



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

**Einfluß netzwerk-
artiger Strukturen der
Grubenhohlräume
auf die Langzeitsi-
cherheit eines End-
lagers im Salinar**



Gesellschaft für Anlagen-
und Reaktorsicherheit
(GRS) mbH

Einfluß netzwerkartiger Strukturen der Gruben- hohlräume auf die Lang- zeitsicherheit eines Endla- gers im Salinar

Jürgen Brenner,
Dieter Buhmann,
Thomas Kühle

Braunschweig

März 2000

Anmerkung:

Das diesem Bericht zugrundeliegen-
den Arbeiten wurden mit Mitteln des
Bundesministeriums für Wirtschaft
und Technologie (BMWi) unter dem
Förderkennzeichen 02 E 8845 4
gefördert.

Die Arbeiten wurden von der Gesell-
schaft für Anlagen und Reaktorsich-
erheit (GRS) mbH durchgeführt.

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

GRS - 163
ISBN 3-931995-28-3

Deskriptoren:

Endlagerung, Gasbildung, Langzeitsicherheit, Probabilistik, Radioaktiver Abfall, Rechenverfahren, Salz, Simulation

Abstract

The long-term safety of a repository with radioactive waste in salt highly depends on the performance of the near field within the salt dome. In this report, the differences in modelling the open voids of the near field as a tree-like structure or as a network structure are investigated. Furthermore, the consequences of a gas production in the emplacement sites have been investigated, and the location of the brine intrusion into the near field has been varied to demonstrate its influence on the calculated consequences. The repository was assumed to be for direct disposal of spent fuel elements from light water reactors. The results of the calculations for tree-like structure show small differences to the results for network structure, which can be mainly attributed to differences in the numerical procedures of the respective computer codes. The computer code LOPOS is used for network structures. It turned out to be more flexible for complex near field structures than the computer code REPOS for tree-like structures. In deterministic calculations, the location of the brine intrusion turned out to be of high importance to the calculated doses. This was supported by a probabilistic calculation using Monte-Carlo techniques. The gas production in the near field turned out to be of minor influence on the doses for the given repository. All the calculated doses are below the limit of the German radiation protection law.

Inhaltsverzeichnis

	Abstract	I
	Inhaltsverzeichnis	III
1	Einleitung	1
2	Modellierung und Eingangsdaten	3
2.1	Geometrie des Grubengebäudes	4
2.2	Eingangsparameter	11
2.2.1	Inventare und Daten zum Pollux-Behälter	11
2.2.2	Daten zur Mobilisierung und zum Grubengebäude	11
2.2.3	Daten zum Deckgebirge und zur Biosphäre	20
3	Vergleich Baumstruktur / Netzwerkstruktur	23
3.1	Vergleich Baumstruktur mit REPOS und LOPOS	23
3.2	Vergleich Baum- und Netzwerkstruktur mit LOPOS	32
3.2.1	Laugenzutritt im Zentralteil	33
3.2.2	Laugenzutritt in eine Flankenstrecke	35
3.2.3	Laugenzutritt an weiteren Stellen des Grubengebäudes	38
4	Einzeluntersuchungen zur Netzwerkstruktur	41
4.1	Referenzfall: Zutrittszeitpunkt 85 Jahre	43
4.2	Variante: 10-fach höheres Volumen der begrenzten Laugeneinschlüsse	45
4.3	Variante: Zutrittszeitpunkt 0 Jahre	51
4.4	Vergleich der Varianten unter Berücksichtigung variabler Zutrittsorte	54
5	Einfluß der Gasbildung	61
5.1	Mechanismen der Gasbildung	61
5.2	Modellierung der Auswirkung der Gasbildung	62
5.2.1	Auswirkung in Einlagerungsorten	62
5.2.2	Auswirkung in anderen Teilen des Grubengebäudes	63
5.3	Gerechnete Fälle und Eingangsparameter	63
5.3.1	Daten zur Gasbildung in den Einlagerungsorten	64

5.3.2	Daten zur Gassammlung im Zentralteil	64
5.4	Ergebnisse der Modellrechnungen mit Gasbildung	65
5.4.1	Einfluß der Gasbildung in den Einlagerungsorten	65
5.4.2	Einfluß der Gassammlung außerhalb der Einlagerungsorte	68
5.5	Zusammenfassung zum Einfluß der Gasbildung	73
6	Probabilistische Rechnungen	75
6.1	Eingangsdaten für die probabilistischen Rechnungen	75
6.2	Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulation	77
6.2.1	Ergebnisse einzelner Spiele der Monte-Carlo-Simulation	78
6.2.2	Unsicherheitsanalyse	83
6.2.3	Sensitivitätsanalyse	88
6.3	Zusammenfassung der Monte-Carlo-Rechnung	93
7	Zusammenfassung	95
8	Literatur	97
	Abbildungsverzeichnis	99
	Tabellenverzeichnis	101

1 Einleitung

Der Nachweis der langfristigen Sicherheit eines Endlagers für gefährliche Abfälle wird mit Hilfe von Computerprogrammen erbracht. Mit diesen Programmen können komplexe und über lange Zeiträume ablaufende Vorgänge simuliert werden, so daß eine Bewertung der normalen Entwicklung eines Endlagers und der Konsequenzen von eventuellen Störfällen möglich ist. In der vorliegenden Studie wird das Programmpaket EMOS [4] für diese Berechnungen verwendet.

Zur Einlagerung von Schadstoffen, insbesondere hochradioaktiven Abfällen, sind in Deutschland Salzformationen vorgesehen. Salz ist plastisch, d. h. unter Druck und insbesondere bei hohen Temperaturen verformbar, so daß sich Einlagerungshohlräume im Laufe der Zeit wieder schließen. Außerdem ist Salz eine weitgehend trockene Formation, so daß die eingelagerten Schadstoffe im Normalfall nicht in Kontakt mit Wasser kommen und somit kein Transportmedium für die Freisetzung der Schadstoffe zur Verfügung steht. Störfälle sind nach Beendigung der Einlagerung in einem Salzstock nicht auszuschließen und daher im Rahmen von Langzeitsicherheitsanalysen zu betrachten.

Zur Berechnung der normalen Entwicklung des Nahbereichs eines Endlagers im Salz und zur Berechnung der Konsequenzen bei Störfällen wurden die Computerprogramme LOPOS3, Version 3.00 [6] und REPOS6, Version 6.06 [11] als Module des Programmpakets EMOS eingesetzt. Beide verwenden ähnliche Algorithmen zur Berechnung der Verformung des Salzes, zur Berechnung der Bewegung der in einem Störfall vorhandenen Lösungen und zur Ausbreitung der Schadstoffe im Endlager. Sie unterscheiden sich in der Modellierung der geometrischen Anordnung der Einlagerungsbereiche und der Verknüpfungen zwischen diesen Bereichen. Während in REPOS nur baumförmige Strukturen behandelt werden können, sind in LOPOS auch netzwerkartige Verknüpfungen erlaubt.

Im folgenden wird zunächst untersucht, ob die unterschiedlichen Modellierungen in REPOS und LOPOS Auswirkungen auf die berechneten Konsequenzen haben. Für die dann folgenden Untersuchungen wird nur noch der Rechencode LOPOS verwendet, da dieser sowohl eine baumförmige als auch eine netzwerkartige Modellierung erlaubt und da die Resultate für Baumstruktur im wesentlichen mit REPOS übereinstimmen.

In Kapitel 2 werden das für die Rechnungen verwendete Modell-Endlager vorgestellt und die wesentlichen Eingangsparameter zusammengestellt. Als Grundlage für die Modellierung dient ein Endlager für abgebrannte LWR-Brennelemente, die direkt in Strecken eingelagert werden. Ein solches Endlager wurde im Rahmen des Projektes "Spent fuel performance assessments" der Europäischen Union vorgestellt [2].

In den folgenden Kapiteln werden die Ergebnisse für REPOS und LOPOS verglichen, die Auswirkungen der Netzwerkstruktur diskutiert und der Einfluß einer eventuell möglichen Gasproduktion untersucht. Danach werden die Ergebnisse einer probabilistischen Rechnung vorgestellt, bei der insbesondere der Laugenzutrittsort bei einem Störfall als zufällige Variable berücksichtigt wurde.

Neben den Programmen REPOS6 und LOPOS3 wurden die Programme CHETLIN2, Verion 2.03 und EXCON1, Version 1.03 des Programmpakets EMOS verwendet. Mit CHETLIN2 wurde der Transport in der Geosphäre und mit EXCON1 die Dosisbelastung in der Biosphäre berechnet.

2 Modellierung und Eingangsdaten

Ein mögliches Endlagerkonzept für wärmeproduzierende hochaktive Abfälle aus der Wiederaufarbeitung von abgebrannten Brennelementen sieht die Einlagerung in Bohrlöchern vor und für mittel- und schwachaktive Abfälle die Einlagerung in Kammern [3]. Außerdem werden abgebrannte Brennelemente aus Leichtwasser-Reaktoren (LWR) in dickwandigen Pollux-Behältern in Strecken direkt endgelagert.

Die folgenden Betrachtungen berücksichtigen nur das Konzept der direkten Endlagerung, wobei die erwarteten Abfallmengen für das Endlager bei 500 t_{SM} (= Tonnen Schwermetall) pro Jahr liegen. Bei einer Betriebsdauer des Endlagers von 50 Jahren ist somit ein Abfallaufkommen von 25 000 t_{SM} in direkt endgelagerten Brennelementen zu erwarten. In einem Pollux-Behälter befinden sich 8 Brennelemente mit insgesamt 4,272 t_{SM}. Im Grubengebäude werden somit 5850 Pollux-Behälter in Strecken endgelagert. Tabelle 2.1 enthält die Zusammenstellung dieser Daten.

Das hypothetische Grubengebäude ist in 5 Einlagerungsabschnitte (siehe Kapitel 2.1) unterteilt, so daß bei einer monotonen Auffüllung des Grubengebäudes die Betriebsphase für einen Einlagerungsabschnitt 10 Jahre beträgt. Die Tabelle 2.1 stellt die zeitliche Abfolge der Einlagerung zusammen. Die Rechnungen für die Langzeitsicherheit berücksichtigen den zeitlichen Ablauf der Betriebsphase und die Zeit nach Verschuß des Grubengebäudes, die Nachbetriebsphase. Der Übergang von der Betriebsphase zur Nachbetriebsphase wird als Zeitnullpunkt festgelegt. Die Modellrechnungen werden bis 1 Million Jahre durchgeführt.

Die Planungen für das Grubengebäude lehnen sich an bisherige Studien für ein Endlager in einer Salzformation am Standort Gorleben an [5]. Im folgenden werden die Annahmen und Eingangsdaten für die Modellierung des Grubengebäudes und des Abfalls sowie die berücksichtigten Effekte für die Freisetzungsrechnungen im Grubengebäude und die Ausbreitungsrechnungen im Deckgebirge zusammengestellt. Für die Werte einiger Eingangsdaten werden die Schwankungsbreite und Verteilung für eine probabilistische Behandlung angegeben.

Tabelle 2.1: Abfallaufkommen und Einlagerungszyklen.

Abfallmenge	500 t _{SM} /Jahr	
Dauer der Betriebsphase	50 Jahre	
Gesamtabfallmenge	25 000 t _{SM}	
Abfallmenge pro Pollux-Behälter	4,272 t _{SM}	
Beginn der Nachbetriebsphase (= zeitlicher Bezugspunkt)	0 Jahre	
Ende der Modellrechnungen	1 000 000 Jahre	
Betriebsphase	Einlagerungsende	Pollux
Abschnitt 1	-40 Jahre	1 170 St.
Abschnitt 2	-30 Jahre	1 170 St.
Abschnitt 3	-20 Jahre	1 170 St.
Abschnitt 4	-10 Jahre	1 170 St.
Abschnitt 5	0 Jahre	1 170 St.
	Summe	5 850 St.

2.1 Geometrie des Grubengebäudes

Das hypothetische Grubengebäude ist in Abbildung 2.1 dargestellt. Der geschwungene Verlauf soll der unsymmetrischen Form des Salzstockes Rechnung tragen. Das Grubengebäude ist in 5 Einlagerungsabschnitte aufgeteilt, die durch Flankenstrecken miteinander verbunden sind. Zwischen dem 5. Einlagerungsabschnitt und dem Schachtbereich befindet sich der Zentralteil, in dem alle Infrastrukturbereiche zusammengefaßt sind. Alle Auffahrungen liegen auf einer Sohle.

Ein Einlagerungsabschnitt besteht aus drei Feldern. In Abbildung 2.2 ist der Abschnitt 5 im Detail dargestellt. Die Flankenstrecken, die den Einlagerungsabschnitt seitlich begrenzen, sind über Querschläge verbunden. Von jedem Querschlag zweigen 20 Einlagerungsstrecken ab.

Die Flankenstrecken am Ende eines Abschnitts sind durch Dämme von anderen Teilen des Grubengebäudes getrennt, so daß jeder Einlagerungsabschnitt als von Dämmen eingeschlossene Einheit erscheint. Die Anschlüsse der Querschläge an die Flanken-

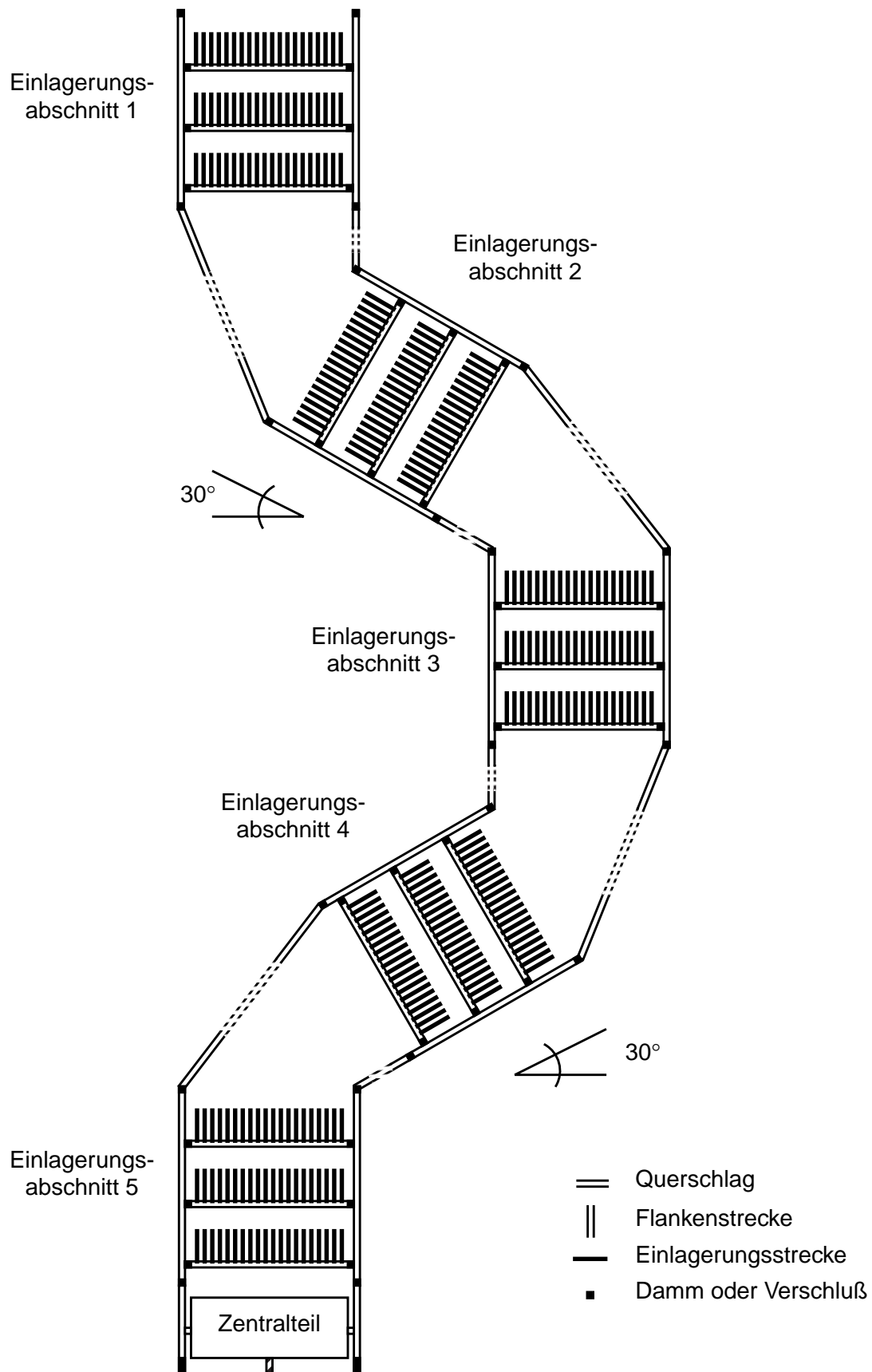


Abb. 2.1: Hypothetisches Grubengebäude eines LWR-Endlagers in einer Salzformation.

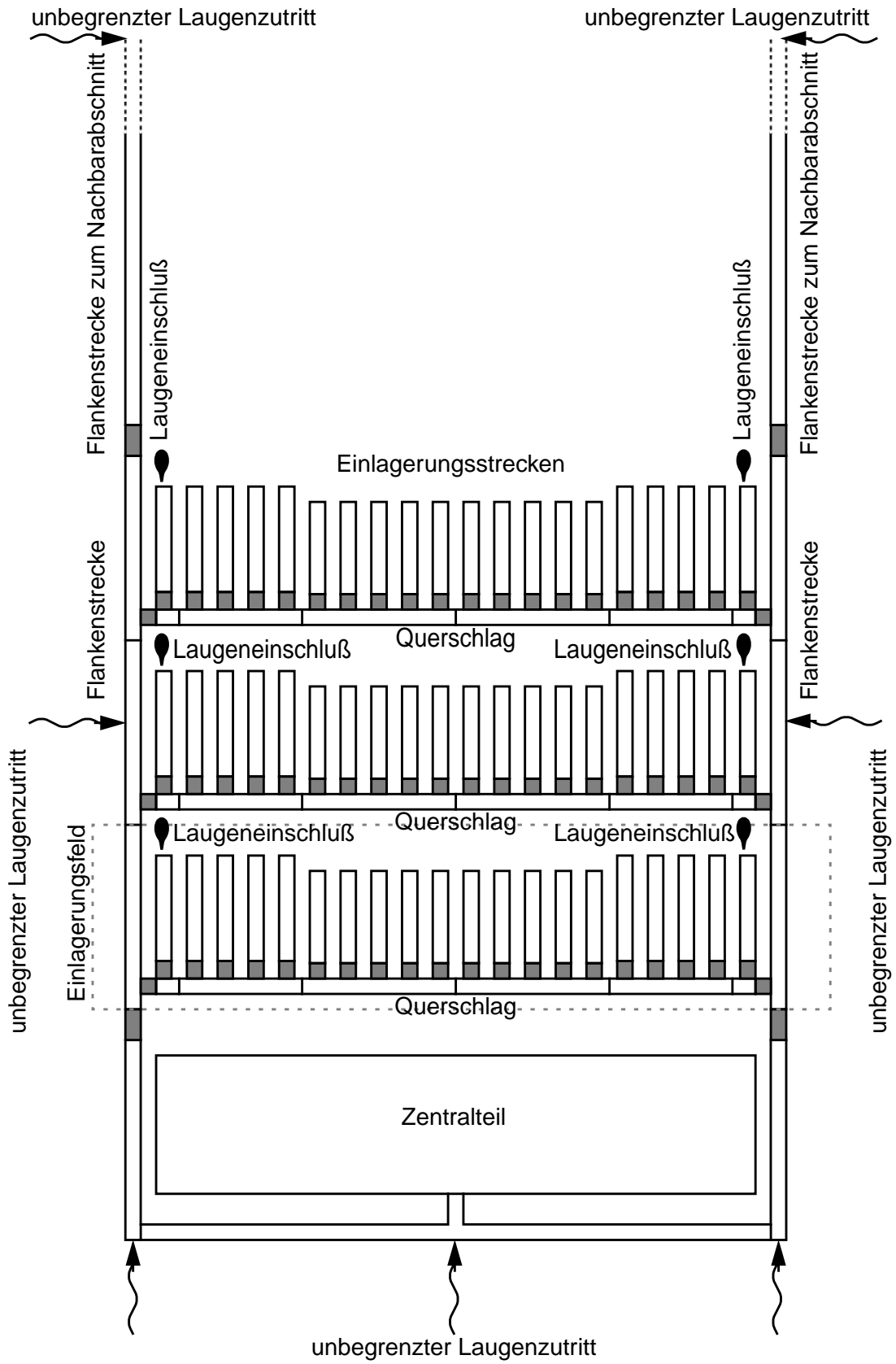


Abb. 2.2: Modellierung des 5. Einlagerungsabschnitts und des Zentralteils.

strecken und die Anschlüsse der Einlagerungsstrecken an die Querschläge erhalten einen Verschuß aus vorkompaktiertem Salzgrus.

Einige als möglich angenommene Zutrittsorte für einen unbegrenzten Laugenzufluß in das Grubengebäude sind ebenfalls in Abbildung 2.2 dargestellt. Aufgrund des Wärmeintrags der eingelagerten Abfälle kann nicht ausgeschlossen werden, daß Gebirgsspannungen zu Rissen in der Salzformation führen. Diese Risse können in der Nähe wasserführender Schichten, z. B. eines Anhydritbandes, entstehen und damit eine Verbindung zwischen benachbarten Auffahrungen im Grubengebäude und einem Grundwasserstrom herstellen. Solche sensitiven Lokationen im Grubengebäude werden an den Flankenstrecken und den Auffahrungen im Zentralteil vermutet. In den Anwendungsrechnungen kann aus den Zutrittsorten jeweils einer beliebig ausgewählt werden.

Makroskopische Laugeneinschlüsse sind an vereinzelt Stellen in einem Salzstock anzutreffen. Es läßt sich nicht ausschließen, daß einige Laugeneinschlüsse in der Nähe von Einlagerungsstellen trotz vorausgehender Erkundungsmaßnahmen unentdeckt bleiben. In den Anwendungsrechnungen wird daher als konservative Annahme an jeder Einlagerungsstrecke in der Nähe der Flankenstrecke ein Laugeneinschluß berücksichtigt. Diese Zutrittsorte für Laugeneinschlüsse sind in Abbildung 2.2 für den Abschnitt 5 eingezeichnet.

In Abbildung 2.3 ist die Segmentstruktur des 5. Abschnitts und des Zentralteils dargestellt, wie sie für die Analyse mit dem Rechenprogramm LOPOS3 verwendet wird. Die Segmentnamen setzen sich aus Buchstaben und Ziffern zusammen, wobei die in Tabelle 2.2 angegebene Namenskonvention mit englischen Bezeichnungen verwendet wird. Die zweistellige Ziffer gibt die Lage im Grubengebäude an. Die erste Ziffer steht für den Abschnitt und die zweite Ziffer für die Feldnummer. Weiterhin werden die Abschnitte, Felder und Strecken in zwei Seiten unterteilt, so daß die Segmente durch die Kennzeichnung L für Left und R für Right unterschieden werden können. Die letzte Ziffer dient gegebenenfalls der feineren Lokalisierung eines Segments.

