAGRA: Kristallin-I. Safety Assessment Report. NAGRA Technical Report NTB 93-22, 1994.
- [30] Noseck, U.; Brasser, T.: Radionuclide transport and retention in natural rock formations – Ruprechtov site. Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) mbH. GRS-218. Braunschweig, 2006.
- [31] Prij, J. et al.: PROSA. Probabilistic Safety Assessment. Final Report. Petten, 1993.
- [32] Pröhl, G.; Gering, F.: Dosiskonversionsfaktoren zur Berechnung der Strahlenexposition in der Nachbetriebsphase von Endlagern nach dem Entwurf der Allgemeinen Verwaltungsvorschrift zu §47 Strahlenschutzverordnung in Anlehnung an die Vorgehensweise im Rahmen des Planfeststellungsverfahrens des geplanten Endlagers Konrad. GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, Institut für Strahlenschutz, Neuherberg, 2002.

- [33] Projekt "Anpassung des EMOS-Programmsystems an moderne Softwareanforderungen (ADEMOS)", Förderkennzeichen 02 E 10367 des Projektträgers des BMWi am Forschungszentrum Karlsruhe, Bereich Wassertechnologie und Entsorgung, (PTKA-WTE).
- [34] Projekt "Performance Assessment Methodologies in Application to Guide the Development of the Safety Case (PAMINA)", 6. Rahmenprogramm der Europäischen Union, FP6-036404.
- [35] Projekt "Restporosität und -permeabilität von kompaktierendem Salzgrusversatz in einem HAW-Endlager (REPOPERM)", Förderkennzeichen 02 E 10477 des Projektträgers des BMWi am Forschungszentrum Karlsruhe, Bereich Wassertechnologie und Entsorgung, (PTKA-WTE).
- [36] Projekt "Wissenschaftliche Grundlagen zum Nachweis der Langzeitsicherheit von Endlagern (Wigrü)", Ableitung von Sicherheits-Indikatoren für Salz. Förderkennzeichen 02 E 9954 des Projektträgers des BMWi am Forschungszentrum Karlsruhe, Bereich Wassertechnologie und Entsorgung, (PTKA-WTE).
- [37] „Reference Biospheres“ for solid radioactive waste disposal. IAEA-Publication, Vienna, 2003.
- [38] Steininger, W.: Natural analogues for a repository in rock salt, the German approach. In: Proceedings of the 6th EC Natural Analogue Working Group Meeting, 12.-16. Sept. 1994, Santa Fe. EC-Nuclear Science and Technology, EUR 16761, Brussels, 1996.
- [39] Storck, R.; Aschenbach, J.; Hirsekorn, R.-P.; Nies, A.; Stelte, N.: PAGIS: Performance Assessment of Geological Isolation Systems for Radioactive Waste – Disposal in Salt Formations. EUR Report 11778 EN, Luxemburg, 1988.
- [40] 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. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-122, Braunschweig, 1996.

- [41] Wissenschaftliche Grundlagen zum Nachweis der Langzeitsicherheit von Endlagern. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH. GRS-153; Braunschweig, 2000

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1	Szenario „Versagen des Schachtverschlusses“: Ablaufschema der charakteristischen FEP	5
Abb. 2.2	Szenario „Lösungszutritt aus einem begrenzten Lösungseinschluss“: Ablaufschema der charakteristischen FEP.....	6
Abb. 2.3	FEP Versagen des Schachtverschlusses	8
Abb. 2.4:	FEP Lösungszutritt aus dem Wirtsgestein.....	8
Abb. 2.5	FEP Lösungszutritt in Einlagerungsfelder (Szenario: Schachtversagen)....	9
Abb. 2.6	FEP Lösungszutritt in Einlagerungsfelder (Szenario: Lösungszutritt aus Wirtsgestein).....	9
Abb. 2.7	FEP Radionuklid-Quellterm	10
Abb. 2.8	FEP Radionuklid-Transport.....	11
Abb. 2.9	FEP Konvergenz.....	11
Abb. 2.10	FEP Gasbildung	12
Abb. 2.11	Externe Bohrung und eventuelle Verbindung zum Einlagerungsbereich ..	17
Abb. 3.1	Berücksichtigte Prozesse bei der Konsequenzenanalyse mit LOPOS	22
Abb. 3.2	Konventionen bei der Benennung der Segmentmodelle.....	25
Abb. 3.3	Schematische Struktur des Grubengebäudes.....	34
Abb. 3.4	Zeitliche Entwicklung der Temperatur in den Segmenten der Zugangsstrecken	40
Abb. 3.5	Zeitliche Entwicklung der Temperatur in den Segmenten der Querschläge	41
Abb. 3.6	Zeitliche Entwicklung der Temperatur in den Segmenten der Beschickungsstrecken	41
Abb. 3.7	Zeitliche Entwicklung der Temperatur in den Bohrlochstopfen.....	42
Abb. 3.8	Zeitliche Entwicklung der Temperatur in den Bohrlöchern	42
Abb. 3.9	Mobilisierung aus HAW-Kokillen für zwei ausgewählte Szenarien	44
Abb. 3.10	Zeitentwicklung der Temperatur für die Mobilisierung von HAW	44
Abb. 3.11	Die mit Lösung gefüllten Bereiche des Grubengebäudes im Referenzszenario nach einer Million Jahre	54