Einige Einlagerungsstrecken (DD) werden zur Vereinfachung zu jeweils einem Segment zusammengefaßt. Die zusammengefaßten Segmente werden am Namensende durch

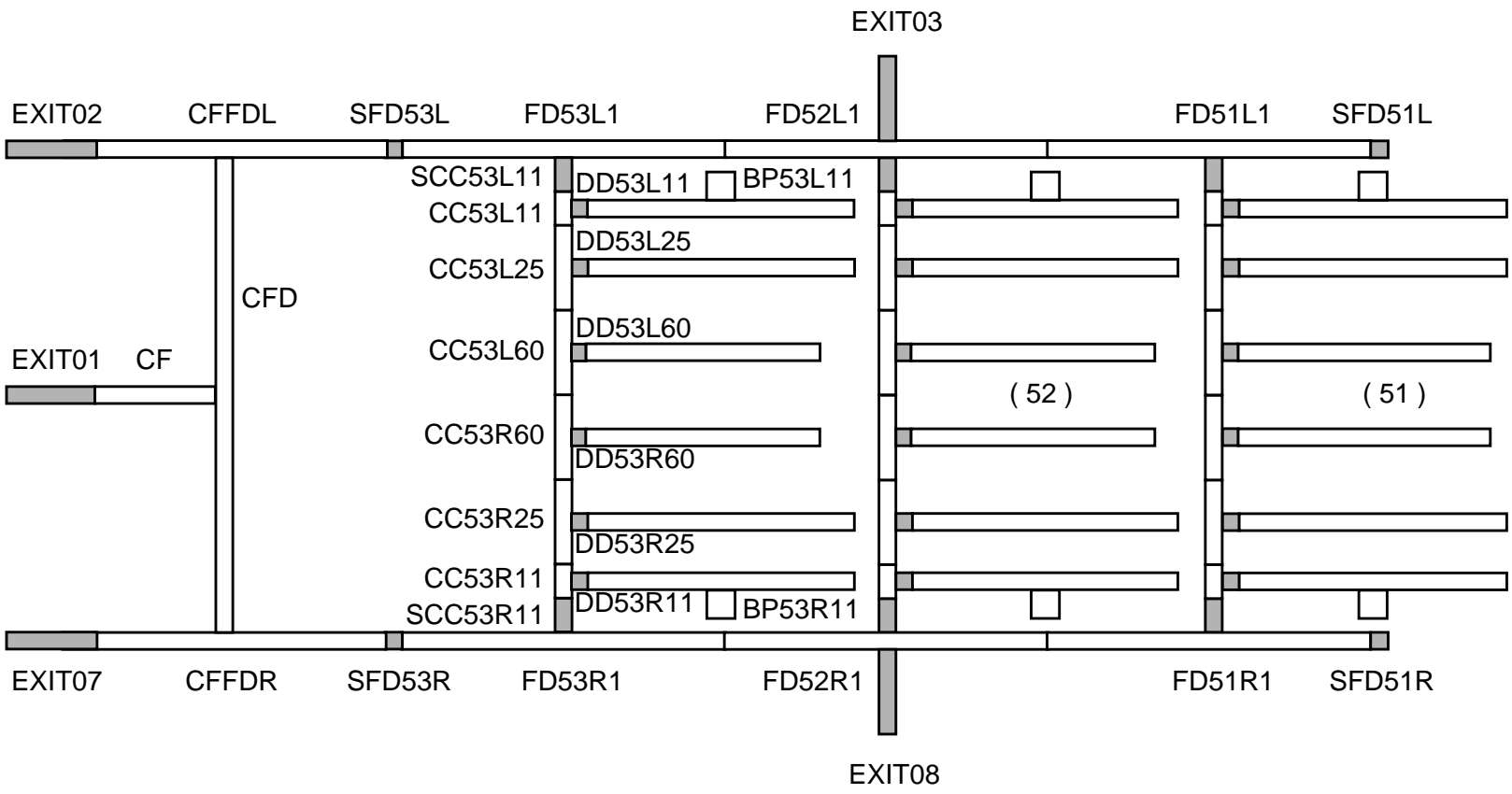


Abb. 2.3: Segmentstruktur des Zentralteils und des 5. Abschnitts für die Analyse mit dem Rechenprogramm LOPOS3.

eine Ziffernfolge charakterisiert. So bedeutet 11 die Einlagerungsstrecke 1 bis 1, 25 die Einlagerungsstrecken 2 bis 5 und 60 die Einlagerungsstrecken 6 bis 10.

Tabelle 2.2: Namenskonvention für die Segmentstruktur.

Kurzbezeichnung	Typ
Einlagerungsabschnitt	
FD	Flankenstrecke eines Einlagerungsabschnitts (flank drift)
SFD	Damm der Flankenstrecke (sealing flank drift)
CC	Querschlag (cross connection)
SCC	Verschluß des Querschlages (sealing cross connection)
DD	Einlagerungsstrecke mit Verschluß (disposal drift)
Zentralteil	
CF	Zentralteil, Infrastrukturbereich (central field)
CFD	Zentralteil, Strecke (central field drift)
CFFD	Flankenstrecke im Zentralteil (central field flank drift)
sonst	
FDC	Flankenstrecke zwischen 2 Abschnitten (flank drift connection)
BP	begrenzter Laugeneinschluß (brine pocket)
EXIT	Zutritts-/Austrittssegment (exit)

Die Tabelle 2.3 enthält die geometrischen Abmessungen aller Segmente des Grubengebäudes. Für einen Einlagerungsabschnitt ergibt sich eine Gesamtlänge der Flankenstrecken von 842,5 m (mit Dämmen) und eine Länge der Querschläge von 342,5 m (mit Verschlüssen). Die Flankenstrecken zwischen den Einlagerungsabschnitten sind unterschiedlich lang, entsprechend dem geschwungenen Verlauf des Grubengebäudes.

Für die Modellrechnungen wird, wie bereits in Abbildung 2.3 gezeigt, die Flankenstrecke eines Einlagerungsabschnitts in drei gleiche Abschnitte von jeweils 247,5 m Länge unterteilt, von denen jeweils ein Querschlag in ein Einlagerungsfeld abzweigt. Die Rechts-/Links-Symmetrie in den Einlagerungsfeldern wird durch die Halbierung der Länge der Querschläge berücksichtigt. Jede Hälfte eines Querschlages wird nochmals diskretisiert, um der Anbindung der Einlagerungsstrecken Rechnung zu tragen. Die inneren zehn

Einlagerungsstrecken sind mit jeweils 19 Pollux-Behältern kürzer als die 2 x 5 äußeren Einlagerungsstrecken mit jeweils 20 Pollux-Behältern.

Tabelle 2.3: Geometriedaten der Segmente.

Typ	Breite	Höhe	Länge/ Volumen
Einlagerungsabschnitt			
Flankenstrecke eines Abschnitts	7,2 m	3,8 m	742,5 m
Damm der Flankenstrecke	7,2 m	3,8 m	50,0 m
Querschlag	7,2 m	3,8 m	320,0 m
Verschuß des Querschlages	7,2 m	3,8 m	11,25 m
Einlagerungsstrecke mit 20 Pollux mit 19 Pollux	4,7 m	3,3 m	214,5 m 204,0 m
Verschuß der Einlagerungsstrecke	4,7 m	3,3 m	15,0 m
Zentralteil			
Zentralteil, Infrastrukturbereich	-	-	326 600 m ³
Zentralteil, Strecke	7,2 m	3,8 m	342,5 m
Flankenstrecke im Zentralteil	7,2 m	3,8 m	350,0 m
sonst			
Flankenstrecke zwi- schen den Abschnitten kurze Seite lange Seite	7,2 m	3,8 m	386,0 m 728,5 m
begrenzter Laugeneinschluß	-	-	22,5 m ³
Zutritts-/Austrittssegment	7,2 m	3,8 m	100,0 m

Die Orte für einen unbegrenzten Laugenzutritt werden in Anlehnung an die früheren Rechnungen im Projekt SAM [5] modelliert. Dort wurde ein Zutritt im Schachtbereich des Zentralteils angenommen, wobei einige Dämme den Laugenzutritt behinderten. Die Dämme hatten die in Tabelle 2.3 angegebenen Abmessungen. Für die Eigenschaften des Zutritts-/Austrittsortes an anderen Lokationen im Grubengebäude werden die gleichen geometrischen Daten verwendet, um für die Laugenströmung vergleichbare Randbedingungen zu simulieren.

2.2 Eingangsparmeter

Die vorliegenden Rechnungen werden auf der Basis der Modellierung im Projekt SAM [5] durchgeföhrt. Die dort ausführlicher behandelten Werte der Eingangsparmeter werden im folgenden in Tabellenform zusammengefaßt. Bei einigen Eingangsparmetern gibt es geringfügige Unterschiede, da in den vorliegenden Rechnungen die Mobilisierung aus der Abfallmatrix weitgehend an die Annahmen in dem Projekt SPA [2] angepaßt wurde.

2.2.1 Inventare und Daten zum Pollux-Behälter

Als Eingangsinventare dienen die Inventare des abgebrannten LWR-Brennstoffs und der Hülsen und Strukturteile. Die Eingangsinventare wurden mit einer KORIGEN-Abbrandrechnung ermittelt [14]. Die Anreicherung des frischen Brennstoffs beträgt 3,6%, und es wird ein durchschnittlicher Abbrand im Reaktor von 45 GWd/t_{SM} angenommen. Die Inventarangaben in Tabelle 2.4 beziehen sich auf den Zeitpunkt 7 Jahre nach Entladung aus dem Reaktor und auf den Inhalt eines Pollux-Behälters. Für die Modellrechnungen wurde darüberhinaus eine Zwischenlagerzeit von 33 Jahren bis zur Einlagerung im Endlager berücksichtigt. Der Pollux-Behälter hat die in Tabelle 2.5 angegebenen geometrischen Abmessungen und Hohlräume.

2.2.2 Daten zur Mobilisierung und zum Grubengebäude

Zur Berechnung der Radionuklidfreisetzung aus einem Abfallgebände und des Transports der Radionuklide im Grubengebäude werden eine Reihe von Effekten berücksichtigt. Die Berechnung des Nuklidtransports im Grubengebäude erfolgt in den Segmentmodellen. Hierbei werden in jedem Segmentmodell die folgenden Effekte berücksichtigt:

- Temperatur und Temperaturgradient im Versatz, Verschuß oder Damm,
- Konvergenzrate im Versatz und Verschuß,
- Permeabilität im Versatz, Verschuß oder Damm,
- Laugendruck und Laugenstrom,

Tabelle 2.4: Radionuklidinventar eines Pollux-Behälters mit 4,272 t_{SM}, 7 Jahre nach Entladung aus dem Reaktor.

Nuklide	Aktivität [Bq]	Nuklide	Aktivität [Bq]	Nuklide	Aktivität [Bq]
Spalt- und Aktivierungsprodukte		Thorium-Reihe		Uran-Reihe	
C-14	1,964·10 ⁺¹¹	Cm-248	1,243·10 ⁺⁰⁶	Cm-246	1,816·10 ⁺¹¹
Ni-59	2,170·10 ⁺¹²	Pu-244	1,853·10 ⁺⁰⁵	Pu-242	4,926·10 ⁺¹¹
Co-60	1,739·10 ⁺¹⁵	Cm-244	7,074·10 ⁺¹⁴	Am-242m	7,912·10 ⁺¹¹
Ni-63	2,920·10 ⁺¹⁴	Pu-240	1,027·10 ⁺¹⁴	U-238	4,943·10 ⁺¹⁰
Se-79	7,870·10 ⁺¹⁰	U-236	5,101·10 ⁺¹⁰	Pu-238	7,143·10 ⁺¹⁴
Rb-87	4,340·10 ⁺⁰⁶	Th-232	2,323·10 ⁺⁰¹	U-234	1,471·10 ⁺¹¹
Sr-90	1,300·10 ⁺¹⁶	U-232	1,083·10 ⁺¹⁰	Th-230	1,136·10 ⁺⁰⁷
Zr-93	4,155·10 ⁺¹¹			Ra-226	2,422·10 ⁺⁰⁴
Nb-94	3,630·10 ⁺¹¹				
Mo-93	1,803·10 ⁺¹⁰	Neptunium-Reihe		Aktinium-Reihe	
Tc-99	2,683·10 ⁺¹²	Cm-245	7,271·10 ⁺¹⁰	Cm-247	3,989·10 ⁺⁰⁵
Pd-107	2,374·10 ⁺¹⁰	Pu-241	1,758·10 ⁺¹⁶	Am-243	5,673·10 ⁺¹²
Sn-126	1,228·10 ⁺¹¹	Am-241	2,609·10 ⁺¹⁴	Pu-239	5,669·10 ⁺¹³
J-129	6,835·10 ⁺⁰⁹	Np-237	7,156·10 ⁺¹⁰	U-235	2,070·10 ⁺⁰⁹
Cs-135	7,647·10 ⁺¹⁰	U-233	1,326·10 ⁺⁰⁷	Pa-231	5,605·10 ⁺⁰⁶
Cs-137	1,935·10 ⁺¹⁶	Th-229	4,169·10 ⁺⁰⁴		
Sm-147	8,590·10 ⁺⁰⁵				
Sm-151	5,947·10 ⁺¹³				
Eu-154	1,723·10 ⁺¹⁵				

Tabelle 2.5: Geometrie eines Pollux-Behälters.

Parameter	Volumen
Geometrisches Volumen	10,2 m ³
Porenvolumen im Abfall	0,067 m ³
Hohlraum im Behälter	0,700 m ³
gesamtes Hohlraumvolumen	0,767 m ³

- Laugenaustausch im Versatz, Verschluß oder Damm durch Temperaturgradienten,
- Ausfällung,
- Nuklidtransport mit der Lauge, durch Dispersion und durch Diffusion,
- Radionuklid-Bilanzierung und radioaktiver Zerfall.

Die Mobilisierung der Radionuklide aus der Abfallmatrix berücksichtigt neben dem Behälterausfall die unterschiedlichen Mobilisierungsraten aus den drei Bereichen (Gasraum, Korngrenze, Metallteile) eines Brennelementes. Die elementspezifischen Inventaranteile in diesen drei Bereichen sind in Tabelle 2.6 angegeben. Die Mobilisierung wird als Überlagerung aus Behälterausfall und Freisetzung aus der Abfallmatrix beschrieben.

Tabelle 2.6: Elementspezifische Inventaranteile eines Brennelementes.

Element	Gasraum a_G	Korngrenze a_P	Metallteile a_M
C	0,02	0,258	0,722
Co	0,08	0,0	0,92
Ni, Mo, Nb	0,005	0,0	0,995
Se, Sr, Sm, Eu	0,01	0,99	0,0
Rb, J, Cs	0,05	0,95	0,0
Tc	0,02	0,979	0,001
Zr	0,05	0,856	0,094
Pd, Sn	0,02	0,98	0,0
Cm, Am, Pu, Np, Pa, Th, U, Ra	0,005	0,995	0,0

Es wird angenommen, daß die mobilisierten Nuklide zunächst vollständig in die Lauge übergehen. Eine möglicherweise anschließende Ausfällung wird jedoch in den Einlagerungsorten und auf dem gesamten Transportpfad im Grubengebäude berücksichtigt. Eine Sorption an Korrosionsprodukten und am Versatzmaterial wird nicht angenommen. Im gesamten Grubengebäude wird von einem neutralen bis leicht sauren chemischen Milieu ausgegangen. Die elementspezifischen Löslichkeitsgrenzen für dieses Milieu sind in Tabelle 2.7 angegeben.

Tabelle 2.7: Elementspezifische Löslichkeitsgrenzen im Grubengebäude.

Element	Einlagerungsorte [mol/l]			Verteilung
	u.G.	b.e.	o.G.	
C, Rb, J, Cs	1,0	1,0	1,0	nicht variiert
Co, Ni, Nb, Mo, Pd, Sn, Sm, Eu	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-1}$	abhängig
Se	$1,0 \cdot 10^{-8}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	1,0	abhängig
Sr	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	1,0	log. gleich
Zr	$1,0 \cdot 10^{-8}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	abhängig
Tc	$1,0 \cdot 10^{-8}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	1,0	abhängig
Cm	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-1}$	abhängig
Am	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-1}$	abhängig
Pu, Pa, Th	$1,0 \cdot 10^{-8}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	abhängig
Np	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	abhängig
U	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$	abhängig
Ra	$1,0 \cdot 10^{-8}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$	abhängig

Die Tabelle 2.8 faßt weitere Eingangsparameter zusammen, die in den Modellrechnungen für das Grubengebäude verwendet werden. Die Werte für deterministische Rechnungen sind in der Spalte b.e. (best estimate) angegeben. Eingangsparameter, die bei einer probabilistischen Rechnung als unabhängige Variable berücksichtigt werden, sind mit ihrer unteren und oberen Grenze und der Angabe der verwendeten Verteilungsfunktion aufgelistet. Die angegebenen unteren (u.G.) und oberen (o.G.) Grenzen der Verteilungsfunktionen beziehen sich auf die 0,001 und 0,999-Quantile. Die Verteilungen werden an diesen Grenzen abgeschnitten, d.h. es werden keine Werte außerhalb dieser Bereiche gezogen. Die logarithmische Histogrammverteilung für das Volumen der Laugeneinschlüsse in m^3 besteht aus drei Intervallen: [1,10], [10,100] und [100,1000]. Die Wahrscheinlichkeiten in den Intervallen sind 1/2, 1/3 und 1/6.

Tabelle 2.8: Eingangsdaten zum Grubengebäude.

Parameter [Einheit]	u.G.	b.e.	o.G.	Verteilung
Behälterlebensdauer τ_{Bm} [a]	250	500	1 000	log. normal
Mobilisierungsrate Gasraum r_G [1/a]	-	1	-	-
Mobilisierungsrate Korngrenze r_P [1/a]	10^{-7}	10^{-6}	10^{-4}	log. norm.
Mobilisierungsrate Metallteile r_M [1/a]	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	log. gleich
Teufe des Grubengebäudes [m]	-	870	-	-
Referenztiefe z_r [m]	-	870	-	-
Erdbeschleunigung g [m/s ²]	-	9,81	-	-
mittlere Dichte des Salzes ρ_S [kg/m ³]	-	2 300	-	-
Gebirgstemperatur in der Referenztiefe $T_R(z_r)$ [K]	-	310	-	-
geothermischer Gradient ∇T [K/m]	-	$3,0 \cdot 10^{-2}$	-	-
Gebirgsdruck in der Referenztiefe $p_P(z_r)$ [MPa]	-	18	-	-
Konvergenzrate in der Referenztiefe K_{ref} [1/a]	0,001	0,01	0,1	log. normal
Referenzporosität ϕ_r	-	0,3	-	-
Aktivierungsenergie Salz / Gaskonstante Q_1/R [K]	5 800	6 500	7 200	gleich
Aktivierungsenergie Salz / Gaskonstante Q_2/R [K]	11 600	13 000	14 400	abhängige Variable
Anpassungsparameter a im temperaturabhängigen Term der Konvergenzrate		$2,9 \cdot 10^{-2}$		abhängige Variable
Druckexponent m	-	4	-	-
Reduktionsfaktor für die Konvergenz im Einlagerungsort f_{red}	0,05	0,1	0,2	log. gleich
Endporosität des Versatzes ϕ_e	-	$1,0 \cdot 10^{-3}$	-	-
Porosität eines Damms ϕ_D	-	0,05	-	-
Anfangsporosität eines Verschlusses ϕ	-	0,1	-	-
Anfangsporosität des Versatzes ϕ	-	0,35	-	-
dynamische Viskosität der Lauge [Pa s]	-	$1,5 \cdot 10^{-3}$	-	-

Tabelle 2.8: Eingangsdaten zum Grubengebäude. (Fortsetzung)

Parameter [Einheit]	u.G.	b.e.	o.G.	Verteilung
Parameter der Permeabilitäts-/Porositätsbeziehung c [m^2]	-	$2,0 \cdot 10^{-9}$	-	-
Exponent der Permeabilitäts-/Porositätsbeziehung q	3,25	4,5	6,23	log. normal
Permeabilität eines Damms k_D [m^2]	$1,0 \cdot 10^{-16}$	$7,0 \cdot 10^{-16}$	$5,0 \cdot 10^{-15}$	log. normal
Permeabilität eines Ein-/Austrittsortes k [m^2]	$1,0 \cdot 10^{-16}$	$7,0 \cdot 10^{-16}$	$5,0 \cdot 10^{-15}$	log. normal
Permeabilitätserhöhung in der Zuflußphase f_p	-	1	-	-
Dichte der Lauge ρ_L [kg/m^3]	-	1 200	-	-
hydrostatischer Druck p_H [MPa]	-	10	-	-
Diffusionskoeffizient D [m^2/s]	$5,03 \cdot 10^{-11}$	$1,5 \cdot 10^{-9}$	$4,47 \cdot 10^{-8}$	log. normal
Aktivierungsenergie der Diffusion / Gaskonstant Q/R [K]	-	2 250	-	-
Dispersionslänge α_L [m]	0,01	0,1	1,0	log. gleich
Zeitpunkt eines unbegrenzten Laugen-zutritts [a]	2	85	1 000	log. normal
Volumen eines Laugeneinschlusses [m^3]	1,0	22,5	1 000,0	log. hist.
Strömungswiderstand eines Laugeneinschlusses [MPa/(m^3/a)]	-	$1,0 \cdot 10^{-5}$	-	-
effektive Porosität eines Laugeneinschlusses	-	0,1	-	-

In den probabilistischen Rechnungen werden 34 Parameter des Grubengebäudes als Zufallsvariablen behandelt. Hiervon werden 13 Variablen unabhängig variiert, während die übrigen durch eine funktionale Abhängigkeit von einer der 13 unabhängigen Variablen definiert sind. So werden bei den elementspezifischen Löslichkeitsgrenzen die zu den anderen Elementen gehörenden Werte durch lineare Transformation der gezogenen Werte der unabhängigen Variablen (hier: des Elements Sr) bestimmt.

Eine weitere abhängige Variable ist der Anpassungsfaktor a in der Temperaturabhängigkeit der Konvergenz (siehe die Beschreibung dieses Effektes in [6]). Er wird so berechnet, daß bei einer Übergangstemperatur von 372 K die beiden Terme für die unter-

schiedlichen Kriechverhalten des Steinsalzes gleich werden. Außer dieser funktionalen Abhängigkeit werden keine Korrelationen zwischen den Zufallsvariablen betrachtet.

Die Werte für die 13 unabhängigen Eingangsparameter werden aus der jeweiligen Grundgesamtheit zufällig gezogen. Alle anderen, nicht als Zufallsvariablen behandelten Eingangsparameter haben den gleichen konstanten Wert wie in den deterministischen Rechnungen.

Durch die Einlagerung der wärmeentwickelnden Pollux-Behälter steigt die Temperatur im Endlager über die Gebirgstemperatur. Das Grubengebäude wurde so modelliert, daß eine vorgegebene Maximaltemperatur von 200 °C im Gebirge eingehalten wird. Die Temperatur beeinflusst insbesondere die Konvergenz des Salzgesteins und die Diffusion von Nukliden.

Die Temperaturverteilung im Endlager ist eine Funktion des Ortes und der Zeit. Die durch die Abfälle verursachten Temperaturerhöhungen an ausgewählten Stellen des Grubengebäudes wurden den Temperaturberechnungen zum Konzept der gemeinsamen Bohrloch- und Streckenlagerung mit dem Entsorgungskonzept IE:DE = 2:5 aus dem Projekt SAM entnommen [12]. Aus diesem Konzept werden nur die Temperaturstützstellen im Bereich der Einlagerungsstrecken der Pollux-Behälter verwendet.

Die Abbildung 2.4 zeigt die verwendeten Temperaturstützstellen beispielhaft für den Einlagerungsabschnitt 5. Die Nummern an den Stützstellen identifizieren den Datensatz in der Datei mit den Temperaturdaten. Die Abbildung 2.5 zeigt den Temperaturverlauf im Zentrum der Abschnitte 1, 3 und 5, das jeweils den wärmsten Punkt eines Abschnitts darstellt. Für den 5. Abschnitt entspricht dies der Temperaturstützstelle 56 im Einlagerungs-ort des 2. Einlagerungsfeldes (siehe Abbildung 2.4). Zusätzlich sind die Temperaturverläufe in den zugehörigen Querschnitten eingezeichnet.