Abb. 3.12	Die gefüllten Bereiche des Grubengebäudes im Szenario „Versagen des Schachtverschlusses (Variante S3)“ nach einer Million Jahre	55
Abb. 3.13	Die gefüllten Bereiche des Grubengebäudes im Szenario „Versagen der Streckenverschlüsse (Variante D3)“ nach einer Million Jahre	57
Abb. 3.14	Lage der sechs Lösungseinschlüsse (jeweils 100 m ³ Lösung).....	58
Abb. 3.15	Zeitliche Entwicklung der Strahlenexposition und Summenkurve der freigesetzten Lösungsmenge für das Szenario „Lösungszutritt aus begrenzten Lösungseinschlüssen“	59
Abb. 3.16	Strahlenexposition für die kombinierten Szenarien mit einer Freisetzung von Radionukliden (Szenarien: LE = Lösungseinschluss, D = Versagen der Streckenverschlüsse (Dämme), S = Versagen des Schachtverschlusses).....	61
Abb. 3.17	Zeitliche Entwicklung der Strahlenexposition und Summenkurve der freigesetzten Lösungsmenge für das Szenario „gemeinsames Versagen des Schachtverschlusses und der Streckenverschlüsse mit Lösungseinschlüssen (SDLE)“	62
Abb. 3.18	Auffüllung des Grubengebäudes für das Szenario „gemeinsames Versagen des Schachtverschlusses und der Streckenverschlüsse“ nach dem Versagen des Schachtverschlusses.....	62
Abb. 3.19	Zeitlicher Verlauf der aus dem Grubengebäude freigesetzten Lösungsmenge und der entsprechenden Thorium-Gesamtkonzentration [in Bq/m ³ und µg/l].....	67
Abb. 3.20	Zeitlicher Verlauf der aus dem Grubengebäude freigesetzten Lösungsmenge und der entsprechenden Uran-Gesamtkonzentration [in Bq/m ³ und µg/l]	67
Abb. 3.22	Radiotoxizität der aus dem Grubengebäude austretenden Radionuklide (Gesamt-Toxizität und Auswahl bestimmender Radionuklide).....	69
Abb. 3.22	Zeitlicher Verlauf der Aktivitätskonzentration ausgewählter Radionuklide im Grundwasser	70

Tabellenverzeichnis

Tab. 3.1	Abmessungen der Modellsegmente für die Zugangsstrecken und den Infrastrukturbereich.....	32
Tab. 3.2	Abmessungen der Modellsegmente für die Querschläge und Beschickungstrecken	35
Tab. 3.3	Radionuklidinventare pro Gebinde, Gesamtinventar und Halbwertszeiten (Spalt- und Aktivierungsprodukte).....	37
Tab. 3.4	Radionuklidinventare pro Gebinde, Gesamtinventar und Halbwertszeiten (Zerfallsreihen)	38
Tab. 3.5	Aktivitätsinventare für ausgewählte Curium-Isotope [Bq] aus verschiedenen Quellen (siehe Text) und Aktivitätsverhältnisse.....	39
Tab. 3.6	Aktivitätsinventare für die Leitnuklide Sr-90, Cs-137 und Am-241 in COGEMA HAW-Kokillen.....	39
Tab. 3.7	Allgemeine Modellparameter zur Mobilisierung.....	43
Tab. 3.8	Elementspezifische Inventaranteile in den einzelnen Bereichen eines LWR-Brennelementes	46
Tab. 3.9	Relative Freisetzungsraten in den Abfallbereichen	46
Tab. 3.10	Allgemeine Daten für das Nahfeldmodul LOPOS.....	49
Tab. 3.11	Löslichkeiten der Radionuklide im Grubengebäude	50
Tab. 3.12	Allgemeine Daten für das Deckgebirge (eindimensionaler Transport).....	50
Tab. 3.13	Sorptionskoeffizienten für das Deckgebirge	51
Tab. 3.14	Dosiskonversionsfaktoren für die Biosphäre (Personengruppe > 17 Jahre)	52
Tab. 3.15	Ergebnisse aus dem Referenzszenario	53
Tab. 3.16	Ergebnisse der Rechenläufe zum Störfallszenario „Versagen des Schachtverschlusses“	55
Tab. 3.17	Ergebnisse der Rechenläufe zum Störfallszenario „Versagen der Streckenverschlüsse zwischen Infrastrukturbereich und restlichen Grubenbauen“ (kurz Versagen der Streckenverschlüsse).....	56
Tab. 3.18	Ergebnisse des Szenarios „Lösungszutritt aus begrenzten Lösungseinschlüssen“	58

Tab. 3.19	Ergebnisse der kombinierten Szenarien für die gestörten Entwicklungen	60
Tab. 3.20	Freisetzung der Spalt- und Aktivierungsprodukte für das Szenario „gemeinsames Versagen des Schachtverschlusses und der Streckenverschlüsse“	64
Tab. 3.21	Freisetzung der Radionuklide der Zerfallsreihen für das Szenario „gemeinsames Versagen des Schachtverschlusses und der Streckenverschlüsse“	65
Tab. 3.22	Gesamte Freisetzung des Inventars im Grubengebäude	66
Tab. 4.1	Zusammenstellung der untersuchten Indikatoren und Beurteilung des Auswertungs- und Entwicklungsaufwandes	80
Tab. 4.2	Zusammenstellung des ermittelten FuE-Bedarfs.....	89

6 Anhang: Eingangsdaten der Segmentmodelle

Im Folgenden werden die Komponentenbelegungen der Datenvektoren *RBTY*, *IBEY* und *RBEY* für die in ISIBEL verwendeten Segmentmodelle beschrieben. Daneben werden, um einen Überblick für alle Eingangsdaten der Segmentmodelle zu erhalten, auch die jeweils in den Segmentmodellen verwendeten globalen Daten *RGY* und die Abfalldaten *RAGY* aufgelistet.

Die Namensgebung für die Segmentmodelle richtet sich nach folgender Konvention: Horizontal orientierte Segmente werden mit Modellen beschrieben, deren Namen mit *H* beginnen, vertikal orientierte Segmente werden mit Modellen beschrieben, deren Namen mit *V* beginnen. Der 2. und der 3. Buchstabe im Namen charakterisieren das Segmentmodell (z.B. *VS* für versetzte Strecke, *EB* für Einlagerungsbohrloch), der 4. Buchstabe gibt die Form des Segments an (*Q*: quaderförmig, *R*: rund), im 5. Buchstabe steht *K* für konvergierend, *N* für nicht konvergierend oder *V* für ein Segment mit einem Verschluss. Die abschließende Ziffer gibt die Entwicklungsstufe des Segmentmodells wieder. Ein Buchstabe *N* an dieser Stelle besagt, dass in diesen Segmentmodellen spezielle Modifikationen bestehender Modelle oder Neuentwicklungen vorgenommen wurden.

Die Komponentenbelegung der Datenvektoren *IBEY* und *RBEY* ist nach Möglichkeit für alle Segmentmodelle gleich. Um zu vermeiden, dass die Anzahl der Komponenten von *IBEY* und *RBEY* unnötig groß wird, sind jedoch in einigen Segmentmodellen Komponenten von *IBEY* und *RBEY* unterschiedlich belegt. Die Anzahl der *IBEY* ist in jedem Fall 36, auch wenn einige Daten nicht verwendet werden. Die Anzahl der anzugebenden, fortlaufenden Größen *RBEY* für ein Segment *k* ist durch den Wert von *IBEY*(1,*k*) festgelegt. Den hiervon nicht benutzten Komponenten von *RBEY* können beliebige Real-Werte passenden Formats zugewiesen werden.

Der Flüssigkeitszutritt in ein Segment *k* kann auf drei verschiedene Weisen erfolgen:

- kontinuierlicher Zustrom wegen eines Druckgradienten,
- kontinuierliche gezielte Auffüllung im Zeitintervall *RBTY*(2,*k*) bis *RBEY*(25,*k*),
- instantane Auffüllung mit einem vorgegebenen Flüssigkeitsvolumen *RBEY*(8,*k*).