Den Temperaturabfall zum Rand eines Einlagerungsfeldes Richtung Flankenstrecke verdeutlichen die Abbildungen 2.6 (äußerer Bereich des Feldes) und 2.7 (Flankenstrecken). Für den 5. Abschnitt entspricht dies der Temperaturstützstelle 54 für den Einlagerungs-ort des 2. Einlagerungsfeld bzw. 42 für die Flankenstrecke (siehe Abbildung 2.4). Die zeitliche Verzögerung des Temperaturanstiegs dokumentiert die gestaffelten Einlagerungs-

zeitpunkte (s. Tabelle 2.1). Eine gegenseitige Beeinflussung der Einlagerungsabschnitte ist nicht zu beobachten.

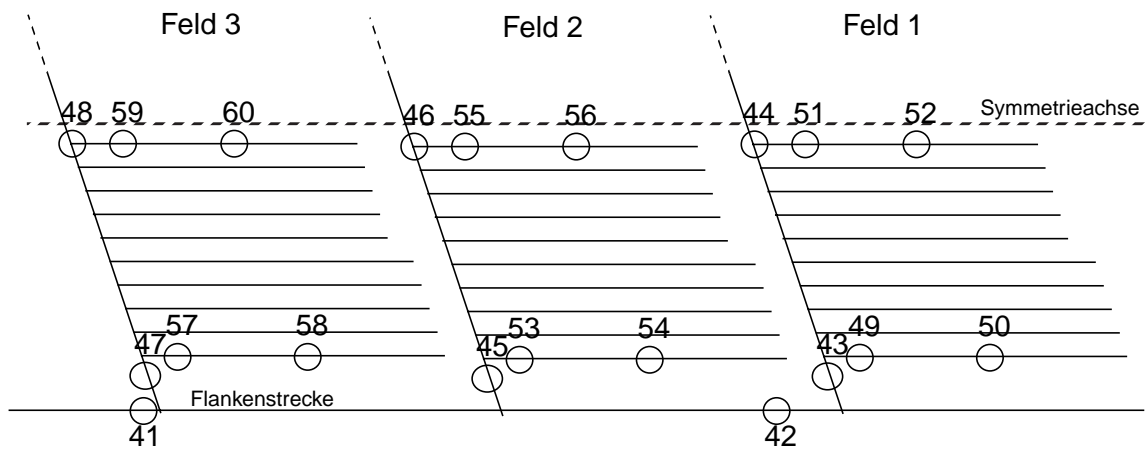


Abb. 2.4: Temperaturstützstellen im Einlagerungsabschnitt 5.

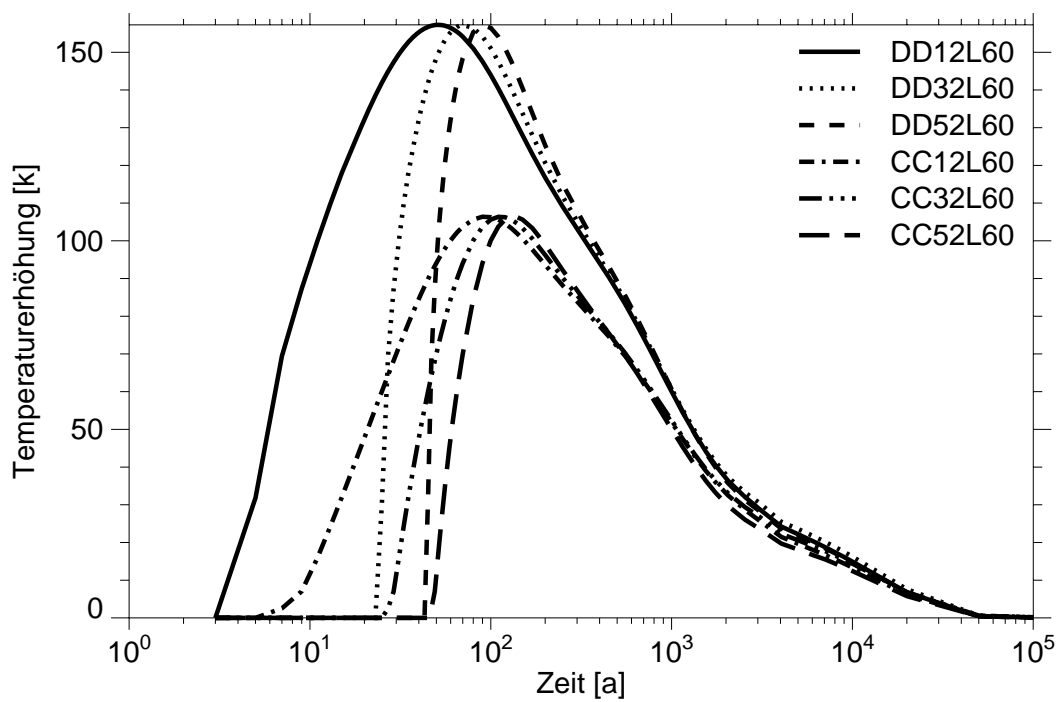


Abb. 2.5: Zeitlicher Verlauf der Temperaturerhöhung im Zentrum und im benachbarten Querschlag des Feldes 2 der Abschnitte 1, 3 und 5.

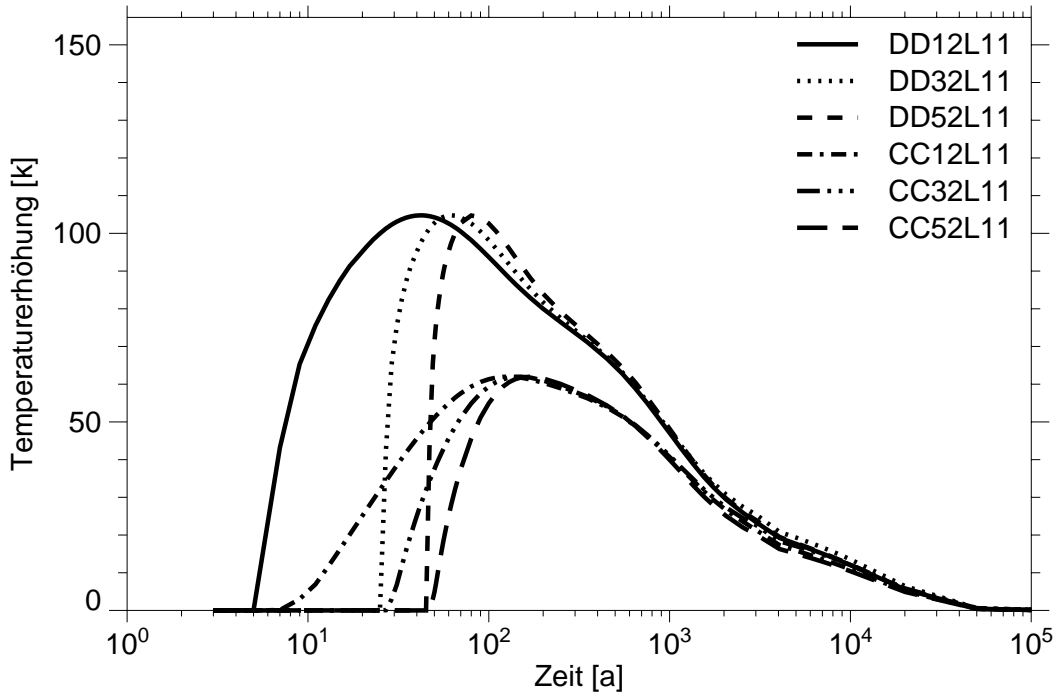


Abb. 2.6: Zeitlicher Verlauf der Temperaturerhöhung am Rand und im benachbarten Querschlag des Feldes 2 der Abschnitte 1, 3 und 5.

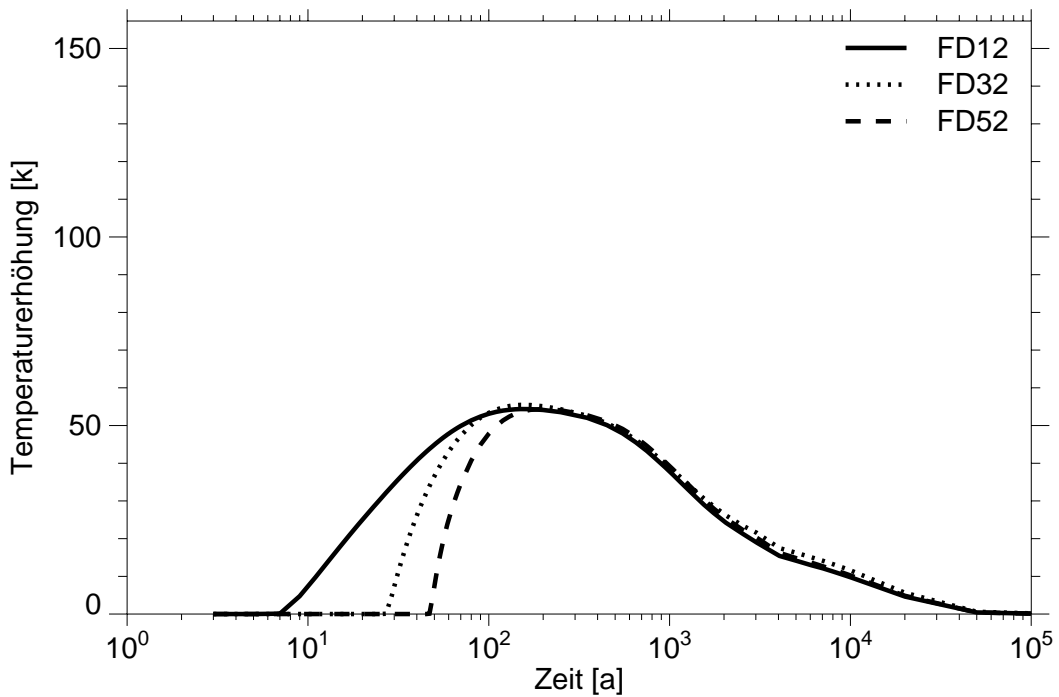


Abb. 2.7: Zeitlicher Verlauf der Temperaturerhöhung in der Flankenstrecke am Feld 2 der Abschnitte 1, 3 und 5.

2.2.3 Daten zum Deckgebirge und zur Biosphäre

Als Grundlage für die Modellierung des Deckgebirges und der Biosphäre dient das Gebiet Gorleben, das in dem Abschlußbericht des Projektes PSE beschrieben ist [8]. Im folgenden wird auf die ausführliche Beschreibung dieser Modellierung in Kapitel 3 des PAGIS-Berichtes [10] Bezug genommen, da die vorliegenden Rechnungen mit den gleichen Parametern durchgeführt wurden, nur bei den Parametern für die probabilistische Rechnung wurden geringfügige Änderungen vorgenommen.

Die Parameter für den Radionuklidtransport im Deckgebirge wurden aus einer dreidimensionalen Transportrechnung [10] ermittelt und für den eindimensionalen Transportcode CHETLIN angepaßt. Die Haupteingangsdaten sind dabei die elementspezifischen K_d -Werte zur Beschreibung des Sorptionsverhaltens im Deckgebirge und die hydrogeologischen Daten für den Grundwasserfluß, siehe die Tabellen 2.9 und 2.10. Außerdem werden nuklidspezifische Daten benötigt, wie Halbwertszeiten und Freisetzungsraten aus dem Grubengebäude. Die Freisetzungsraten stehen in einer Übergabedatei aus der Freisetzungsrechnung zur Verfügung.

Die Zufallsvariablen werden ähnlich wie für das Grubengebäude ausgewählt und behandelt, wobei für das Deckgebirge 22 Zufallsvariablen ausgewählt wurden. Hiervon werden 3 Variablen unabhängig variiert, während die übrigen Variablen durch eine funktionale Abhängigkeit von einer der drei unabhängigen Variablen definiert sind.

Über die Transportzeit wird der Volumenstrom im Ausbreitungsweg variiert. Die Variation des Querschnitts des Ausbreitungsweges bedeutet bei konstantem Fluidstrom eine Variation der Verdünnung im Grundwasserstrom.

Die jährlichen Strahlenexpositionen in der Biosphäre werden aus den Ergebnissen der Ausbreitungsrechnung im Deckgebirge mit Hilfe von Dosiskonversionsfaktoren berechnet. Aus einer beliebigen Grundwasserkontamination in der Einheit Bq/m^3 können daraus die jährlichen Strahlenexpositionen der Einheit Sv/a berechnet werden. In Tabelle 2.11 sind die Dosiskonversionsfaktoren für die in dieser Studie verwendeten Radionuklide angegeben. Die Eingangsdaten für die Biosphärenrechnung werden nicht statistisch variiert.

Tabelle 2.9: Daten zum Deckgebirgspfad.

Parameter [Einheit]	u.G.	b.e.	o.G.	Verteilung
Länge des Ausbreitungsweges [m]	-	9 206	-	-
Querschnitt des Ausbreitungsweges [m ²]	15 129	36 900	90 036	abhängig
Transportzeit [a]	566	1 415,4	3 540	log. gleich
longitudinale Dispersionslänge [m]	6,5	65	650	log. gleich
Diffusionskoeffizient [m ² /a]	-	10 ⁻²⁰	-	
Porosität des Deckgebirges	-	0,2	-	-
Gesteinsdichte [kg/m ³]	-	2 500	-	-
Dichte des Grundwassers [kg/m ³]	-	1 000	-	-

Tabelle 2.10: K_d -Werte der Sorption im Deckgebirge [m³/kg].

Element	u.G.	b.e.	o.G.	Verteilung
C	5,0·10 ⁻⁴	5,0·10 ⁻³	5,0·10 ⁻²	log. gleich
Ni	1,0·10 ⁻³	1,0·10 ⁻²	1,0·10 ⁻¹	abhängig
Se	1,0·10 ⁻⁴	3,0·10 ⁻⁴	9,0·10 ⁻⁴	abhängig
Rb	1,0·10 ⁻⁴	1,0·10 ⁻³	1,0·10 ⁻²	abhängig
Sr	1,0·10 ⁻⁴	5,0·10 ⁻⁴	2,0·10 ⁻³	abhängig
Zr	1,0·10 ⁻²	1,0·10 ⁻¹	1,0	abhängig
Nb	1,0·10 ⁻²	1,0·10 ⁻¹	1,0	abhängig
Mo	1,0·10 ⁻⁴	1,0·10 ⁻³	1,0·10 ⁻²	abhängig
Tc	1,6·10 ⁻⁴	7,0·10 ⁻³	3,0·10 ⁻¹	abhängig
Pd	1,0·10 ⁻³	1,0·10 ⁻²	1,5·10 ⁻¹	abhängig
Sn	1,3·10 ⁻¹	2,0·10 ⁻¹	3,0·10 ⁻¹	abhängig
J	1,0·10 ⁻⁴	5,0·10 ⁻⁴	2,5·10 ⁻³	abhängig
Cs	1,0·10 ⁻⁴	1,0·10 ⁻³	1,0·10 ⁻²	abhängig
Sm, Eu	1,0	1,0	1,0	nicht variiert
Cm, Am, Pu, Pa	1,0	1,0	1,0	nicht variiert
Np	1,0·10 ⁻³	3,0·10 ⁻²	1,0	abhängig
Th	1,0·10 ⁻¹	3,0·10 ⁻¹	1,0	abhängig

Tabelle 2.10: K_d -Werte der Sorption im Deckgebirge [m^3/kg]. (Fortsetzung)

Element	u.G.	b.e.	o.G.	Verteilung
U	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-2}$	abhängig
Ra	$4,0 \cdot 10^{-4}$	$9,0 \cdot 10^{-4}$	$2,0 \cdot 10^{-3}$	abhängig
Pb	$3,0 \cdot 10^{-3}$	$4,0 \cdot 10^{-2}$	$5,0 \cdot 10^{-1}$	abhängig
Ac	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$4,0 \cdot 10^{-2}$	$1,6 \cdot 10^{-1}$	abhängig

Tabelle 2.11: Dosiskonversionsfaktoren für Erwachsene in (Sv/a)/(Bq/m³).

Nuklide	h_D	Nuklide	h_D	Nuklide	h_D
Spalt- und Aktivierungsprodukte		Thorium-Reihe		Uran-Reihe	
C- 14	$1,0 \cdot 10^{-07}$	Cm-244	$1,4 \cdot 10^{-06}$	Am-242m	$2,6 \cdot 10^{-06}$
Ni- 59	$1,7 \cdot 10^{-09}$	Pu-240	$2,2 \cdot 10^{-06}$	U-238	$3,1 \cdot 10^{-07}$
Ni- 63	$1,1 \cdot 10^{-09}$	U-236	$2,2 \cdot 10^{-07}$	Th-234	$9,3 \cdot 10^{-09}$
Se- 79	$2,3 \cdot 10^{-07}$	Th-232	$1,1 \cdot 10^{-05}$	Pu-238	$2,0 \cdot 10^{-06}$
Rb- 87	$1,3 \cdot 10^{-07}$	Ra-228	$1,2 \cdot 10^{-06}$	U-234	$2,4 \cdot 10^{-07}$
Sr- 90	$2,0 \cdot 10^{-07}$	U-232	$5,2 \cdot 10^{-06}$	Th-230	$2,4 \cdot 10^{-06}$
Zr- 93	$6,0 \cdot 10^{-09}$	Th-228	$1,5 \cdot 10^{-06}$	Ra-226	$1,5 \cdot 10^{-05}$
Nb- 94	$9,2 \cdot 10^{-08}$			Pb-210	$6,3 \cdot 10^{-06}$
Mo- 93	$2,8 \cdot 10^{-08}$				
Tc- 99	$4,9 \cdot 10^{-09}$	Neptunium-Reihe		Americium-Reihe	
Pd-107	$3,0 \cdot 10^{-10}$	Cm-245	$3,0 \cdot 10^{-06}$	Am-243	$3,5 \cdot 10^{-06}$
Sn-126	$8,7 \cdot 10^{-06}$	Pu-241	$4,3 \cdot 10^{-08}$	Pu-239	$2,2 \cdot 10^{-06}$
J-129	$3,7 \cdot 10^{-07}$	Am-241	$2,7 \cdot 10^{-06}$	U-235	$9,4 \cdot 10^{-07}$
Cs-135	$8,6 \cdot 10^{-08}$	Np-237	$6,2 \cdot 10^{-06}$	Pa-231	$1,3 \cdot 10^{-05}$
Cs-137	$1,3 \cdot 10^{-06}$	Pa-233	$1,0 \cdot 10^{-08}$	Ac-227	$2,7 \cdot 10^{-05}$
Sm-147	$1,6 \cdot 10^{-07}$	U-233	$2,8 \cdot 10^{-07}$	Th-227	$3,2 \cdot 10^{-08}$
		Th-229	$5,4 \cdot 10^{-06}$		
		Ra-225	$2,0 \cdot 10^{-07}$		
		Ac-225	$1,3 \cdot 10^{-07}$		

3 Vergleich Baumstruktur / Netzwerkstruktur

In diesem Kapitel werden die Auswirkungen der Modellierung einer baumförmigen und einer netzwerkartigen Grubengebäudestruktur verglichen. Während mit dem Nahbereichsmodul REPOS nur baumförmige Segmentstrukturen verarbeitet werden können, erlaubt das Modul LOPOS neben baumförmigen auch netzwerkartige Strukturen.

Zunächst werden die Ergebnisse der mit REPOS und LOPOS durchgeführten Anwendungsrechnungen für eine baumförmige Struktur verglichen. Anschließend werden diese Ergebnisse mit derjenigen bei einer Modellierung des Grubengebäudes mit einer Netzwerkstruktur verglichen. Die Auswirkungen der netzwerkartigen Struktur auf die Laugenbewegung im Grubengebäude werden im Detail analysiert und den entsprechenden Rechnungen für die baumförmige Struktur gegenübergestellt.

3.1 Vergleich Baumstruktur mit REPOS und LOPOS

Bei der Umsetzung des in Abbildung 2.3 von Kapitel 2 gezeigten hypothetischen Grubengebäudes in eine Baumstruktur werden die folgenden Annahmen zugrunde gelegt (siehe Abbildung 3.1):

- Durch die Mitte des Grubengebäudes verläuft eine Symmetrieachse. Die Segmente der linken wie der rechten Seite haben die gleichen Eigenschaften.
- Durch einen Schnitt entlang der Symmetrieachse erhält man eine Baumstruktur. Diese beginnt bei dem Zentralteil als Wurzelsegment und endet bei den Einlagerungsorten als Zweigspitzen.

Der geschwungene Verlauf des hypothetischen Grubengebäudes, der sich durch die unterschiedlichen Längen der linken und rechten Flankenstrecken zwischen den Einlagerungsabschnitten ergibt, könnte nun durch einen linken und einen rechten Hauptast abgebildet werden. In Anlehnung an die in [5] vorgenommene Modellierung werden hier aber die linke und die rechte Seite übereinandergelegt. Damit ergeben sich bei der Modellierung für alle Segmente doppelte Querschnitte. Für die Länge der Flankenstrecken

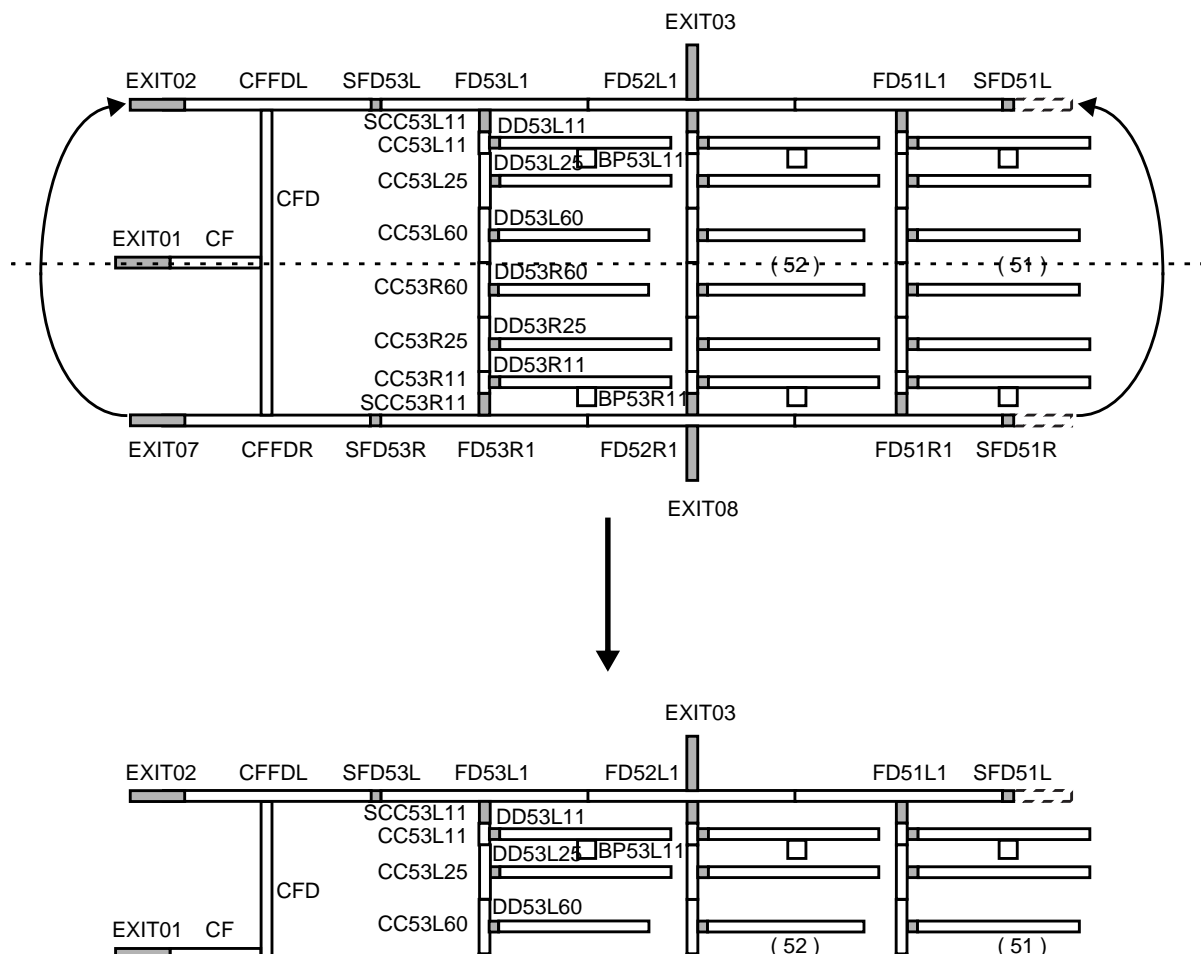


Abb. 3.1: Umsetzung des hypothetischen Grubengebäudes in eine Baumstruktur.

zwischen den Einlagerungsabschnitten wird in der Baumstruktur die mittlere Länge aus linker und rechter Flankenstrecke verwendet. Die Segmentanzahl reduziert sich auf diejenige einer Grubengebäudehälfte.

Bei der Grubengebäudestruktur für REPOS wird der Zutrittsort im Zentralteil in Analogie zu [5] modelliert. Der Zentralteil wird im wesentlichen als eine Strecke mit einem Damm und einem Zusatzvolumen modelliert. In LOPOS sind der Zutrittsort und der Zentralteil unabhängige Segmente. Ebenso werden in LOPOS im Gegensatz zu REPOS versetzte Strecken mit Verschlüssen bzw. Dämmen nicht als ein Segment sondern als separate Segmente behandelt. In LOPOS wird somit eine wesentlich detailliertere Komponentenmodellierung vorgenommen.

Die folgende Gegenüberstellung zeigt die Unterschiede in der Segmentstruktur für die Modellierung des Strömungsweges vom Zutrittsort über den Zentralteil bis zum Damm des ersten Einlagerungsabschnitts:

- REPOS: CF (Damm und Strecke mit Zusatzvolumen) - CFFDL (Flankenstrecke neben dem Zentralteil) - FD53L1 (Damm und Flankenstrecke neben Abschnitt 5)
- LOPOS: EXIT01 (Damm) - CF (Strecke mit Zusatzvolumen) - CFD (Strecke) - CFFDL (Flankenstrecke neben dem Zentralteil) - SFD53L (Damm) - FD53L1 (Flankenstrecke neben Abschnitt 5)

Die Vergleichsrechnungen zwischen REPOS und LOPOS unterstellen einen unbegrenzten Laugenzutritt von außen in den Zentralteil sowie einen begrenzten Laugenzutritt in die Einlagerungsorte. In diesem Fall füllt die Lauge von außen zunächst das große Volumen des Zentralteils auf, bevor sie in die Nähe der Einlagerungsorte gelangt. Im Referenzfall erfolgt der Laugenzutritt nach 85 Jahren. Als Varianten werden zum einen der Laugenzutritt nach 0 Jahren und zum anderen ein um den Faktor 10 erhöhtes Volumen der begrenzten Laugeneinschlüsse (225 m^3) angenommen.

In der Tabelle 3.1 sind für die genannten drei Fälle die in das Grubengebäude zugeflossenen und die aus dem Grubengebäude abgeflossenen Laugenmengen angegeben. Nur im Fall der erhöhten Volumina der Laugeneinschlüsse kommt es zu einer Freisetzung von kontaminierter Lauge aus dem Grubengebäude. Bei einem Laugenzutritt nach 0 und 85 Jahren hat die Flankenstrecke neben dem Abschnitt 5 bereits nach 156 Jahren ihre Endporosität erreicht, bevor der Zufluß von Lauge in den Zentralteil abgeschlossen ist. Erreichen der Endporosität bedeutet, daß durch die Konvergenz ein vorgegebener Wert der Porosität erreicht wird, unterhalb dessen kein Laugentransport in dem Segment mehr möglich ist. Die Ergebnisse werden im folgenden näher diskutiert.

Die Abbildung 3.2 zeigt den Laugenstrom in das Grubengebäude während der Zuflußphase. Die Zuflußphase beginnt bei 0 bzw. 85 Jahren. Die Zuflußraten von REPOS und LOPOS sind gleich, wobei der Einstrom negativ dargestellt ist. Im weiteren Verlauf reduziert sich die Zuflußrate kontinuierlich durch den wachsenden Strömungswiderstand der

Tabelle 3.1: Übersicht der berechneten Konsequenzen in allen Varianten mit Baumstruktur.

Modul	Variante	Laugenmengen [m ³]		maximale Summendosis [Sv/a]
		Zufluß	Abfluß	
REPOS	$T_L = 0$ Jahre	14 014	13 194	-
	$T_L = 85$ Jahre	10 287	9 470	-
	$V_L = 225$ m ³	10 280	9 772	$1,51 \cdot 10^{-6}$
LOPOS	$T_L = 0$ Jahre	14 240	13 352	-
	$T_L = 85$ Jahre	10 507	9 632	-
	$V_L = 225$ m ³	10 307	9 943	$2,02 \cdot 10^{-6}$

Segmente, in denen der Zufluß stattfindet. Jeder Sprung im Kurvenverlauf deutet die vollständige Flutung eines Segmentes an. In der Zuflußphase werden in LOPOS wegen der feineren Diskretisierung vier Segmente geflutet, in REPOS sind dies zwei Segmente.

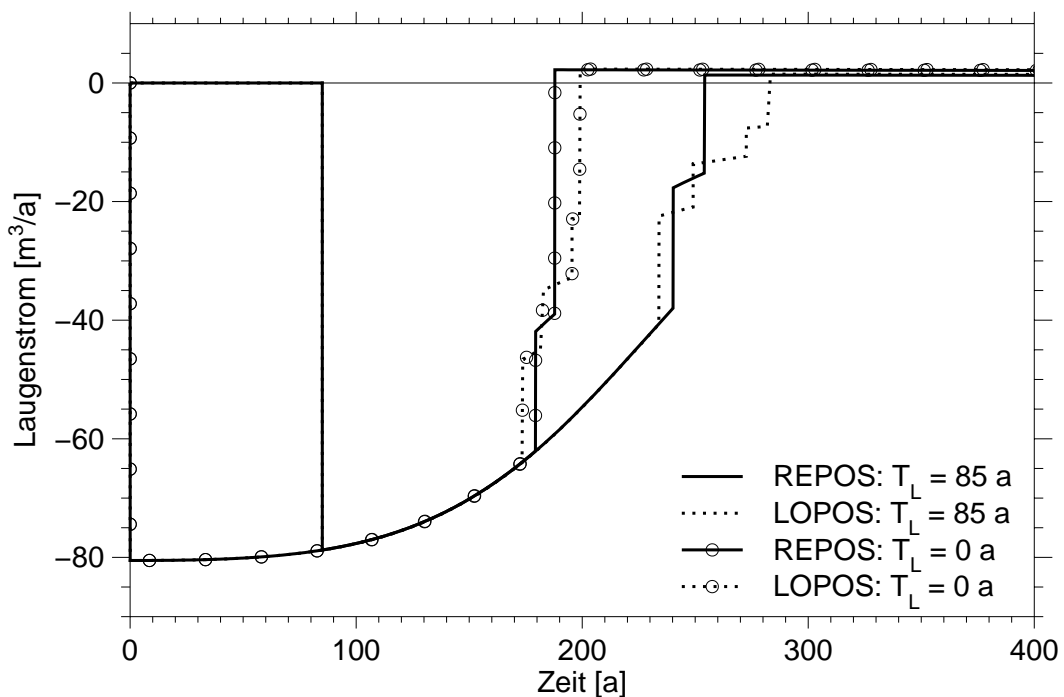


Abb. 3.2: Laugenstrom in das Grubengebäude mit Baumstruktur für REPOS und LOPOS.

Die Tabelle 3.2 zeigt beispielhaft für den Zutrittszeitpunkt von 85 Jahren eine Übersicht der zeitlichen Entwicklung der Segmente. In REPOS ist der Zufluß in das Segment CF wegen des größeren Volumens gegenüber LOPOS etwas später beendet. Beim Zufluß von Lauge in das anschließende Segment CFFDL wird der Streckenanteil des Segments CF vollständig durchströmt, so daß der gesamte Strömungswiderstand über den Damm und die Strecke eingeht. Beim ersten Sprung des Kurvenverlaufes für REPOS fällt daher die Zuflußrate unter diejenige für LOPOS. Die sich anschließende Flankenstrecke CFFDL ist schnell geflutet und die Zuflußphase endet in REPOS nach 188 Jahren ($T_L = 0$ a) bzw. 254 Jahren ($T_L = 85$ a).

Tabelle 3.2: Chronik der Segmente für den Referenzfall $T_L = 85$ Jahre. Zutritt über den Zentralteil.

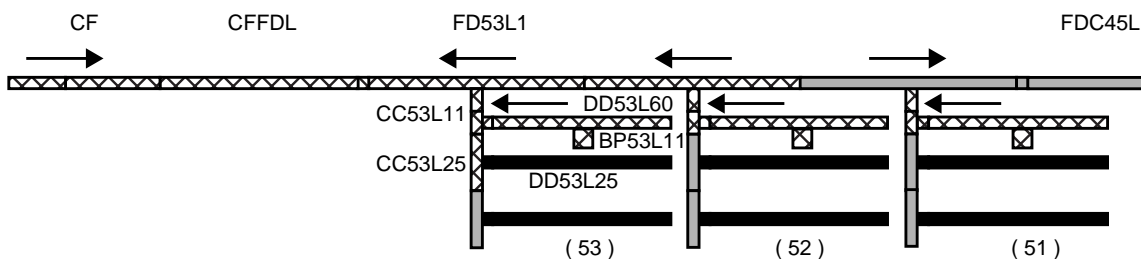
Segment	Zuflußzeiten [a]		Beginn des Auspressens [a]	Erreichen der Endporosität [a]	Endporosität im Bereich
	Beginn	Ende			
REPOS					
CF	85	240	257	-	-
CFFDL	240	254	257	-	-
FD53L1	107	-	-	156	Versatz
LOPOS					
EXIT01	85	283	283	-	-
CF	85	234	234	-	-
CFD	234	249	249	-	-
CFFDL	249	273	273	-	-
SFD53L	273	283	-	-	-
FD53L1	-	-	-	156	Versatz

In LOPOS werden nacheinander die Segmente CF, CFD und CFFDL geflutet. Der Zufluß ist nach 196 Jahren ($T_L = 0$ a) bzw. 273 Jahren ($T_L = 85$ a) in die Flankenstrecke CFFDL beendet. Im Gegensatz zu REPOS wird in LOPOS der folgende Damm (SFD53L) zur Flankenstrecke des Einlagerungsabschnitts 5 explizit modelliert. Der Zufluß von Lauge in den Porenraum des Dammes dauert weitere 3 bzw. 10 Jahre, so daß der Zufluß in das Grubengebäude erst nach 199 Jahre ($T_L = 0$ a) bzw. 283 Jahren ($T_L = 85$ a) abgeschlossen ist.

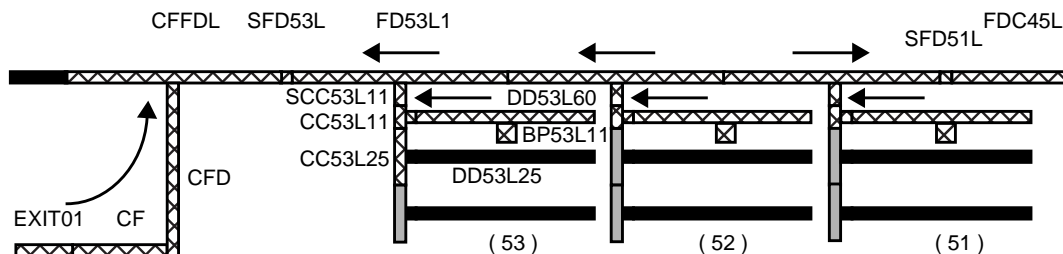
Die zugeflossenen Laugenmengen sind in LOPOS geringfügig höher, wie auch schon die Übersicht in der Tabelle 3.1 zeigt. Die Unterschiede in den von REPOS und LOPOS berechneten Ergebnissen sind einerseits auf die unterschiedliche Diskretisierung der Grubengebäudebereiche und andererseits auf die explizite Modellierung von Teilbereichen, wie Dämmen, zurückzuführen. Die Abweichungen sind gering und führen zu keinen grundsätzlich unterschiedlichen Ergebnissen.

Ein Vergleich der Ergebnisse für REPOS und LOPOS zeigt bei der Variante mit erhöhtem Volumen der Laugeneinschlüsse deutliche Unterschiede. Die Abbildung 3.3 zeigt die Laugenbewegungen in der Grube bis zum Ende der Zuflußphase. Die zeitliche Entwicklung der Segmente kann anhand der Tabelle 3.3 verfolgt werden. In beiden Rechnungen trifft die kontaminierte Lauge aus dem Einlagerungsabschnitt 5 im Segment CFFDL auf die unkontaminierte Lauge aus dem Zentralteil CF.

REPOS: Situation zum Zeitpunkt 255 Jahre (Zuflußende)



LOPOS: Situation zum Zeitpunkt 265 Jahre (Zuflußende)



■ Endporosität ☒ geflutet □ Endporosität nach Laugenzutritt

Abb. 3.3: Laugenbewegungen im Abschnitt 5 bei erhöhtem Volumen der Laugeneinschlüsse.

Tabelle 3.3: Chronik der Segmente für die Variante $V_L = 225 \text{ m}^3$.

Segment	Zuflußzeiten [a]		Beginn des Auspressens [a]	Erreichen der Endporosität [a]	Endporosität im Bereich
	Beginn	Ende			
REPOS					
CF	85	242	257	-	-
CFFDL	98	255	257	-	-
FD53L1	30	98	99	-	-
FD52L1	26	55	55	-	-
FD51L1	27	59	-	69	Versatz
FDC45L	59	-	-	69	FD51L1
CC53L11	14	30	30	-	-
DD53L11	1	14	14	-	-
BP53L11	1	1	1	-	-
CC52L11	12	26	26	-	-
DD52L11	-2	12	12	-	-
BP52L11	-2	-2	-2	-	-
CC51L11	9	27	27	69	FD51L1
DD51L11	-5	9	9	69	FD51L1
BP51L11	-5	-5	-5	69	FD51L1
LOPOS					
EXIT01	85	265	265	-	-
CF	85	233	233	-	-
CFD	233	249	249	-	-
CFFDL	97	265	265	-	-
SFD53L	70	97	-	-	-
FD53L1	37	70	70	-	-
FD52L1	29	43	43	-	-
FD51L1	27	43	43	-	-
FDC45L	77	579	579	-	-
SCC53L11	35	37	37	-	-
CC53L11	32	35	35	-	-
DD53L11	1	32	32	-	-
BP53L11	1	1	1	-	-
SCC52L11	28	29	29	-	-
CC52L11	27	28	28	-	-
DD52L11	-2	27	27	-	-
BP52L11	-2	-2	-2	-	-
SCC51L11	26	27	27	-	-
CC51L11	24	26	26	-	-
DD51L11	-5	24	24	-	-
BP51L11	-5	-5	-5	-	-

Abweichungen in den Strömungsverhältnissen treten im Bereich des Einlagerungsfeldes 51 auf. Sie resultieren aus einer unterschiedlichen Modellierung der Konvergenz in den Einlagerungsorten. In REPOS wird im Einlagerungsort die Konvergenz im Versatz und im Abfallbehälter getrennt behandelt. Der Versatz im Einlagerungsort konvergiert entsprechend den örtlichen Randbedingungen. Durch die mechanische Stützwirkung der Pollux-Behälter ist die Konvergenz des Hohlraums im Behälter reduziert. Die Stützwirkung wiederum ist davon abhängig, ob Lauge in dem Einlagerungsort vorhanden ist oder nicht. In REPOS wird angenommen, daß bei einem trockenen Einlagerungsort der Hohlraum im Behälter erhalten bleibt. Bei einem gefluteten Einlagerungsort ist die Konvergenz des Hohlraums im Behälter um 1/10 gegenüber der Versatzkonvergenz reduziert.

Eine solche Trennung zwischen Versatz und Behälter im Einlagerungsort wird in LOPOS nicht berücksichtigt. Vielmehr wird angenommen, daß die Konvergenz in Versatz und Behälter einheitlich ist. Um der Stützwirkung der Behälter in gefluteten Einlagerungsorten näherungsweise Rechnung zu tragen, wird die Konvergenz in allen Einlagerungsorten, die mit einem Laugeneinschluß versehen sind, um 1/10 verringert. Durch die reduzierte Konvergenz im Einlagerungsort kann die Lauge aus dem Laugeneinschluß zum einen leichter und zum anderen in einen größeren Hohlraum ausgepreßt werden.

Von den Einlagerungstrecken fließt die Lauge über die Querschläge in die Flankenstrecke neben den Einlagerungsfeldern. Aus dem Einlagerungsfeld 51 fließt die kontaminierte Lauge aufgrund der Strömungswiderstände bevorzugt in innere Grubenbereiche (FDC45L). In REPOS kann die aus dem Einlagerungsfeld zufließende Lauge keinen ausreichenden Stützdruck in der Flankenstrecke neben dem Feld 51 aufbauen, so daß dieses Segment nach 69 Jahren seine Endporosität erreicht. Als Folge gelangt auch keine kontaminierte Lauge aus inneren Bereichen der Grube und dem Einlagerungsfeld 51 in Richtung Zentralteil. Im Gegensatz hierzu fließt bei der LOPOS-Rechnung so viel kontaminierte Lauge aus dem Einlagerungsfeld 51 in die Flankenstrecke, daß ein ausreichender Stützdruck entsteht und die Flankenstrecke nicht die Endporosität erreicht. Somit bleibt die Verbindung zu inneren Grubenbereichen über die Flankenstrecke FDC54L offen.

Die Abbildung 3.4 zeigt die Laugenströme aus der Grube (CF), die Laugenströme aus der Flankenstrecke des Einlagerungsabschnitts 5 (FD53L1) und die Laugenströme aus der Flankenstrecke, die den Einlagerungsabschnitt 5 mit dem Einlagerungsabschnitt 4 verbindet (FDC45L). Deutlich zu erkennen sind die zwischen REPOS und LOPOS unterschiedlichen Beiträge der Laugenströme aus der Flankenstrecke FD53L1 in den Zentralteil, die auf den oben beschriebenen Unterschieden in der Modellierung der Konvergenz in den Einlagerungsorten beruhen. In REPOS fließt keine Lauge aus Bereichen unterhalb des Feldes 51 in Richtung Zentralteil. In LOPOS sind die Zuflüsse vorhanden, aber sehr gering. Sie leisten keinen wesentlichen Beitrag zum Laugenstrom aus dem Einlagerungsabschnitt 5.

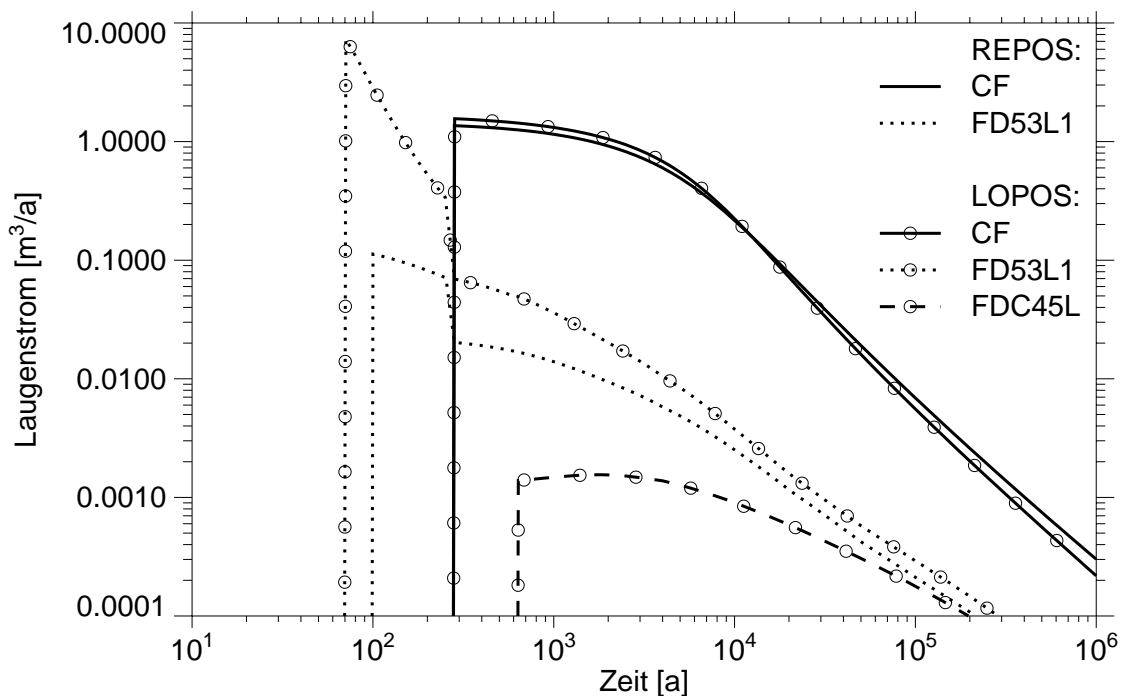


Abb. 3.4: Laugenströme in Richtung Ausgang der Grube bei erhöhtem Volumen der Laugeneinschlüsse.

Die Unterschiede in der maximalen jährlichen Strahlenexposition zwischen den Rechnungen mit REPOS und LOPOS unter der Annahme eines erhöhten Volumens der Laugeneinschlüsse werden nur durch Radionuklide aus dem Einlagerungsabschnitt 5 verursacht. Wie die Abbildung 3.5 zeigt, sind die Unterschiede gering.

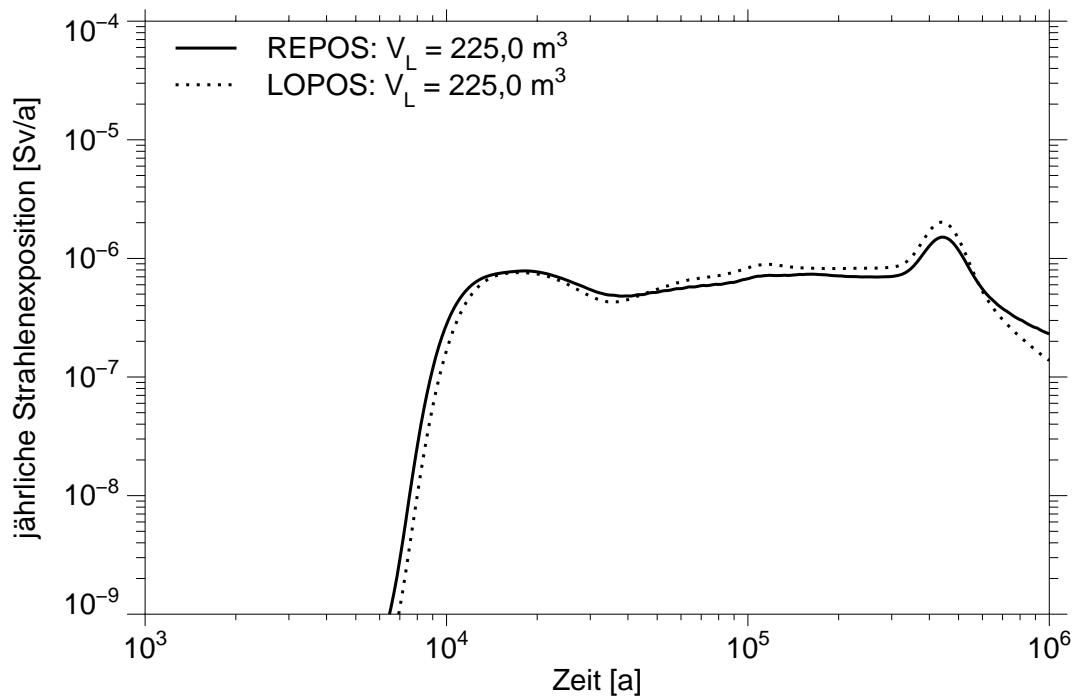


Abb. 3.5: Strahlenexposition bei erhöhtem Volumen der Laugeneinschlüsse.