Bei der kontinuierlichen oder der instantanen Auffüllung kommt die Flüssigkeitsmenge aus dem "Nichts", d.h. es wird kein Zufluss simuliert und es ist nicht zu erwarten, dass

die Flüssigkeitsbilanz in der Gesamtgrube stimmt. Die Auffüllung des Segments findet immer statt, wenn $RBTY(2,k) \leq RBTY(1,k)$ ist. Gilt ferner $RBEY(25,k) > RBTY(2,k)$ so findet eine kontinuierliche Auffüllung des Segments statt, andernfalls wird das Segment instantan gefüllt.

Bei der instantanen Auffüllung kann ein Flüssigkeitsvolumen als $RBEY(8,k)$ angegeben werden, das zu dem bereits vorhandenen Flüssigkeitsvolumen addiert wird. Ist das sich dann ergebende Flüssigkeitsvolumen größer als das zur Verfügung stehende Hohlraumvolumen, wird das Flüssigkeitsvolumen auf das Hohlraumvolumen reduziert. Der Anfangswert des Fluiddrucks richtet sich nach der Höhe des Flüssigkeitsspiegels im Segment und dem Luftdruck. Wird jedoch $RBEY(8,k) \geq 10^6$ gesetzt, so wird das Endlager als vollständig gefüllt angenommen und der Anfangswert des Fluiddrucks auf den hydrostatischen Druck in der Teufe des Segments gesetzt.

Bei Angabe des Abstands $RBEY(15,k)$ des Mittelpunktes eines Segments k zur Referenztiefe ist ein Koordinatensystem mit dem Ursprung auf dem Referenzniveau und der z- Richtung nach oben zu wählen, d.h. für Segmente in größerer Teufe als das Referenzniveau müssen für den Abstand negative Werte eingesetzt werden.

Bei Segmenten, in denen Gasspeicherung und Flüssigkeitsverdrängung durch Gas modelliert werden, wird die anfangs vorhandene Grubenluft berücksichtigt, so dass der jeweilige Gasspeicher vor dem Flüssigkeitszutritt mit Gas unter dem aktuellen Gasdruck gefüllt ist. Nach Auffüllung eines Segments steht jeweils der Gasspeicher zur Verfügung, der sich lokal aus $FGAS = RBEY(14,k)$ bestimmt.

6.1 Segmentmodelle für Ein- bzw. Austrittsstellen:

VIQQN3

Kurzbeschreibung:

Modell für einen unbegrenzten Laugenzu- und Austritt mit vertikaler Orientierung

Querschnitt: rechteckig
Porosität: lokal
Permeabilität: global
Konvergenz: keine
Austauscheffekte: Diffusion, Dispersion, Konvektion durch Dichtegradienten über vorgegebene effektive Länge und Querschnittsfläche

Eingangsparameter *IBEY*:

Nummer	Bedeutung	Wert
1	Anzahl der Eingangsdaten RBEY	20
2	Anzahl der Ströme RUZY	1
3	Anzahl der Ströme RUSY	3
4	Anzahl der Ausgabegrößen RUDY	10
5	Anzahl der auszugeb. zeitabhängigen Variablen RBPY	29
6	Nummer des Temperaturverlaufs im Ausgangssegment	

Eingangsparameter *RBEY*:

Nummer	Bedeutung	Dimension
1	Höhe des Ausgangssegments	m
2	Breite des Ausgangssegments	m
3	Länge des Ausgangssegments	m
5	Abstand zur Referenztiefe	m
18	Porosität im Ausgangssegment	-
19	effektive Länge für Austauscheffekte	m
20	effektiver Querschnitt für Austauscheffekte	m ²

Globale Daten RGY:

Nummer	Bedeutung	Dimension
1	Erdbeschleunigung	m/s^2
4	mittlere Dichte der Lauge	kg/m^3
6	Gebirgstemperatur in der Referenztiefe	K
7	geothermischer Temperaturgradient	K/m
8	hydrostatischer Druck in der Referenztiefe	MPa
12	Atmosphärendruck	MPa
51	Permeabilität	-

6.2 Segmentmodelle für versetzte Strecken

HVSQKN

Kurzbeschreibung:

Modell für horizontale versetzte Strecke mit Zusatzvolumen, Druckaufbau im Zufluss durch Anstieg des Flüssigkeitsspiegels, keine Gasspeicherung, ggf. kontinuierliche Auffüllung im Intervall $RBTY(2,k)$ bis $RBEY(25,k)$, Variation des lokalen Gebirgsdrucks mit $RBEY(29,k)$, ggf. kontinuierlich zwischen den Zeitpunkten $RGY(16)$ und $RGY(17)$ bis auf $RGY(15)$ ansteigender Luftdruck