3.2 Vergleich Baum- und Netzwerkstruktur mit LOPOS

Die unterschiedlichen Konsequenzen einer Modellierung des Grubengebäudes als Baum- oder Netzwerkstruktur werden im folgenden untersucht. Dazu wird das Anwendungsprogramm LOPOS eingesetzt. Zunächst wird das gleiche Laugenzutrittsszenario betrachtet wie im vorhergehenden Kapitel 3.1. Danach wird in Kapitel 3.2.2 ein Laugenzutritt in eine Flankenstrecke unterstellt. Aus rechentechnischen Gründen wird das Grubengebäude auf die Abschnitte 3 bis 5 reduziert. Dies beeinflusst die Ergebnisse im Vergleich zu einem kompletten Grubengebäude nur unwesentlich, wie eine Kontrollrechnung zeigte.

3.2.1 Laugenzutritt im Zentralteil

Unter den gleichen Anfangsbedingungen und mit den gleichen Varianten wie im vorangegangenen Kapitel ergeben sich die in Tabelle 3.4 aufgezeigten Konsequenzen. Die Unterschiede in den zugeflossenen und abgeflossenen Volumina sind sehr gering.

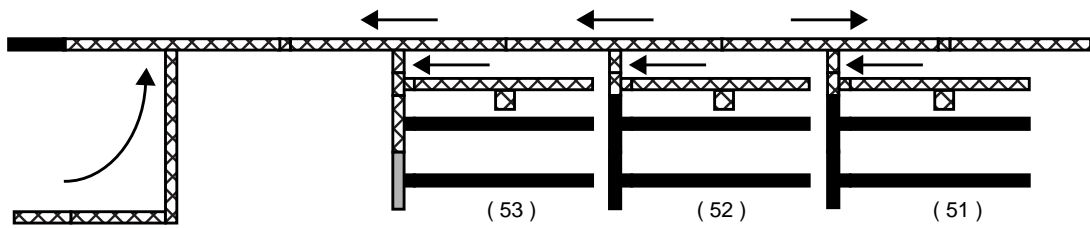
Tabelle 3.4: Übersicht der berechneten Konsequenzen beim Vergleich von Baum- und Netzwerkstruktur.

Modell	Variante	Laugemengen [m ³]		maximale Summendosis [Sv/a]
		Zufluß	Abfluß	
LOPOS Baum	$T_L = 0$ Jahre	14 240	13 352	-
	$T_L = 85$ Jahre	10 507	9 632	-
	$V_L = 225$ m ³	10 307	9 943	$2,0 \cdot 10^{-6}$
LOPOS Netz	$T_L = 0$ Jahre	14 220	13 358	-
	$T_L = 85$ Jahre	10 489	9 636	-
	$V_L = 225$ m ³	10 288	9 953	$2,2 \cdot 10^{-6}$

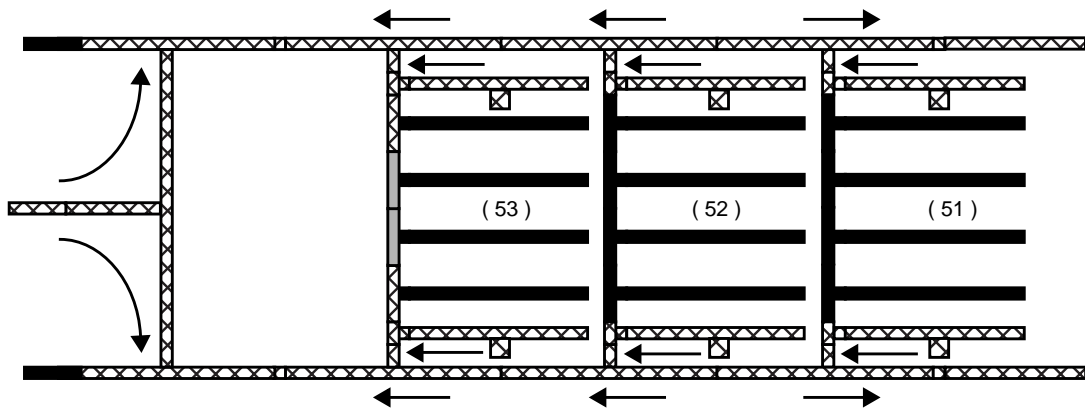
Die Laugenbewegungen sind für die Variante mit größerem Volumen der Laugeneinschlüsse in Abbildung 3.6 dargestellt. Bis zum Zeitpunkt des Laugenzutritts von außen wird die Laugenbewegung in der Grube durch den Zufluß der Lauge aus den Laugeneinschlüssen in die Einlagerungsorte bestimmt. Da die Randbedingungen innerhalb eines Einlagerungsabschnitts in diesem Fall symmetrisch zwischen der linken und rechten Seite sind, ergeben sich für beide Seiten die gleichen Strömungsabläufe. Die mittlere Flankenstrecke des Einlagerungsabschnitts ist bereits vor dem Laugenzutritt von außen vollständig geflutet. Für die gleiche Variante zeigt die Abbildung 3.7 die Laugenströme aus der Grube (CF), aus der Flankenstrecke des Einlagerungsabschnitts 5 (FD53L1/R1) und aus der Flankenstrecke, die die Einlagerungsabschnitte 4 und 5 verbindet (FDC45L/R).

Die Darstellungen zeigen, daß bei beiden Strukturen die Laugenbewegung und die Laugenströme aus dem Einlagerungsabschnitt 5 in Richtung Zentralteil gleich sind. Aufgrund der Symmetrieverhältnisse in dem Einlagerungsabschnitt 5 sind die Ströme der linken

LOPOS/Baum: Situation zum Zeitpunkt 265 Jahre (Zuflußende)



LOPOS/Netz: Situation zum Zeitpunkt 261 Jahre (Zuflußende)



■ Endporosität ☒ geflutet ◼ Endporosität nach Laugenzutritt

Abb. 3.6: Laugenbewegungen bei erhöhtem Volumen der Laugeneinschlüsse.

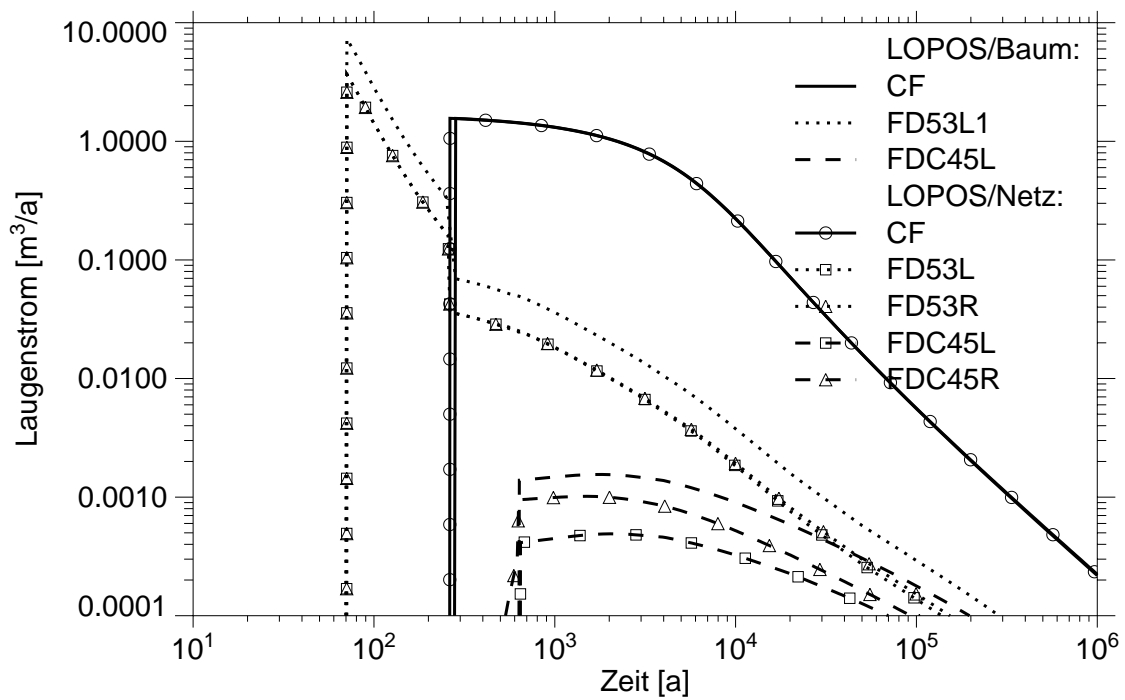


Abb. 3.7: Laugenströme in Richtung Ausgang der Grube bei erhöhtem Volumen der Laugeneinschlüsse.

und rechten Seite des Netzwerkes gleich groß und addieren sich zum gleichen Strom wie bei der Baumstruktur. Ein Unterschied ergibt sich nur beim Zufluß aus der Flankenstrecke zwischen den Abschnitten 4 und 5 (FDC45L/R). Durch die geringere Länge ist die rechte Strecke FDC45R früher als die linke Strecke FDC45L geflutet und die ausgepreßten Laugenströme teilen sich nicht zu gleichen Beiträgen auf. Diese Unsymmetrie hat aber nur einen sehr geringen Einfluß auf das Gesamtergebnis, da diese Laugenströme nur unwesentlich zum Gesamtstrom beitragen.

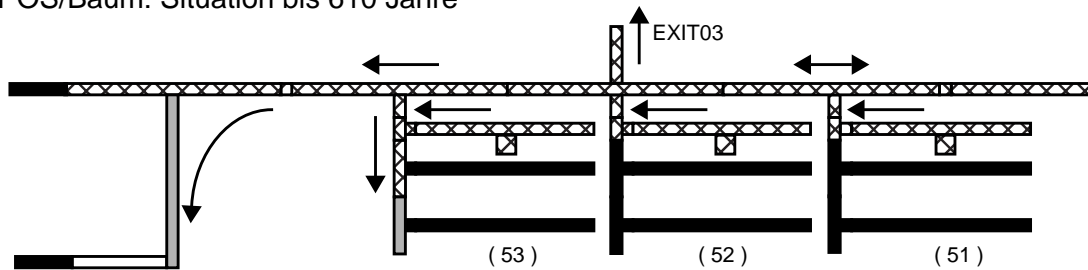
Damit läßt sich festhalten, daß aufgrund der weitgehend symmetrischen Randbedingungen, die auch für die Lage des Zutrittsortes gelten, in den Ergebnissen keine wesentlichen Unterschiede zwischen einer Modellierung nach einer Baumstruktur oder einer Netzwerkstruktur bestehen.

3.2.2 Laugenzutritt in eine Flankenstrecke

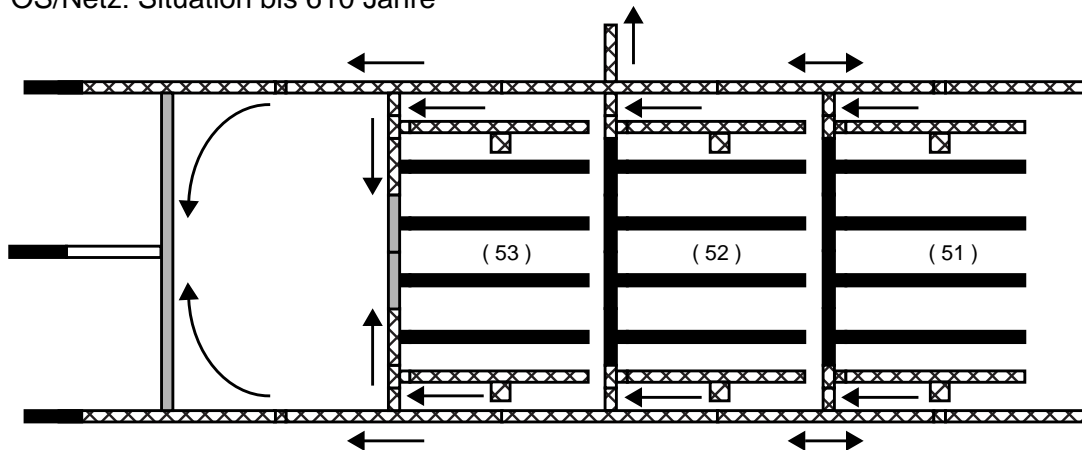
Das Programm LOPOS erlaubt bei einer vorgegebenen Grubengebäudestruktur die Wahl eines beliebigen Zutrittsortes für die Lauge. Zur Modellierung eines unsymmetrischen Zutritts wird angenommen, daß der Zutrittsort in der Mitte der linken Flankenstrecke des Einlagerungsabschnitts 5 liegt. Für die Rechnung wird angenommen, daß die Laugeneinschlüsse ein größeres Volumen haben und daß die Lauge nach 85 Jahren in die Grube eindringt.

Die Laugenbewegungen für dieses Modell sind in Abbildung 3.8 dargestellt. Wie bei dem in Kapitel 3.2.1 beschriebenen symmetrischen Modell, bei dem die Lauge von außen in den Zentralteil eindringt, werden die Einlagerungsorte und Querschläge im Abschnitt 5 zunächst durch die Lauge aus den Einschlüssen symmetrisch aufgefüllt. Erst nach 85 Jahren entsteht die Verbindung zum Deckgebirge und damit die Unsymmetrie. Da ein Kontakt nach außen nur auf der linken Seite des Abschnitts 5 besteht, trägt die rechte Seite im Fall der Netzwerkstruktur nicht zur Freisetzung kontaminierter Lauge bei. Dies liegt daran, daß es keine Laugenverbindung zwischen den beiden Seiten über die Querschläge gibt, wie weiter unten gezeigt wird.

LOPOS/Baum: Situation bis 610 Jahre



LOPOS/Netz: Situation bis 610 Jahre



■ Endporosität ☒ geflutet □ Endporosität nach Laugenzutritt □ leer

Abb. 3.8: Laugebewegungen bei einem externen Zufluß in die linke Flankenstrecke des Abschnitts 5 und erhöhtem Volumen der Laugeneinschlüsse.

Verglichen mit dem Modell mit Laugenzutritt über den Zentralteil hat die Verbindung zwischen Einlagerungsort und Ausgang einen geringeren Strömungswiderstand. Zum einen ist der Fließweg kürzer und zum anderen liegen keine zusätzlichen Dämme zwischen Einlagerungsort und Ausgang. Das Segment EXIT03, das den Zutrittsort beschreibt, hat einen konstanten Strömungswiderstand. Die Strömungswiderstände der versetzten Flankenstrecken sind durch die Kompaktion des Versatzes zeitabhängig und liegen nach 85 Jahren bereits über dem Strömungswiderstand des Zutrittsortes, so daß unmittelbar nach Öffnung dieser Wegsamkeit kontaminierte Lauge aus dem Grubengebäude ausgepreßt wird.

Durch die Verbindung nach außen baut sich im Porenraum der mittleren Flankenstrecke nur ein geringer Stützdruck durch die Lauge auf, der die Konvergenz wenig behindert. Es kommt dadurch bereits nach 610 Jahren zum Erreichen der Endporosität des Versatzes in dieser Flankenstrecke. Ab diesem Zeitpunkt besteht keine Verbindung mehr zwischen Grubengebäude und Deckgebirge.

Da bis zu diesem Zeitpunkt die Hohlräume im Zentralteil noch nicht vollständig mit Lauge geflutet sind, besteht keine direkte Verbindung zwischen den Laugen auf der linken und der rechten Seite des Grubengebäudes. Auch die Querschläge in den Einlagerungsfeldern erreichen frühzeitig die Endporosität, so daß auch dort keine Verbindung zwischen den beiden Grubengebäudeseiten entstehen kann.

Da bei den Rechnungen mit Baumstruktur nicht zwischen rechter und linker Seite unterschieden wird, kann die Unsymmetrie durch die Lage des Zutrittsortes nicht berücksichtigt werden. Durch die Spiegelung werden quasi zwei Zutrittsorte betrachtet. Damit sind die freigesetzten Laugenvolumina und in der Folge die Strahlenexpositionen gegenüber der Rechnung mit einer Netzwerkstruktur auch etwa doppelt so hoch, wie die Tabelle 3.5 zeigt (siehe weiter unten).

Die Abbildung 3.9 zeigt den zeitlichen Verlauf der Summen der jährlichen Strahlenexposition für die Berechnungen nach einer Baum- bzw. Netzwerkstruktur. Für die Netzwerkstruktur sind in Abbildung 3.9 auch die Individualdosen der relevanten Nuklide dargestellt. Die Summenkurve für die Baumstruktur liegt um den Faktor zwei über der Kurve für die Netzwerkstruktur. Da die Freisetzung kontaminierter Lauge aus der Grube nur über einen kurzen Zeitraum von 525 Jahren stattfindet, ergeben sich ausgeprägte Peaks in den Dosisverläufen. Wegen der unterschiedlichen Laufzeiten der Radionuklide im Deckgebirge treten die Peaks zeitlich versetzt auf. Np-237, das eine sehr lange Laufzeit im Deckgebirge besitzt, wirkt für die Tochternuklide, die eine wesentlich kürzere Laufzeit haben, wie ein Dauerquelle. Dadurch ist hier ein breites Plateau für U-233 und die im radioaktiven Gleichgewicht befindlichen Tochternuklide zu beobachten. Das mit einem vorangestellten "+" gekennzeichnete symbolische Radionuklid +U-233 zeigt den summarischen Beitrag von U-233 und seiner Tochternuklide.

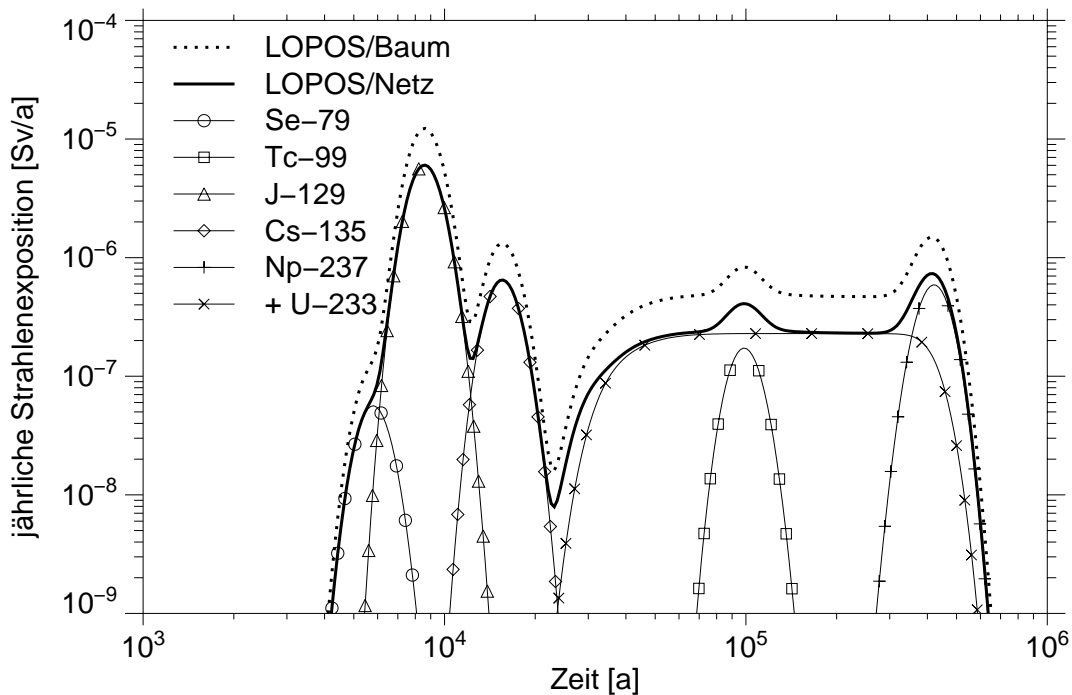


Abb. 3.9: Jährliche Strahlenexposition bei einem externen Zufluß in die linke Flankenstrecke des Abschnitts 5 und erhöhtem Volumen der Laugeneinschlüsse.

3.2.3 Laugenzutritt an weiteren Stellen des Grubengebäudes

Die Vergleichsrechnungen zwischen der Baum- und Netzwerkstruktur sind um die in Kapitel 2.1 beschriebenen Varianten unterschiedlicher Lokationen des Zutrittsortes erweitert worden. Eine Übersicht der in den Rechnungen berücksichtigten Zutrittsorte zeigt Abbildung 3.10. In den deterministischen Analysen ist jeweils ein Zutrittsort ausgewählt worden.

Die wesentlichen Ergebnisse der Vergleichsrechnungen sind in Tabelle 3.5 zusammengefaßt. In den Varianten, bei denen die Zutrittsorte symmetrisch liegen, sind die Ergebnisse gleich, da in den Rechnungen mit einer Netzwerkstruktur entweder nur die linke oder nur die rechte Seite des Grubengebäude betroffen ist und es zu spiegelbildlichen Laugenbewegungen kommt. In den anderen Fällen, bei denen die Zutrittsorte in den Flankenstrecken zwischen den Einlagerungsabschnitten liegen, gibt es diese Symmetrie nicht und die Summendosen sind unterschiedlich (EXIT04, EXIT09).

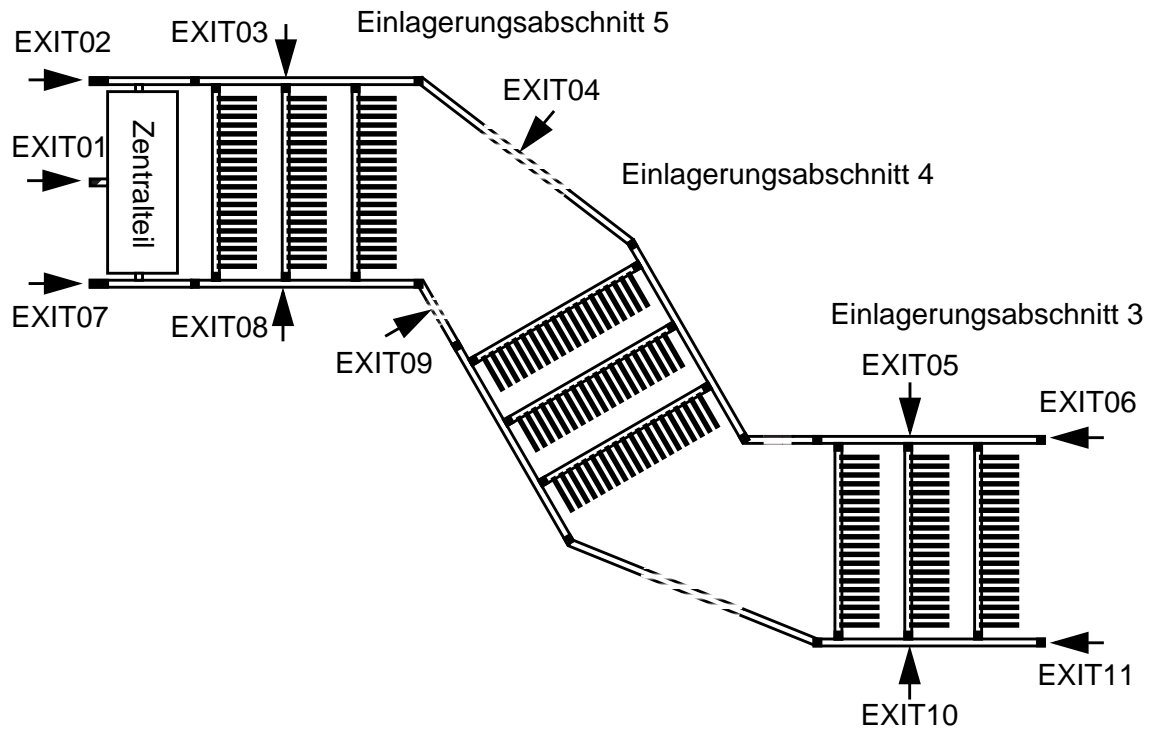


Abb. 3.10: Angenommene Zutrittsstellen für Laugen aus dem Deckgebirge.