Querschnitt:	rechteckig
Porosität:	lokal
Permeabilität:	aus Porosität
Konvergenz:	versetzter Hohlraum
Unterteilung:	möglich
Austauscheffekte:	Diffusion, Dispersion, Konvektion durch Dichtegradienten

Eingangsparameter *IBEY*:

Nummer	Bedeutung	Wert
1	Anzahl der Eingangsdaten <i>RBEY</i>	29
2	Anzahl der Ströme <i>RUZY</i>	1
3	Anzahl der Ströme <i>RUSY</i>	3
4	Anzahl der Ausgabegrößen <i>RUDY</i>	30
5	Anzahl der auszugebenen zeitabh. Variablen <i>RBPY</i>	29
6	Nr. des Temperaturverlaufs für Versatz	
12	Anzahl paralleler Strecken	
14	Nr. der Spalte mit Löslichkeitsgrenzen in der Elementdatei	
15	Nr. der Spalte mit den Sorptionsdaten in der Elementdatei	
19	Diskretisierung: Anzahl Blöcke = $2 \cdot IBEY(19,k) + 1$	

Eingangsparameter *RBEY*:

Nummer	Bedeutung	Dimension
1	Höhe der Strecke	m
2	Breite der Strecke	m
3	Länge der Strecke	m
7	Zusatzvolumen	m ³
8	Flüssigkeitsmenge bei spontanem Zufluss	m ³
9	Masse des sorbierenden Materials	kg
15	Abstand zur Referenztiefe	m
16	Faktor zur lokalen Variation der Konvergenz	-
18	Anfangswert der Versatzporosität	-
21	Parameter des Feuchtekriechens	-
22	Grenzdruck für voll ausgeprägtes Feuchtekriechen	MPa
23	Parameter der Vorgeschichte der Konvergenz	-
24	Grenzporosität	-
25	Endzeitpunkt für kontinuierliche Auffüllung	a
29	Faktor zur Variation des lokalen Gebirgsdrucks	-

Globale Daten *RGY*:

Nummer	Bedeutung	Dimension
1	Erdbeschleunigung	m/s ²
3	mittlere Gesteinsdichte	kg/m ³
4	mittlere Dichte der Flüssigkeit	kg/m ³
6	Gebirgstemperatur in der Referenztiefe	K
7	geothermischer Temperaturgradient	K/m
8	hydrostatischer Druck in der Referenztiefe	MPa
9	Gebirgsdruck in der Referenztiefe	MPa
12	Atmosphärendruck	MPa
15	aufgeprägter Luftdruck	MPa
16	Beginn der Luftdrucksteigerung	a
17	Ende der Luftdrucksteigerung	a
21	Referenzkonvergenzrate	1/a
22	Referenzporosität	-
25	Spannungsexponent	-
28	Referenzwert der Trockenkonvergenzrate	1/a

HKSQNN

Kurzbeschreibung:

Modell für horizontales Streckensegment mit nicht kompaktierbarem Versatz, Druckaufbau im Zufluss durch Anstieg des Flüssigkeitsspiegels, keine Gasspeicherung, ggf. kontinuierliche Auffüllung im Intervall $RBTY(2,k)$ bis $RBEY(25,k)$, ggf. kontinuierlich zwischen den Zeitpunkten $RGY(16)$ und $RGY(17)$ bis auf $RGY(15)$ ansteigender Luftdruck

Querschnitt:	rechteckig
Porosität:	lokal
Permeabilität:	lokal
Konvergenz:	keine
Unterteilung:	möglich
Austauscheffekte:	Diffusion, Dispersion, Konvektion durch Dichtegradienten

Eingangsparameter *IBEY*:

Nummer	Bedeutung	Wert
1	Anzahl der Eingangsdaten <i>RBEY</i>	25
2	Anzahl der Ströme <i>RUZY</i>	1
3	Anzahl der Ströme <i>RUSY</i>	3
4	Anzahl der Ausgabegrößen <i>RUDY</i>	30
5	Anzahl der auszugeb. zeitabhängigen Variablen <i>RBPY</i>	29
6	Nr. des Temperaturverlaufs für Versatz	
12	Anzahl paralleler Strecken	
14	Nr. der Spalte mit Löslichkeitsgrenzen in der Elementdatei	
15	Nr. der Spalte mit den Sorptionsdaten in der Elementdatei	
19	Diskretisierung: Anzahl Blöcke = $2 \cdot IBEY(19,k) + 1$	