Im Fall des Laugenzutritts über den Zentralteil (EXIT01) sind die berechneten Strahlenexpositionen für die Baum- und die Netzwerkstruktur etwa gleich. In allen anderen Fällen sind die berechneten Strahlenexpositionen bei der Baumstruktur doppelt so hoch wie bei der Netzwerkstruktur, da im letzteren Fall nur jeweils eine Hälfte des Grubengebäudes zur Freisetzung beiträgt. Durch die Modellierung der Baumstruktur werden dagegen jeweils beide Hälften gleichzeitig betroffen.

Tabelle 3.5: Übersicht der berechneten Konsequenzen aus einer Modellierung nach einer Baum- bzw. Netzwerkstruktur mit verschiedenen Zutrittsorten

Zutrittsort	Variante	maximale Summendosis [Sv/a] Baum / Netz
EXIT01	$T_L = 0$ Jahre $T_L = 85$ Jahre $V_L = 225 \text{ m}^3$	- / - - / - $2,0 \cdot 10^{-6} / 2,2 \cdot 10^{-6}$
EXIT02 EXIT07	$T_L = 0$ Jahre $T_L = 85$ Jahre $V_L = 225 \text{ m}^3$	- / - - / - $6,3 \cdot 10^{-6} / 3,9 \cdot 10^{-6}$
EXIT03 EXIT08	$T_L = 0$ Jahre $T_L = 85$ Jahre $V_L = 225 \text{ m}^3$	$4,6 \cdot 10^{-6} / 2,2 \cdot 10^{-6}$ - / - $1,2 \cdot 10^{-5} / 6,0 \cdot 10^{-6}$
EXIT04	$T_L = 0$ Jahre $T_L = 85$ Jahre $V_L = 225 \text{ m}^3$	$8,1 \cdot 10^{-8} / 5,1 \cdot 10^{-9}$ - / - $6,4 \cdot 10^{-6} / 3,1 \cdot 10^{-6}$
EXIT05 EXIT10	$T_L = 0$ Jahre $T_L = 85$ Jahre $V_L = 225 \text{ m}^3$	$6,4 \cdot 10^{-6} / 3,2 \cdot 10^{-6}$ - / - $1,3 \cdot 10^{-5} / 6,3 \cdot 10^{-6}$
EXIT06 EXIT11	$T_L = 0$ Jahre $T_L = 85$ Jahre $V_L = 225 \text{ m}^3$	$4,5 \cdot 10^{-6} / 2,2 \cdot 10^{-6}$ - / - $1,1 \cdot 10^{-5} / 5,4 \cdot 10^{-6}$
EXIT09	$T_L = 0$ Jahre $T_L = 85$ Jahre $V_L = 225 \text{ m}^3$	$8,1 \cdot 10^{-8} / 1,5 \cdot 10^{-7}$ - / - $6,4 \cdot 10^{-6} / 3,4 \cdot 10^{-6}$

4 Einzeluntersuchungen zur Netzwerkstruktur

Im vorhergehenden Kapitel 3 wurde gezeigt, daß bei dem vorliegenden Grubengebäude sowohl eine Modellierung mit einer Baumstruktur als auch mit einer Netzwerkstruktur möglich ist und daß beide Modelle zu ähnlichen Konsequenzen bei einer Schadstofffreisetzung führen. Im folgenden werden die Ergebnisse für die Netzwerkstruktur detaillierter diskutiert, um die Anwendungsbereiche des Moduls LOPOS zu veranschaulichen.

In Abbildung 3.10 sind die für die vorliegende Untersuchung angenommenen, potentiellen Zutrittsorte von Laugen aus dem Deckgebirge eingezeichnet. Ein Zutritt über die Stelle EXIT01 ist der hier unterstellte Referenzfall. In diesem Fall füllen die Laugen zunächst das große Volumen des Zentralteils auf, bevor sie in die Nähe der Einlagerungsorte gelangen, und die Bewegungen der Laugen sind nahezu symmetrisch bezüglich der Flankenstrecken. In allen anderen Fällen ist die Verteilung der Laugen unsymmetrisch, wobei die größten Unterschiede im Laugentransport beim Vergleich der Zutrittsstellen EXIT04 und EXIT09 zu erwarten sind, da die Flankenstrecken unterschiedlich lang sind.

In Tabelle 4.1 sind die berechneten Konsequenzen für die unterschiedlichen Zutrittsorte zusammengefaßt. In den Referenzfällen, d. h. bei einem Zeitpunkt des Laugenzutritts von 85 Jahren, werden in keiner Variante Radionuklide freigesetzt, da einige Flankenstrecken infolge der erhöhten Temperaturen die Endporosität erreichen. Erreichen der Endporosität bedeutet, daß durch Kompaktion ein vorgegebener Wert der Porosität erreicht wird, unterhalb dessen kein Laugentransport in dem Segment mehr möglich ist.

Dringt die Lauge in der Nähe des Zentralteils oder direkt in den Zentralteil ein, so kommt es nur dann zu einer Freisetzung von Radionukliden, wenn ein erhöhtes Volumen der begrenzten Laugeneinschlüsse angenommen wird. In diesen Fällen reicht das erhöhte Volumen aus, kontaminierte Lauge bis in die Flankenstrecken auszupressen und so einen Kontakt mit der Lauge aus dem Deckgebirge herzustellen.

In allen anderen Varianten, d.h. Zutrittsorte in der Nähe der Einlagerungsfelder, früher Zutrittszeitpunkt und erhöhtes Volumen der begrenzten Laugeneinschlüsse, kommt es zu einer Freisetzung von Radionukliden. Die daraus resultierenden Strahlenexpositionen

Tabelle 4.1: Übersicht der berechneten Konsequenzen in den Varianten mit Netzwerkstruktur.

*) geringe Freisetzung auch aus der gegenüberliegenden Seite durch Austausch über den Zentralteil.

Zutrittsort	Variante	Zur Freisetzung beitragende Bereiche	maximale Summendosis [Sv/a]
EXIT01	$T_L = 0$ Jahre	-	-
	$T_L = 85$ Jahre	-	-
	V_L groß	alle mit Laugeneinschluß	$2,19 \cdot 10^{-6}$
EXIT02	$T_L = 0$ Jahre	-	-
	$T_L = 85$ Jahre	-	-
	V_L groß	alle mit Laugeneinschluß, linke Seite *)	$3,85 \cdot 10^{-6}$
EXIT03	$T_L = 0$ Jahre	Abschnitt 5, gesamte linke Seite	$2,24 \cdot 10^{-6}$
	$T_L = 85$ Jahre	-	-
	V_L groß	alle mit Laugeneinschluß, linke Seite *)	$6,03 \cdot 10^{-6}$
EXIT04	$T_L = 0$ Jahre	Abschnitt 4, 3. Feld links	$5,10 \cdot 10^{-9}$
	$T_L = 85$ Jahre	-	-
	V_L groß	alle mit Laugeneinschluß, linke Seite *)	$3,12 \cdot 10^{-6}$
EXIT05	$T_L = 0$ Jahre	Abschnitt 3, gesamte linke Seite	$3,17 \cdot 10^{-6}$
	$T_L = 85$ Jahre	-	-
	V_L groß	alle mit Laugeneinschluß, linke Seite *)	$6,30 \cdot 10^{-6}$
EXIT06	$T_L = 0$ Jahre	Abschnitt 3, gesamte linke Seite	$2,20 \cdot 10^{-6}$
	$T_L = 85$ Jahre	-	-
	V_L groß	alle mit Laugeneinschluß, linke Seite *)	$5,43 \cdot 10^{-6}$
EXIT09	$T_L = 0$ Jahre	Abschnitt 4, 3. Feld rechts	$1,49 \cdot 10^{-7}$
	$T_L = 85$ Jahre	-	-
	V_L groß	alle mit Laugeneinschluß, rechte Seite *)	$3,43 \cdot 10^{-6}$

sind jedoch sehr unterschiedlich und sind von der Anzahl der betroffenen Einlagerungsstrecken sowie der insgesamt ausgepressten, kontaminierten Laugenmenge abhängig.

Im folgenden werden die hier kurz beschriebenen Ergebnisse im Detail erläutert.

4.1 Referenzfall: Zutrittszeitpunkt 85 Jahre

Tabelle 4.2 zeigt eine Übersicht der zeitlichen Entwicklung der Segmente bei einem Zutritt von Lauge in den Zentralteil über das Segment EXIT01. Es sind nur Angaben zum linken Teil des Grubengebäudes aufgeführt, da in diesem Fall alle Laugenbewegungen völlig symmetrisch sind, siehe oberen Teil der Abbildung 4.1.

Tabelle 4.2: Chronik der Segmente für den Referenzfall $T_L = 85$ Jahre. Zutritt über EXIT01.

Segment	Zuflußzeiten [a]		Beginn des Auspres-sens	Laugenmengen am Ende des Szenarios [m ³]		Erreichen der Endporosi-tät [a]	Endporosi-tät im Bereich
	Beginn	Ende		Zufluß	Abfluß		
EXIT01	85	279	279	10 488	9 635		
CF	85	237	237	9 927	9 312		
CFD	237	245	245	275	244		
CFFDL	245	269	269	252	218		
SFD53L	269	279		68			
FD53L1						156	Versatz
FD52L1						68	Versatz
FD51L1						68	Versatz
FDC45L				(Gebirgstemperatur)		1 079	Versatz
FD43L1						127	Versatz
FD42L1						44	Versatz
FD41L1						44	Versatz
FD33L1						126	Versatz
FD32L1						43	Versatz
FD31L1						43	Versatz
SCC53L11	105			0,01		147	Versatz
CC53L11	94	105	105	0,4	0		
DD53L11	1	94	94	22,3	0,4		
BP53L11	1	1	1	22,5	22,3	66	Versatz
CC53L25						73	Versatz
DD53L25						18	Versatz
CC52L11	55,7			0,02		56,2	Versatz
DD52L11	-2	56	56	22	0,02		
BP52L11	-2	-2	-2	23	22		

Tabelle 4.2: Chronik der Segmente für den Referenzfall $T_L = 85$ Jahre. Zutritt über EXIT01. (Fortsetzung)

Segment	Zuflußzeiten [a]		Beginn des Auspressens	Laugenmengen am Ende des Szenarios [m ³]		Erreichen der Endporosität [a]	Endporosität im Bereich
	Beginn	Ende		Zufluß	Abfluß		
CC52L25						23	Versatz
DD52L25						11	Versatz
CC51L11	52,5			0,01		52,8	Versatz
DD51L11	-5	52,5	52,5	21,4	0,01		
BP51L11	-5	-5	-5	22,5	21,4		
CC51L25						20	Versatz
DD51L25						8	Versatz
(Ergebnisse für Abschnitt 4 ausgelassen)							
CC33L11	71	81	81	0,4	0		
DD33L11	-19	71	71	22,3	0,4		
BP33L11	-19	-19	-18	22,5	22,3	41	Versatz
CC33L25						47	Versatz
DD33L25						-2	Versatz
CC32L11	35			0,03		36	Versatz
DD32L11	-22	35	35	22,1	0,03		
BP32L11	-22	-22	-22	22,5	22,1		
CC32L25						3	Versatz
DD32L25						-9	Versatz
CC31L11	32			0,02		33	Versatz
DD31L11	-25	32	32	22	0,02		
BP31L11	-25	-25	-25	22,5	22		
CC31L25						-0,2	Versatz
DD31L25						-12	Versatz

Die in den Zentralteil eindringende Lauge gelangt nach 279 Jahren bis in den Verschuß der Flankenstrecke SFDL53. Insgesamt sind in diesen Bereich des Grubengebäudes ca. 21 100 m³ Lauge eingedrungen. Die anschließende Flankenstrecke FD53 ist durch Gebirgskonvergenz bereits nach 156 Jahren verschlossen und verhindert einen Weitertransport der Lauge in Richtung zu den Einlagerungsorten. Die weiteren Flankenstrecken des 5. Abschnitts erreichen ihre Endporosität noch früher, da sie sich in wärmeren Teilen des Grubengebäudes befinden. Die Verbindungsstrecken zwischen zwei Abschnitten

sind jeweils auf Gebirgstemperatur und erreichen alle nach ca. 1 080 Jahren ihre Endporosität.

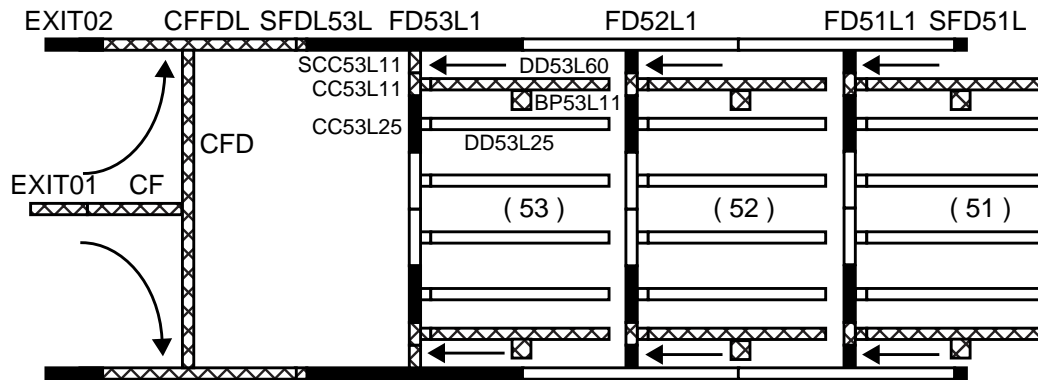
In den Einlagerungsfeldern ist folgendes Verhalten festzustellen. In allen Abschnitten gelangen die aus den begrenzten Laugeneinschlüssen (BP = brine pocket) eindringenden Laugen jeweils bis in die Querschläge (CC = connecting drifts) und im dritten Feld bis in die Verschlüsse zu der Flankenstrecken (SCC = sealing of connecting drifts). Die Laugemengen in den Querschlägen sind jedoch in allen Fällen sehr gering. Insgesamt gelangen aus den begrenzten Laugeneinschlüssen der drei Abschnitte ca. 400 m³ Lauge in die Einlagerungsfelder. Die Ergebnisse für den 4. Abschnitt wurden weggelassen, da sie wegen der gleichen Temperaturverteilung mit denjenigen für den 3. Abschnitt übereinstimmen. Lediglich die Zutrittszeitpunkte sind um 10 Jahre verschoben, entsprechend der gegenüber Abschnitt 4 um 10 Jahre früheren Einlagerung in Abschnitt 3.

4.2 Variante: 10-fach höheres Volumen der begrenzten Laugeneinschlüsse

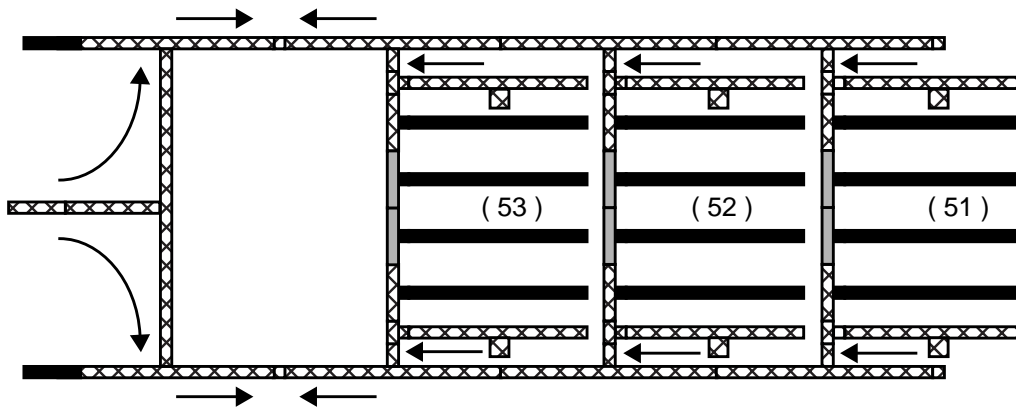
Im Referenzfall wird angenommen, daß jeder Einschluß 22,5 m³ Lauge enthält. Dieses Volumen reicht bei weitem nicht aus, um den in einem Einlagerungsort nach Ende der Einlagerung vorhandenen Resthohlraum von ca. 1 100 m³ zu füllen. Bis dieser Resthohlraum durch Gebirgskonvergenz auf das Volumen des Laugeneinschlusses verkleinert ist, vergehen je nach Temperaturbedingungen ca. 50 bis 100 Jahre. Nach diesem Zeitraum sind jedoch die anschließenden Querschläge ebenfalls durch Gebirgskonvergenz weitgehend verschlossen und erreichen die Endporosität kurze Zeit, nachdem Lauge eingedrungen ist.

Nimmt man ein 10-fach größeres Volumen für die begrenzten Einschlüsse an, so breitet sich die Lauge weiter aus. Der Tabelle 4.3 ist zu entnehmen, daß sie bis in die Flankenstrecken vordringt und dort auf die Lauge aus dem Deckgebirge trifft. Dadurch kommt es zu einer Radionuklidfreisetzung aus allen Einlagerungsorten des Grubengebäudes, die mit einem begrenzten Laugeneinschluß verbunden sind. Dies ist auch im mittleren Teil der Abbildung 4.1 zu sehen. Trotz der relativ hohen Laugenvolumina sind in dieser Variante nur die Einlagerungstrecken mit angeschlossenem Laugeneinschluß von einer

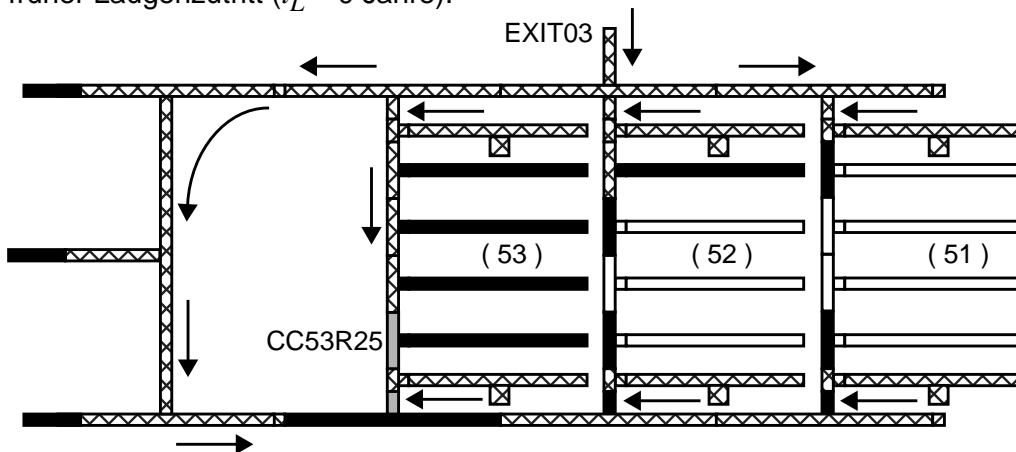
Referenzfall:



erhöhtes Laugenvolumen:



früher Laugenzutritt ($t_L = 0$ Jahre):



■ Endporosität ☒ geflutet ◑ Endporosität nach Laugenzutritt □ leer

Abb. 4.1: Laugebewegungen im Abschnitt 5 im Referenzfall und 2 Varianten.

Nuklidfreisetzung betroffen, da alle anderen Einlagerungsstrecken durch Gebirgskonvergenz verschlossen sind, bevor sie von Lauge erreicht werden.

Tabelle 4.3: Chronik der Segmente für die Variante mit erhöhtem Laugenvolumen.
 $T_L = 85$ Jahre. Zutritt über EXIT01.

Segment	Zuflußzeiten [a]		Beginn des Auspres-sens [a]	Laugemengen am Ende des Szenarios [m ³]		Errei-chender End-porosi-tät [a]	Endporosi-tät im Bereich
	Beginn	Ende		Zufluß	Abfluß		
EXIT01	85	261	261	10 287	9 955		
CF	85	236	237	9 900	9 275		
CFD	236	244	244	274,16	232		
CFFDL	96	261	261	260	211		
SFD53L	69	96		68			
FD53L1	36	69	69	154	133		
FD52L1	29	43	43	81	41		
FD51L1	27	43	43	81	50		
SFD51L	43	363		68			
FDC45L	77	642	642	110	7		
SFD43L	50	77		68			
FD43L1	18	50	50	155	118		
FD42L1	10	22	22	74	23		
FD41L1	7	21	21	77	40		
SFD41L	21	383		68			
FDC34L	74	479	479	107	4		
SFD33L	48	74		68			
FD33L1	15	48	48	156	116		
FD32L1	8	21	21	76	19		
FD31L1	6	20	20	79	8		
SCC53L11	34	36	36	17	16		
CC53L11	32	35	35	22	21		
DD53L11	1	32	32	167	121		
BP53L11	1	1	1	225	223	119	Versatz
CC53L25	35	65	65	4	1		
CC53L60	65			0		73	Versatz
DD53L25						18	Versatz
SCC52L11	28	29	29	10	7		
CC52L11	27	28	28	14	11		

Tabelle 4.3: Chronik der Segmente für die Variante mit erhöhtem Laugenvolumen.
 $T_L = 85$ Jahre. Zutritt über EXIT01. (Fortsetzung)

Segment	Zuflußzeiten [a]		Beginn des Auspres-sens [a]	Laugenmengen am Ende des Szenarios [m ³]		Errei-chen der End-porosi-tät [a]	Endporo-sität im Bereich
	Beginn	Ende		Zufluß	Abfluß		
DD52L11	-2	27	27	145	71		
BP52L11	-2	-2	-2	220	198		
CC52L25						23	Versatz
SCC51L11	26	27	27	11	9		
CC51L11	24	26	26	12	10		
DD51L11	-5	24	24	135	66		
BP51L11	-5	-5	-5	215	193		
CC51L25						20	Versatz
(Abschnitt 4 weggelassen)							
SCC33L11	14	15	15	17	15		
CC33L11	11	14	14	22	21		
DD33L11	-19	11	11	171	123		
CC33L25	14	41	41	3	0,2		
CC33L60	41			0,0		47	Versatz
DD33L25						-2	Versatz
BP33L11	-19	-19	-19	111	223	66	Versatz
SCC32L11	7	8	8	9	6		
CC32L11	6	7	7	14	9		
DD32L11	-22	6	6	149	64		
BP32L11	-22	-22	-22	209	190		
CC32L25						3	Versatz
SCC31L11	5	6	6	10	6		
CC31L11	4	5	5	13	8		
DD31L11	-25	4	4	139	56		
BP31L11	-25	-25	-25	207	179		
CC31L25						-0,2	Versatz

In der Tabelle sind wie im Referenzfall nur die Laugenbewegungen für den linken Teil des Grubengebäudes angegeben, da die Werte für die rechte Seite nahezu übereinstimmen. Durch den zentralen und in der Symmetrieachse liegenden Zutrittspunkt bei EXIT01 verteilen sich die Laugenmengen gleichmäßig auf beide Seiten. Die unterschiedlich langen Verbindungsstrecken (FDC) zwischen den Abschnitten wirken sich praktisch nicht aus,

weil sie erst nach einigen hundert Jahren mit Lauge gefüllt sind und weil nur wenige Kubikmeter Lauge aus ihnen freigesetzt werden. Das bedeutet auch, daß die freigesetzten Radionuklide fast ausschließlich aus dem Abschnitt 5 stammen, aus dem insgesamt über 200 m^3 kontaminierte Lauge in den Zentralteil ausgepreßt wird.

In den Abbildungen 4.2 und 4.3 sind die ausgepreßten Laugenmengen und die zeitlichen Entwicklungen der Laugenströme in 5 ausgewählten Segmenten dargestellt. Während der ersten 32 Jahre fließen ca. 200 m^3 Lauge aus dem Einschluß BP53L11 in die Einlagerungsstrecke DD53L11. Danach wird 120 m^3 dieser Lauge aus der Einlagerungsstrecke in Richtung Querschlag und Flankenstrecke ausgepreßt. In der Flankenstrecke trifft sich diese Lauge mit derjenigen, die über den Zentralteil zugeflossen ist. Insgesamt wird aus der Flankenstrecke mehr als 200 m^3 kontaminierte Lauge in Richtung zum Zentralteil ausgepreßt. Die Kontaminationen stammen fast ausschließlich aus dem 5. Abschnitt, da über die Verbindungsstrecke FDC45L weniger als 20 m^3 Lauge in diesen Abschnitt gelangt. Auf dem Weg durch den Zentralteil wird die kontaminierte Lauge aus der Flankenstrecke verdünnt; insgesamt wird von dort fast $10\,000 \text{ m}^3$ Lauge in das Deckgebirge ausgepreßt.

Die rechte und linke Seite des Grubengebäudes unterscheiden sich in der Länge der Verbindungsstrecken zwischen den einzelnen Abschnitten. Dieser Unterschied beträgt etwa einen Faktor 2. In Abbildung 4.4 sind die Laugenbewegungen für die Verbindungsstrecken zwischen dem 4. und 5. Abschnitt dargestellt. Die Lauge strömt hauptsächlich aus dem 4. Abschnitt ein; der Zufluß dauert auf der rechten Seite 500 Jahre und auf der linken Seite 650 Jahre. Auf der linken Seite strömt weiterhin Lauge mit sehr geringen Raten ein, auf der rechten Seite wird zunächst Lauge in den 4. Abschnitt ausgepreßt und danach strömt sie ab 700 Jahren wieder ein. Aus Richtung des Zentralteils strömen in beide Strecken zusätzliche Laugen nach 350 Jahren ein, wobei insgesamt nicht mehr als 10 m^3 zutreten. Das Ausströmen der Lauge wird hauptsächlich durch die Gebirgskonvergenz verursacht. Da auf der rechten Seite das Ausströmen früher beginnt, sind die freigesetzten Mengen stets größer als auf der linken Seite. Da die Laugenströme auf der linken Seite aber wegen der größeren Volumina größer sind, gleichen sich die freigesetzten Mengen im Laufe der Zeit an. Die Unterschiede für diese beiden Strecken sind so gering, daß sich auch die gesamten Laugenbewegungen auf den beiden Seiten des Grubengebäudes nur gering unterscheiden.

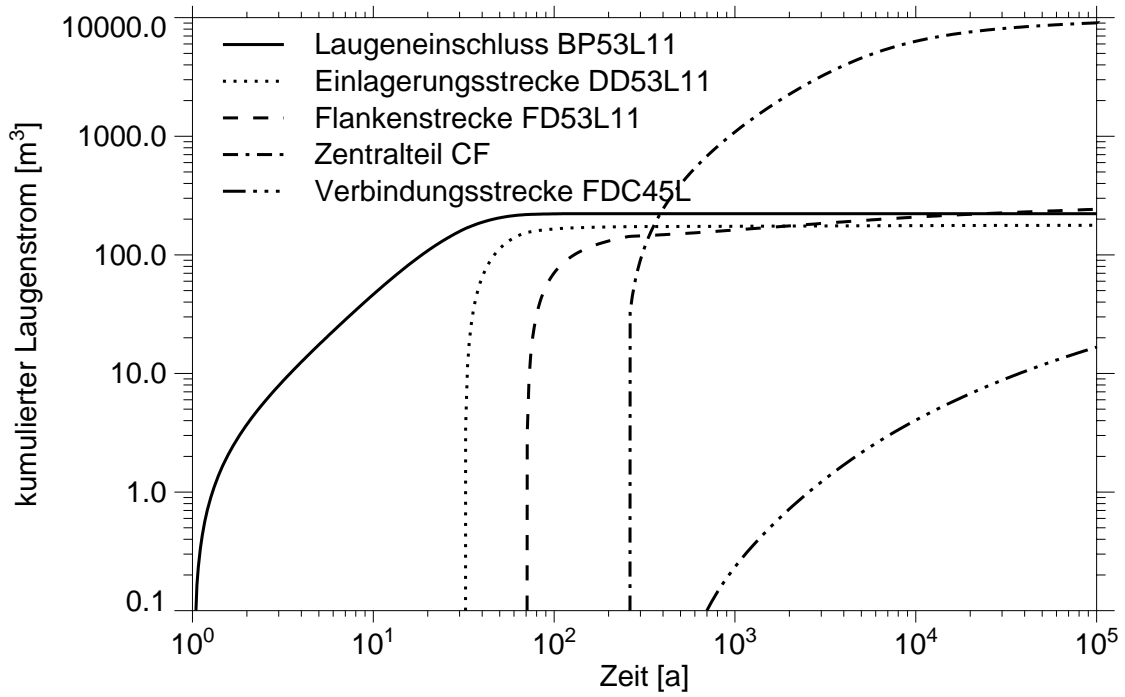


Abb. 4.2: Ausgepreßte Laugemengen in Richtung Zentralteil, bzw. Deckgebirge.

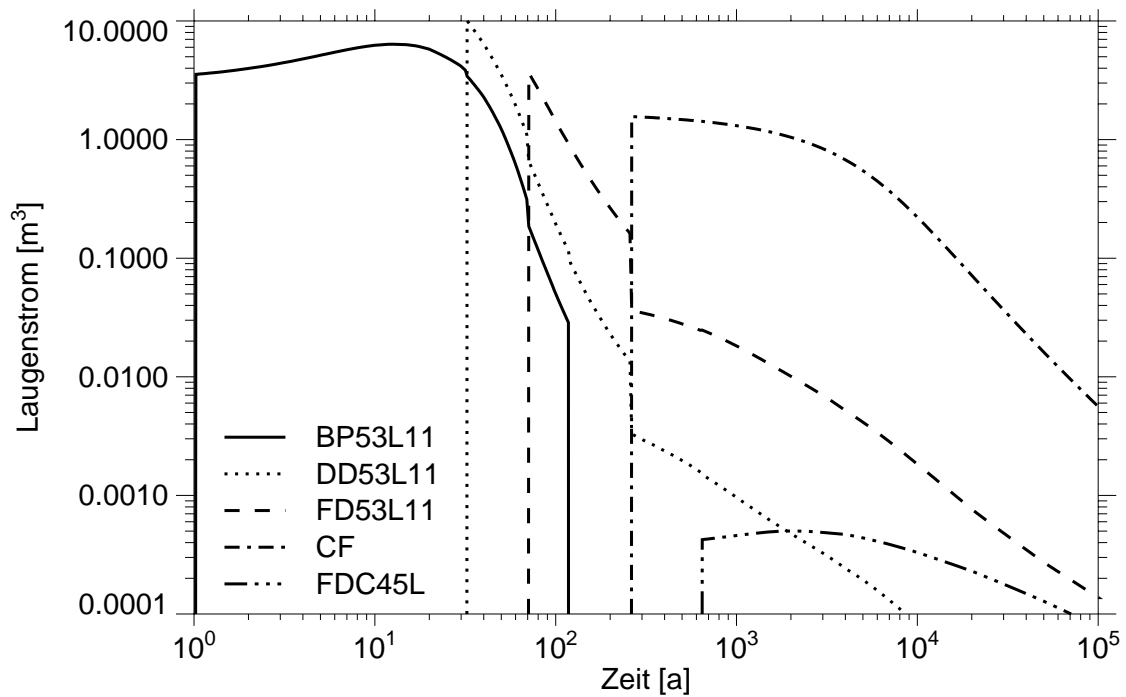


Abb. 4.3: Laugenströme in Richtung Zentralteil, bzw. Deckgebirge.

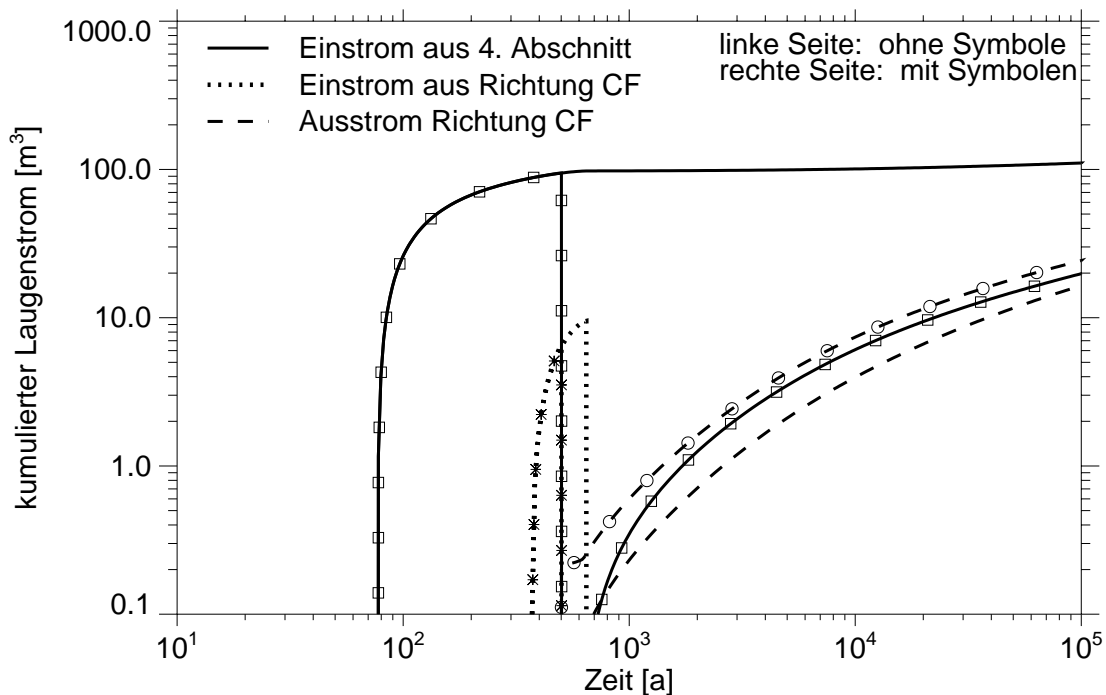


Abb. 4.4: Vergleich der Laugenbewegungen in den Verbindungsstrecken FDC auf der rechten und linken Seite zwischen dem 4. und 5. Abschnitt.

4.3 Variante: Zutrittszeitpunkt 0 Jahre

Wenn in dieser Variante die Lauge über den Zutrittsort EXIT01 in den Zentralteil des Grubengebäudes gelangt, so werden keine Radionuklide freigesetzt. Daher wird für die folgende Diskussion ein Laugenzutritt über EXIT03 in der Nähe der Einlagerungsfelder des 5. Abschnitts angenommen, bei dem die Lauge aus dem Deckgebirge bis in die Einlagerungsfelder gelangt. An dieser Variante ist besonders auffällig, daß die Flankenstrecke FD52L1, in welche die Lauge aus dem Deckgebirge eindringt, bereits nach 817 Jahren die Endporosität erreicht. Dies liegt daran, daß hier relativ hohe Temperaturen herrschen und daß durch die Anbindung an das Deckgebirge der Stützdruck der Lauge stark abnimmt. Durch beide Effekte verringert sich das Porenvolumen durch Konvergenz schneller als im Referenzfall. Der zeitliche Verlauf des Laugendrucks für diesen Fall ist im folgenden Kapitel 4.4 in Abbildung 4.7 dargestellt.

Eine Skizze der berechneten Laugenbewegungen ist in Abbildung 4.1 unten zu sehen. Tabelle 4.4 enthält eine Zusammenstellung der Daten zu dieser Laugenbewegung. Die Lauge breitet sich über die linke Seite des Grubengebäudes entlang der Flankenstrecken aus, füllt den Zentralteil und erreicht die Flankenstrecken der rechten Seite des Grubengebäudes. Hier hat jedoch die Flankenstrecke FD53R1 bereits nach 157 Jahren die Endporosität erreicht und verhindert damit einen Kontakt mit den Laugen, die sich über den Querschlag des 3. Feldes (CC53) ausbreiten, so daß es zu keinem Ringschluß in der Laugenbewegung kommt.

Tabelle 4.4: Chronik der Segmente für die Variante mit Laugenzutritt bei $T_L = 0$ Jahren. Zutritt über EXIT03.

Segment	Zuflußzeiten [a]		Beginn des Auspres-sens [a]	Laugenmengen am Ende des Szenarios [m ³]		Errei-chen der End-porosi-tät [a]	Endporosi-tät im Bereich
	Beginn	Ende		Zufluß	Abfluß		
EXIT03	0	120	120	1 686	101		
CF	137	913		589			
CFD	80	137	137	486	356		
CFFDL	37	80	80	753	596		
SFD53L	31	37		69			
FD53L1	15	31	31	563	521		
FD52L1	0,01	15	15	595	590	817	Versatz
FD51L1	15	29	29	223	196		
SFD51L	29	38		68			
FDC45L	38	552	552	161	60		
SFD43L	552	4 339		68			
FD43L1						128	Versatz
FD42L1						44	Versatz
FD41L1						44	Versatz
CFFDR	137	313	313	210	80		
SFD53R	313	435		68			
FD53R1						157	Versatz
SCC53L11	31	31,5	31,5	19	17		
CC53L11	31,5	32	32	25	23		
CC53L25	32	35	35	52	44		
CC53L60	35	42	42	38	21		
CC53R60	42	58	58	9	1		

Tabelle 4.4: Chronik der Segmente für die Variante mit Laugenzutritt bei $T_L = 0$ Jahren. Zutritt über EXIT03. (Fortsetzung)

Segment	Zuflußzeiten [a]		Beginn des Auspres-sens [a]	Laugenmengen am Ende des Szenarios [m ³]		Errei-chender End-porosi-tät [a]	Endporo-sität im Bereich
	Beginn	Ende		Zufluß	Abfluß		
CC53R25	58			0,05		73	Versatz
CC53R11	94	106	106	0,4	0		
SCC53R11	106			0,01		148	Versatz
DD53L11	1	39	39	127	78		
DD53R11	1	94	94	22	0,4		
DD53L25						18	Versatz
BP53L11	1	1	1	22,5	22,3	108	Versatz
BP53R11	1	1	1	22,5	22,3	66	Versatz
SCC52L11	15	15	15	19	18		
CC52L11	15	16	16	35	33		
CC52L25	16			0,2		23	Versatz
CC52L60						23	Versatz
CC52R25						23	Versatz
CC52R11	56			0,02		56	Versatz
SCC52R11						66	Versatz
DD52L11	-2	25	25	165	97		
DD52R11	-2	56	56	22	0,02		
DD52L25						11	Versatz
BP52L11	-2	-2	-2	22	20,4		
BP52R11	-2	-2	-2	22	21,7		
SCC51L11	29	29	29	9	8		
CC51L11	29	30	30	8	7		
CC51L25						20	Versatz
CC51R25						20	Versatz
CC51R11	53			0,01		53	Versatz
SCC51R11						66	Versatz
DD51L11	-5	44	44	40	7		
DD51R11	-5	53	53	21,4	0,01		
DD51L25						8	Versatz
BP51L11	-5	-5	-5	21,5	21,1		
BP51R11	-5	-5	-5	21,5	21,4		

Außer in Richtung Zentralteil breitet sich die eingedrungene Lauge in Richtung des 4. Abschnitts aus, erreicht diesen jedoch nicht. Alle drei Einlagerungsstrecken des 5. Abschnitts mit begrenzten Laugeneinschlüssen auf der linken Seite des Grubengebäudes gelangen in Kontakt mit der Lauge aus dem Deckgebirge, so daß es zu einer Freisetzung von Radionukliden aus diesen Strecken kommt. Alle anderen Einlagerungsstrecken in den drei Feldern des 5. Abschnitts sind durch Konvergenz verschlossen, bevor sie in Kontakt mit Lauge kommen, so daß sie nicht zur Radionuklidfreisetzung beitragen.

4.4 Vergleich der Varianten unter Berücksichtigung variabler Zutrittsorte

In den vorhergehenden Kapiteln wurden die Laugenbewegungen in den Grubengebäuden für jeweils ein Beispiel beschrieben, und zwar für den Referenzfall, frühen Laugenzutritt und großes Volumen der begrenzten Laugeneinschlüsse. In diesem Kapitel werden die Ergebnisse aller gerechneten Varianten miteinander verglichen, wobei insbesondere die Strahlenexposition als Vergleichskriterium verwendet wird.

In den Abbildungen 4.5 und 4.6 sind die aus dem Grubengebäude in das Deckgebirge ausgepreßten Laugenströme für alle Varianten mit einer Radionuklidfreisetzung dargestellt. In der Variante mit großem Volumen der begrenzten Laugeneinschlüsse gibt es für jeden Zutrittsort eine Freisetzung. Die in diesen Fällen berechneten Laugenströme unterscheiden sich stark für die Zutrittsorte am Anfang und am Ende des Grubengebäudes einerseits sowie für die Zutrittsorte an den Flankenstrecken andererseits. Da an den Enden des Grubengebäudes die Lauge den Strömungswiderstand der Flankenstrecken und ggfs. des Zentralteils überwinden muß, baut sich in diesen Strecken ein über dem hydrostatischen Druck liegender Druck auf, der dazu führt, daß die Zutrittsstellen lange offenbleiben. Dies ist in Abbildung 4.7 zu sehen. Bei den Zutrittsstellen in die Flankenstrecken ist praktisch kein Strömungswiderstand zu überwinden, so daß in den zugehörigen Flankenstrecken nur der hydrostatische Druck herrscht und diese Strecken relativ schnell ihre Endporosität erreichen. Daher hört bei den Zutrittsorten EXIT03, EXIT04, EXIT05 und EXIT09 der Laugenstrom aus dem Grubengebäude nach 600, bzw. 25 000 Jahren auf. Bei den anderen Zutrittsstellen dauert der Laugenstrom bis zum Ende des Szenarios an.

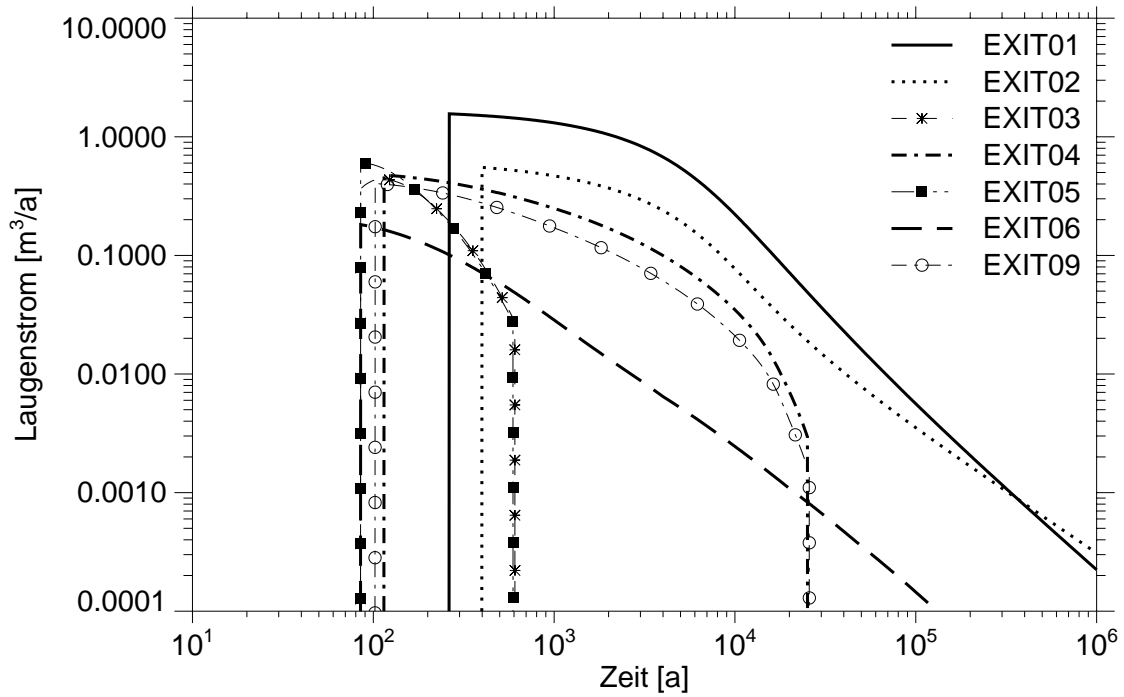


Abb. 4.5: Laugenströme aus den Zutrittsorten in den Varianten mit großem Laugen-
volumen.

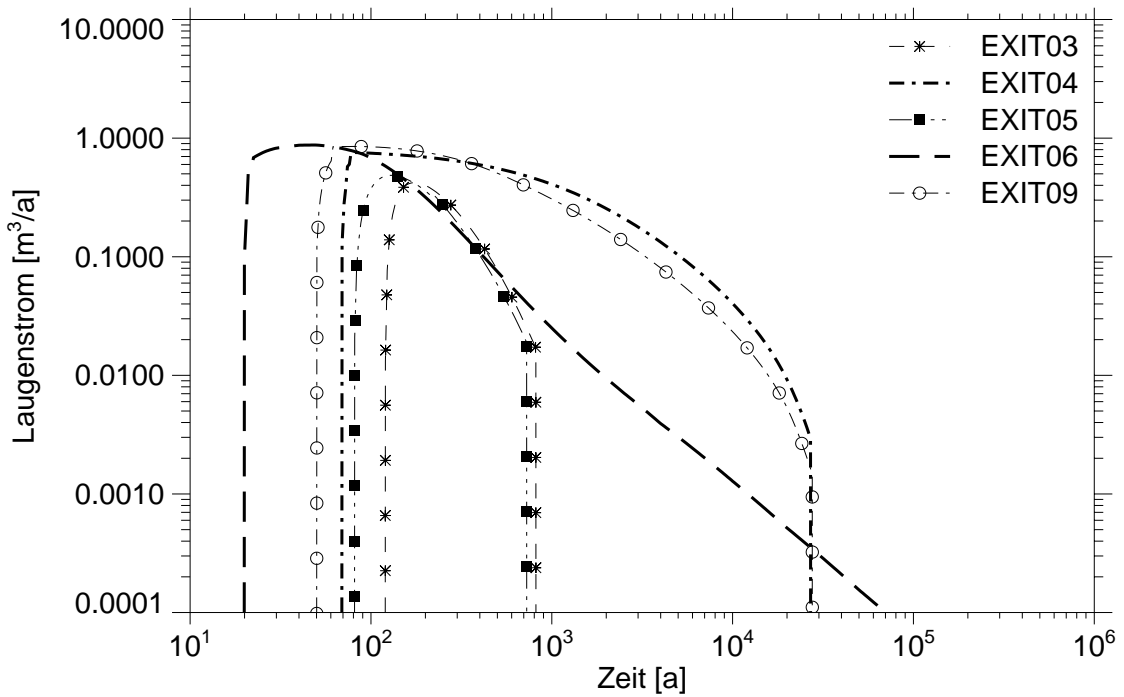


Abb. 4.6: Laugenströme aus den Zutrittsorten in den Varianten mit frühem Zutritt.