Eingangsparameter *RBEY*:

Nummer	Bedeutung	Dimension
1	Höhe der Strecke	m
2	Breite der Strecke	m
3	Länge der Strecke	m
8	Flüssigkeitsmenge bei spontanem Zufluss	m ³
9	Masse des sorbierenden Materials	kg
15	Abstand zur Referenztiefe	m
17	Permeabilität des nichtkompaktierbaren Versatzes	m ²
18	Porosität des nichtkompaktierbaren Versatzes	-
25	Endzeitpunkt für kontinuierliche Auffüllung	a

Globale Daten *RGY*:

Nummer	Bedeutung	Dimension
1	Erdbeschleunigung	m/s ²
4	mittlere Dichte der Flüssigkeit	kg/m ³
6	Gebirgstemperatur in der Referenztiefe	K
7	geothermischer Temperaturgradient	K/m
8	hydrostatischer Druck in der Referenztiefe	MPa
12	Atmosphärendruck	MPa
15	aufgeprägter Luftdruck	MPa
16	Beginn der Luftdrucksteigerung	a
17	Ende der Luftdrucksteigerung	a

6.3 Segmentmodelle für Einlagerungsgrubenbaue

VBHRKN

Kurzbeschreibung:

Modell für ein Einlagerungsbohrloch mit Verschluss, mit Gasbildung und Gassammlung aus vorgegebenen Segmenten incl. anfänglichem Luftvolumen, Druckaufbau im Zufluss durch Laugenspiegelanstieg, Laugenverdrängung durch Gas und Änderung des Feststoffvolumens, ggf. kontinuierliche Flutung im Intervall $RBTY(2,k)$ bis $RBEY(25,k)$, Variation des lokalen Gebirgsdrucks mit $RBEY(29,k)$

Querschnitt:	rund
Porosität:	aus Abfall, Versatz: lokal, Verschluss: global
Permeabilität:	aus Porosität
Konvergenz:	reduziert
Unterteilung:	keine
Austauscheffekte:	Diffusion, Dispersion, Konvektion durch Dichtegradienten
Mobilisierung:	instantan, aus Glasmatrix, aus Zementmatrix oder aus LWR-BE

Eingangsparameter *IBEY*:

Nummer	Bedeutung	Wert
1	Anzahl der Eingangsdaten <i>RBEY</i>	29
2	Anzahl der Ströme <i>RUZY</i>	1
3	Anzahl der Ströme <i>RUSY</i>	3
4	Anzahl der Ausgabegrößen <i>RUDY</i>	38
5	Anzahl der auszugeb. zeitabhängigen Variablen <i>RBPY</i>	30
6	Nr. des Temperaturverlaufs für Versatz	
7	Nr. des Temperaturverlaufs für Verschluss	
8	Nr. des Temperaturverlaufs für die Mobilisierung	
14	Nr. der Spalte mit Löslichkeitsgrenzen in der Elementdatei	
15	Nr. der Spalte mit Sorptionsdaten in der Elementdatei	
16	Schalter für elementspezifische Mobilisierung: elementunabhängig:	0
	sonst: Nr. der Spalte der ELDA-Datei mit den element- spezifischen Mobilisierungsdauern	
17	Schalter für Behälterausfallfunktion:	

	instantan:	0
	linear:	1
	exponentiell:	2
	normal:	3
18	Schalter für Mobilisierung laut Abfallkonditionierung:	
	nicht verfestigter Abfall (instantane Mobilisierung):	0
	verglaster Abfall:	1
	zementierter Abfall:	2
	LWR-BE:	3
20	Schalter für die Gasproduktion (Format I3: <i>IJK</i>)	
	<i>I</i> : Schalter für Metallkorrosion,	
	<i>J</i> : Schalter für Zellulosezersetzung,	
	<i>K</i> : Schalter für Zersetzung sonstiger Organika	
	Bedeutung der Schalter:	
	keine Korrosion oder Zersetzung	0
	konstante Korrosions- Zersetzungsrate	1
	linear abnehmende Korrosions- Zersetzungsrate	2
	exponentiell abnehmende Korrosions- Zersetzungsrate	3
25	Nr. des ersten gasliefernden Segments	
36	Nr. des letztmöglichen gasliefernden Segments	

Eingangsparameter RBEY:

Nummer	Bedeutung	Dimension
1	Radius vom Bohrloch	m
3	Gesamtlänge des Bohrlochs incl. zweimal Verschluss	m
4	Radius vom Bohrlochverschluss	m
6	Länge des Bohrlochverschlusses	m
8	Laugenmenge bei spontanem Zufluss	m ³
9	Masse des sorbierenden Materials	kg
10	mittlere Behälterstandzeit	a
11	Streubreite der Behälterstandzeit	a
12	Mobilisierungsrate	1/a
14	Anteil des Gasspeichers am Porenvolumen	-
15	Abstand zur Referenztiefe	m
16	Faktor zur lokalen Variation der Konvergenz	-
18	Anfangsporosität vom Versatz	-

21	Parameter des Feuchtekriechens	-
22	Grenzdruck für voll ausgeprägtes Feuchtekriechen	MPa
23	Parameter der Vorgeschichte der Konvergenz	-
24	Grenzporosität	-
25	Endzeitpunkt für kontinuierliche Flutung	a
26	Reduktionsfaktor für Konvergenz im trockenen Bohrloch	-
27	Reduktionsfaktor für Konvergenz im gefluteten Bohrloch	-
29	Faktor zur Variation des lokalen Gebirgsdrucks	-

Globale Daten RGY:

Nummer	Bedeutung	Dimension
1	Erdbeschleunigung	m/s ²
2	Gaskonstante	MJ/(mol·K)
3	mittlere Gesteinsdichte	kg/m ³
4	mittlere Dichte der Lauge	kg/m ³
6	Gebirgstemperatur in der Referenztiefe	K
7	geothermischer Temperaturgradient	K/m
8	hydrostatischer Druck in der Referenztiefe	MPa
9	Gebirgsdruck in der Referenztiefe	MPa
12	Atmosphärendruck	MPa
13	Dichte des Feststoffs (Metall)	kg/m ³
21	Referenzkonvergenzrate	1/a
22	Referenzporosität	-
25	Spannungsexponent	-
28	Referenzwert der Trockenkonvergenzrate	1/a
31	Reduktionsfaktor für Konvergenz im Bohrlochstopfen	-
145	Anfangsporosität vom Verschluss	-

Abfallspezifische Daten RAGY:

Nummer	Bedeutung	Dimension
2	Metallmasse 1	kg
3	gesamtes Abfallvolumen	m ³
4	Hohlraumvolumen im Abfall, kompaktierbar	m ³
6	Metallmasse 2 oder Zellulosemasse	kg
7	Masse der Organika	kg

6.4 Segmentmodelle für Laugeneinschlüsse

HLEUV1

Kurzbeschreibung:

Modell für ein horizontal orientiertes Laugeneinschluss-Segment (poröser Hohlraum), mit einem fiktiven konstanten Strömungswiderstand $1/RBEY(2,k)$. Anfangswert des Fluiddrucks in der Segmentmitte ist gleich dem dortigen Gebirgsdruck. Keine Gasspeicherung, Variation des lokalen Gebirgsdrucks mit $RBEY(29,k)$. Nach Öffnung einer Wegsamkeit zum Nachbarsegment bei $RBTY(2,k)$ ergibt sich der Fluiddruck aus der globalen Druckberechnung.

Querschnitt: unbestimmt
Porosität: fiktiver lokaler Anfangswert
Permeabilität: entfällt (fiktiver Strömungswiderstand)
Konvergenz: reduziert durch "Versatz"
Unterteilung: keine
Austauscheffekte: Diffusion, Dispersion, Konvektion durch Dichtegradienten über vorgegebene effektive Länge und Querschnittsfläche

Eingangsparameter *IBEY*:

Nummer	Bedeutung	Wert
1	Anzahl der Eingangsdaten <i>RBEY</i>	29
2	Anzahl der Ströme <i>RUZY</i>	1
3	Anzahl der Ströme <i>RUSY</i>	3
4	Anzahl der Ausgabegrößen <i>RUDY</i>	30
5	Anzahl der auszugebenden zeitabh. Variablen <i>RBPY</i>	29
6	Nr. des Temperaturverlaufs für Versatz	
14	Nr. der Spalte mit Löslichkeitsgrenzen in der Elementdatei	
15	Nr. der Spalte mit den Sorptionsdaten in der Elementdatei	

Eingangsparameter *RBEY*:

Nummer	Bedeutung	Dimension
1	Höhe des Einschlusses	m
2	Leitwert (inverser Strömungswiderstand)	$\text{m}^3/\text{a}/\text{MPa}$
9	Masse des sorbierenden Materials	kg
15	Abstand zur Referenztiefe	m
16	Faktor zur lokalen Variation der Konvergenz	-
18	Anfangswert der Versatzporosität	-
19	effektive Länge für Diffusion	m
20	effektive Fläche für Diffusion	m^2
21	Parameter des Feuchtekriehens	-
23	Parameter der Vorgeschichte der Konvergenz	-
24	Grenzporosität	-
29	Faktor zur Variation des lokalen Gebirgsdrucks	-

Globale Daten *RGY*:

Nummer	Bedeutung	Dimension
1	Erdbeschleunigung	m/s^2
3	mittlere Gesteinsdichte	kg/m^3
4	mittlere Dichte der Lauge	kg/m^3
6	Gebirgstemperatur in der Referenztiefe	K
7	geothermischer Temperaturgradient	K/m
8	hydrostatischer Druck in der Referenztiefe	MPa
9	Gebirgsdruck in der Referenztiefe	MPa
12	Atmosphärendruck	MPa
21	Referenzkonvergenzrate	1/a
22	Referenzporosität	-
25	Spannungsexponent	-
28	Referenzwert der Trockenkonvergenzrate	1/a

VLEUV1

Kurzbeschreibung:

Modell für ein vertikal orientiertes Laugeneinschluss-Segment (poröser Hohlraum), mit einem fiktiven konstanten Strömungswiderstand $1/RBEY(2,k)$. Anfangswert des Fluid-drucks in der Segmentmitte ist gleich dem dortigen Gebirgsdruck. Keine Gasspeicherung, Variation des lokalen Gebirgsdrucks mit $RBEY(29,k)$. Nach Öffnung einer Wegsamkeit zum Nachbarsegment bei $RBTY(2,k)$ ergibt sich der Anfangswert des Fluid-druck aus dem Druck auf der Sohle des Nachbarsegments plus dem Druck der halben Flüssigkeitssäule im Laugeneinschluss-Segment.

Querschnitt: unbestimmt
Porosität: fiktiver lokaler Anfangswert
Permeabilität: entfällt (fiktiver Strömungswiderstand)
Konvergenz: reduziert durch "Versatz"
Unterteilung: keine
Austauscheffekte: Diffusion, Dispersion, Konvektion durch Dichtegradienten über vorgegebene effektive Länge und Querschnittsfläche

Eingangsparameter *IBEY*:

Nummer	Bedeutung	Wert
1	Anzahl der Eingangsdaten <i>RBEY</i>	29
2	Anzahl der Ströme <i>RUZY</i>	1
3	Anzahl der Ströme <i>RUSY</i>	3
4	Anzahl der Ausgabegrößen <i>RUDY</i>	30
5	Anzahl der auszugeb. zeitabhängigen Variablen <i>RBPY</i>	29
6	Nr. des Temperaturverlaufs für Versatz	
14	Nr. der Spalte mit Löslichkeitsgrenzen in der Elementdatei	
15	Nr. der Spalte mit den Sorptionsdaten in der Elementdatei	

Eingangsparameter *RBEY*:

Nummer	Bedeutung	Dimension
2	Leitwert (inverser Strömungswiderstand)	$\text{m}^3/\text{a}/\text{MPa}$
1	Höhe des Einschlusses	m
9	Masse des sorbierenden Materials	kg
15	Abstand zur Referenztiefe	m
16	Faktor zur lokalen Variation der Konvergenz	-
18	Anfangswert der Versatzporosität	-
19	effektive Länge für Diffusion	m
20	effektive Fläche für Diffusion	m^2
21	Parameter des Feuchtekriehens	-
23	Parameter der Vorgeschichte der Konvergenz	-
24	Grenzporosität	-
29	Faktor zur Variation des lokalen Gebirgsdrucks	-

Globale Daten *RGY*:

Nummer	Bedeutung	Dimension
1	Erdbeschleunigung	m/s^2
3	mittlere Gesteinsdichte	kg/m^3
4	mittlere Dichte der Lauge	kg/m^3
6	Gebirgstemperatur in der Referenztiefe	K
7	geothermischer Temperaturgradient	K/m
8	hydrostatischer Druck in der Referenztiefe	MPa
9	Gebirgsdruck in der Referenztiefe	MPa
12	Atmosphärendruck	MPa
21	Referenzkonvergenzrate	1/a
22	Referenzporosität	-
25	Spannungsexponent	-
28	Referenzwert der Trockenkonvergenzrate	1/a

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

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

Forschungsinstitute
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