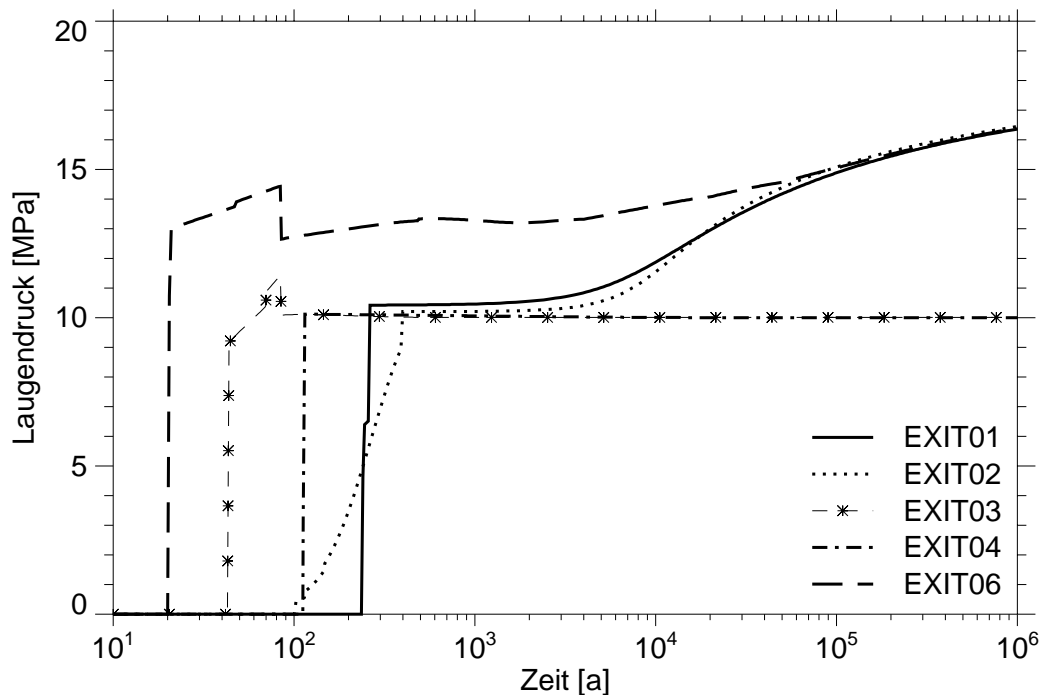


Abb. 4.7: Zeitliche Entwicklung des Laugendruckes für ausgewählte Zutrittsorte.

In der Variante mit frühem Laugenzutritt kommt es nur in den Fällen zu einer Freisetzung von Radionukliden, bei denen der Zutritt direkt in die Flankenstrecke neben einem Einlagerungsfeld erfolgt. Das Verhalten der Laugenströme ist ähnlich wie in der vorgehend beschriebenen Variante. Die Zutrittsorte EXIT03 und EXIT05, die neben den Abschnitten 5 und 3 liegen, zeigen jedoch ein etwas unterschiedliches Verhalten, das durch den frühen Laugenzutritt ausgeprägter wird. Die höheren Temperaturen neben Abschnitt 3 führen dazu, daß der Porenraum in der Flankenstrecke schneller reduziert wird und dadurch die Lauge früher aus dem Grubengebäude ausgepreßt wird. Das Ende der Freisetzung wird dadurch auch schneller erreicht als beim Zutrittsort EXIT03 neben dem 5. Abschnitt.

Die Abbildungen 4.8 und 4.9 zeigen die berechneten jährlichen Strahlenexpositionen für alle Varianten mit einer Radionuklidfreisetzung. In Abbildung 4.8 werden die Varianten mit großem Volumen der begrenzten Laugeneinschlüsse verglichen und in Abbildung 4.9 die Varianten mit frühem Laugenzutritt.

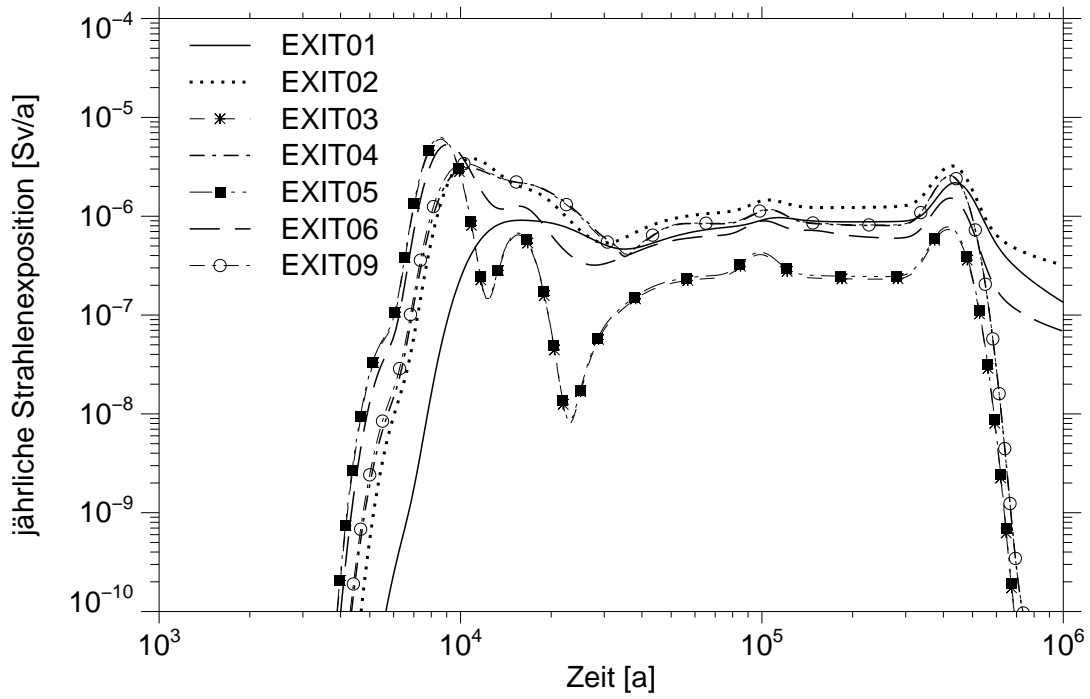


Abb. 4.8: Strahlenexpositionen in den Varianten mit großem Laugenvolumen.

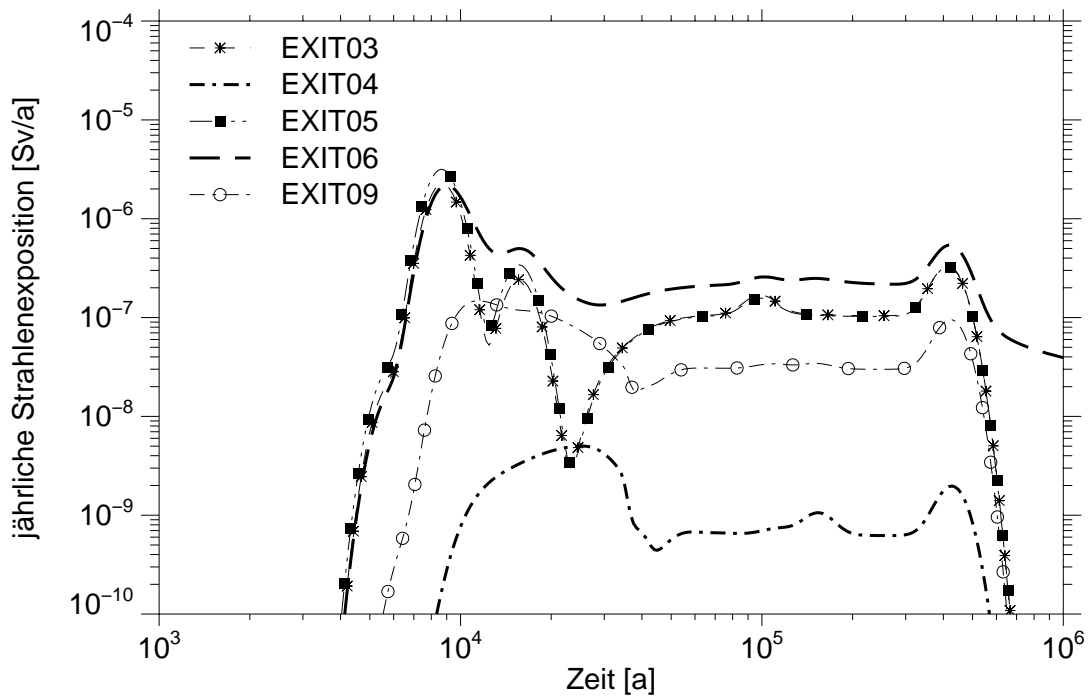


Abb. 4.9: Strahlenexpositionen in den Varianten mit frühem Laugenzutritt.

Wie bereits erwähnt, kommt es in den Varianten mit einem großen Laugenvolumen immer zu einer Freisetzung von Radionukliden, unabhängig davon, an welchem Ort des Grubengebäudes die Laugen aus dem Deckgebirge zutreten. Dies liegt daran, daß die Laugenmenge aus den begrenzten Einschlüssen ausreicht, die Porenräume bis in die Flankenstrecke hinein zu füllen. Dadurch kommt es zu einem Kontakt dieser kontaminierten Lauge mit derjenigen, die aus dem Deckgebirge eingeströmt ist. Die Strahlenexpositionen unterscheiden sich nur geringfügig zwischen den Varianten, die Maxima liegen im Bereich von $2 \cdot 10^{-6}$ bis $7 \cdot 10^{-6}$ Sv/a. Die Kurvenverläufe für die Varianten EXIT03 und EXIT05 sind fast identisch. In diesen Varianten treten die Laugen aus dem Deckgebirge in die Flankenstrecke direkt neben einem Einlagerungsfeld ein und die ausgepreßten Laugenmengen sind nahezu gleich, wie bei Abbildung 4.5 diskutiert wurde. Die Konsequenzen werden nur durch die geringfügig unterschiedlichen Temperaturen in den jeweiligen Einlagerungsbereichen beeinflußt.

Strömt die Lauge an den Orten EXIT01 oder EXIT02 ein, so wird das Maximum der Strahlenexposition erst zu späten Zeiten erreicht und von Np-237 hervorgerufen. In diesem Fall beginnt die Freisetzung der Radionuklide später als in den übrigen Varianten, weil der Zutritt der Laugen über den Zentralteil erfolgt und dessen großes Hohlraumvolumen erst geflutet werden muß. Außerdem wird die Lauge bis zum Ende des Szenarios ausgepreßt, so daß die langlebigen, stark sorbierenden Aktiniden etwas stärker zur Freisetzung beitragen als die Spaltprodukte, die für die Maxima der Strahlenexpositionen zu frühen Zeiten verantwortlich sind. Ein ähnliches Verhalten zeigt sich für den Zutrittsort EXIT06 am Ende des Grubengebäudes.

Strömt die Lauge an den Orten EXIT03, EXIT04, EXIT05 oder EXIT09 ein, so sind die relativen Maxima der Strahlenexpositionen ausgeprägt und die Kurven gehen für Zeiten größer als 600 000 Jahre gegen Null. Dies liegt vor allem daran, daß die Flankenstrecken, in die die Laugen zutreten, schnell ihre Endporosität erreichen und die Freisetzung der Radionuklide nur über einen relativ kurzen Zeitraum erfolgt. In den Rechnungen für die anderen Zutrittsorte werden die Radionuklide bis zum Ende des Szenarios bei 1 Million Jahre freigesetzt.

Bei der Variante mit frühem Zutritt der Lauge kommt es, wie bereits erwähnt, nur in einigen Fällen zu einer Freisetzung von Radionukliden. Hier sind jedoch die Unterschiede in

den maximalen Strahlenexpositionen größer als in der vorher diskutierten Variante und liegen im Bereich zwischen $5 \cdot 10^{-9}$ und $5 \cdot 10^{-6}$ Sv/a. Das unterschiedliche Verhalten liegt daran, daß in der Variante mit großen Laugeneinschlüssen alle Einlagerungsorte mit solchen Einschlüssen gleichmäßig geflutet werden und zur Freisetzung von Radionukliden beitragen. In der Variante mit frühem Zutritt dringt die Lauge vom Zutrittsort bis in die Querschläge ein und kommt erst dort in Kontakt mit der Lauge aus den Laugeneinschlüssen. Je nach Entfernung des Zutrittsortes von den Einlagerungsstrecken kommt es damit zu unterschiedlich vielen Kontakten mit Lauge aus Laugeneinschlüssen und folglich zu unterschiedlich starken Kontaminationen der aus dem Grubengebäude ausgepreßten Lauge.

Die größten Strahlenexpositionen treten bei Zutritten über die Orte EXIT03, EXIT05 und EXIT06 auf, bei denen jeweils drei Felder eines Abschnitts zur Radionuklidfreisetzung beitragen. Die geringste Strahlenexposition tritt auf, wenn die Lauge über den Ort EXIT04 zutritt, der an der Verbindungsstrecke FDC45L zwischen dem 4. und 5. Abschnitt liegt. Wie in Tabelle 4.1 gezeigt, hat in diesem Fall nur das 3. Feld des 4. Abschnitts Kontakt zum Deckgebirge, so daß auch nur aus einer einzigen Einlagerungsstrecke Radionuklide freigesetzt werden. Auch bei einem Zutritt über den Ort EXIT09 ist nur das 3. Feld des 4. Abschnitts von der Freisetzung betroffen, da in diesem Fall aber die Entfernung geringer ist, gelangt mehr Lauge als bei EXIT04 bis zur Einlagerungsstrecke. Damit werden mehr Radionuklide freigesetzt und die Strahlenexposition ist folglich höher.

5 Einfluß der Gasbildung

In diesem Kapitel werden der Einfluß der Gasbildung auf die Vorgänge in einem Endlager und deren Auswirkung auf die Freisetzung und damit die Dosisbelastung untersucht. Dabei wird das im Bericht [7] dargestellte Instrumentarium verwendet. Im folgenden wird zuerst die Gasbildung und deren Modellierung beschrieben. Daran anschließend wird der Einfluß des Gases auf die Transportmodellierung beschrieben. Danach werden die gerechneten Fälle und ihre Eingangsparameter behandelt. Abschließend werden die Ergebnisse ausführlich dargestellt.

5.1 Mechanismen der Gasbildung

Für eine Gasbildung in einem Endlager für radioaktive Abfälle kommen in der Hauptsache folgende Mechanismen in Betracht:

- Wasserstoffbildung durch anaerobe Metallkorrosion,
- Mikrobielle Zersetzung von Zellulose,
- Mikrobielle Zersetzung von anderen organischen Materialien.

Die radiolytische Zersetzung von im Endlager vorhandenem Wasser liefert von der Menge her einen unbedeutenden Beitrag und wird daher in dieser Arbeit vernachlässigt. Da in dem betrachteten Endlager nur LWR-Brennelemente in Pollux-Behältern eingelagert werden, entfällt auch die Gasbildung durch mikrobielle Prozesse, so daß nur die anaerobe Metallkorrosion zu betrachten ist.

Während sich aufgrund stöchiometrischer Betrachtungen die Menge des aus einem Pollux-Behälter produzierten Gases recht genau berechnen läßt, ist die Abschätzung der tatsächlichen Gasproduktionsrate problematisch. Aus der Literatur sind Eisenkorrosionsraten zwischen 0,1 und 10 μm pro Jahr bekannt [9], [13]. Da die Pollux-Behälter eine Wandstärke von 150 mm haben, würde eine mittlere flächige Abtragung von 1 $\mu\text{m}/\text{a}$ zu einer Lebensdauer von 150 000 Jahren führen. Da nach der Korrosion der äußeren Wand des Behälters noch die inneren Bauteile korrodieren, wird hier von einer Zeitdauer für die Gasproduktion von 200 000 Jahren ausgegangen. Wegen der schlecht prognostizier-

baren Zeitdauer der Gasbildung und zur besseren Untersuchung der Auswirkung der betrachteten Effekte wird als Variante noch eine Zeitdauer von 2 000 Jahren für die Gasbildung mitbetrachtet.

Aus den 20 Pollux-Behältern einer Einlagerungsstrecke bilden sich 630 000 Norm-m³ Wasserstoffgas. Bei dem im Endlager vorhandenen Druck von etwa 13 MPa entspricht dies einem Volumen von ca. 5 000 m³.

5.2 Modellierung der Auswirkung der Gasbildung

Neben einem Antrieb für einen Austauschstrom durch eine Gasströmung ist das Verdrängen von bereits vorhandener Lauge die mit Abstand größte Auswirkung der Gasbildung. Diese Laugenverdrängung kann in ihren Konsequenzen mit den für das Modul LOPOS erstellten Segmentmodellen behandelt werden. Die Segmentmodelle sind in [7] beschrieben und anhand eines Testfalls erläutert. Die beiden Typen von Segmenten mit Laugenverdrängung werden im folgenden kurz beschrieben.

5.2.1 Auswirkung in Einlagerungsorten

In den Einlagerungsorten findet gegebenenfalls eine Gasbildung statt und das Gas preßt Lauge aus dem Einlagerungsort aus, bis ein vorgegebbarer Volumenanteil gasgefüllt ist. Weiterhin entstehendes Gas verläßt den Einlagerungsort und kann sich möglicherweise an anderen Stellen des Grubengebäudes sammeln. Für diese Modellierung wird vorausgesetzt, daß das Segment zu Beginn der Gasbildung bereits mit Lauge geflutet ist.

In einem versetzten Einlagerungsort wird das Gas zunächst in Poren des Versatzes gespeichert, bis ein bestimmter materialabhängiger Schwellenwert überschritten wird. Während dieser Teil des Gases weiterhin in den Poren verbleibt, sammelt sich das übrige Gas im Bereich der Firste. Dies gilt insbesondere für Einlagerungsorte, die keinen Auslaß in der Nähe der Firste haben. Im folgenden wird dieser Bereich als geometrischer Gasspeicher bezeichnet. Das in einem Einlagerungsort zurückgehaltene Gas setzt sich daher im allgemeinen aus dem Anteil im geometrischen Gasspeicher und dem im übrigen

Porenraum verbliebenen Gas zusammen. Das Gasvolumen, welches insgesamt im Einlagerungsort zurückgehalten werden kann, wird als Gasspeichervolumen bezeichnet. Nach der Modellannahme kann Gas erst dann aus dem Einlagerungsort entweichen, wenn das gesamte Gasspeichervolumen gasgefüllt ist. Die Gassammlung führt zu einem Verdrängen von Lauge aus der Kammer, woraus neben der Gebirgskonvergenz ein zusätzlicher Antriebsmechanismus für eine Laugen- und Schadstofffreisetzung resultiert.

5.2.2 Auswirkung in anderen Teilen des Grubengebäudes

Das aus den Einlagerungsorten freigesetzte Gas kann sich möglicherweise in anderen Hohlräumen des Grubengebäudes sammeln und, sofern dieser Hohlraum ebenfalls mit Lauge gefüllt ist, dort einen Teil dieser Lauge verdrängen. Damit gibt es einen weiteren Antrieb für die Freisetzung kontaminierter Lauge aus dem Endlager. Zur Modellierung dieses Effekts wird ein spezielles Segment zur Verfügung gestellt, in dem sich die Gasströme aus allen Einlagerungsorten sammeln. Dort kann das gesammelte Gas analog zu der in Kapitel 5.2.1 beschriebenen Modellierung eingedrungene Lauge verdrängen. Auch hier wird das Gasspeichervolumen vorgegeben. Da in einem Grubengebäude aus programmtechnischen Gründen nur ein Segment dieser Art eingesetzt werden darf, muß die Anordnung dieses Segments im Segmentsystem vom Anwender geeignet vorgegeben werden, so daß der Effekt der Laugenverdrängung durch das aus den Kammern freigesetzte Gas optimal beschrieben wird.

5.3 Gerechnete Fälle und Eingangsparameter

Die Auswirkung der Gasbildung wird in zwei Serien von Rechnungen untersucht. In der ersten Serie wird der direkte Einfluß der Laugenverdrängung durch Gase in den Einlagerungsorten behandelt. In der zweiten Serie wird der Einfluß einer Gassammlung im Bereich der Infrastruktur des Zentralteils untersucht. Es wird das Rechenprogramm LOPOS3 in der Version 3.01 verwendet.

5.3.1 Daten zur Gasbildung in den Einlagerungsorten

Die Rechnungen werden für den Abschnitt 5 des Grubengebäudes durchgeführt, der in den Abbildungen 2.2 und 2.3 dargestellt ist. Dabei wird die Variante mit den erhöhten Volumina in den Laugeneinschlüssen ausgewählt, da es nur hier zu einer Radionuklidfreisetzung kommt.

Nach der Rechnung in Kapitel 4.2 sind die Einlagerungsorte DD53L11 und DD53R11 nach gut 32 Jahren mit Lauge gefüllt. Um das in Kapitel 5.2.1 beschriebene Segment zur Modellierung der Laugenverdrängung durch Gasbildung verwenden zu können, wird abweichend von den Rechnungen in Kapitel 4.2 ein instantaner Laugenzutritt in den beiden genannten Einlagerungsorten modelliert. Alle anderen Einlagerungsorte sind nicht relevant für die Nuklidfreisetzung, da sie entweder keinen angeschlossenen Laugeneinschluß haben oder nur in geringem Maße zur Nuklidfreisetzung beitragen. Das Gasspeichervolumen wird auf 10% bzw. 20% des Porenraums des Versatzmaterials festgelegt. Die 10% ergeben sich aus unveröffentlichten Messungen der GRS. Die zusätzliche Variante mit 20% wurde gewählt, um Meßfehler und ein nicht auszuschließendes geometrisches Gasspeichervolumen an der Firste zu berücksichtigen. Das Gasspeichervolumen beträgt vor dem Einsetzen der Gebirgskonvergenz ca. 100 m^3 bzw. 200 m^3 .

5.3.2 Daten zur Gassammlung im Zentralteil

Es wird von dem gleichen Rechenfall wie im vorigen Unterkapitel ausgegangen, jedoch wird wegen der vorher beschriebenen Einschränkungen des Gassammelsegments von einer vollständigen instantanen Flutung des gesamten Grubengebäudes nach 32 Jahren ausgegangen. Mit dieser vereinfachenden Annahme können die Auswirkungen der Gassammlung im Zentralteil bewertet werden.

Zur Modellierung der Laugenverdrängung durch Gasammlung im Zentralteil wird ein zusätzliches Segment eingefügt, das sich direkt an das Zentralteil anschließt. Dazu wird das Volumen des Zentralteils (Segments CF) um $150\,000 \text{ m}^3$ reduziert. Die $150\,000 \text{ m}^3$ stellen das Volumen des neuen Segments GASSPEI dar. Von diesem Volumen werden $60\,000 \text{ m}^3$ als Gasspeichervolumen betrachtet. Diese Modellierung realisiert somit, daß

60 000 m³ in den hohen Kammern des Zentralteils als geometrischer Gasspeicher zur Verfügung stehen.

5.4 Ergebnisse der Modellrechnungen mit Gasbildung

Die Ergebnisse werden anhand des Radionuklids J-129 dargestellt. J-129 ist ein wichtiges langlebiges Radionuklid, erreicht seine Löslichkeitsgrenze nicht und kann daher als repräsentativ für die Vorgänge im Grubengebäude angesehen werden.

5.4.1 Einfluß der Gasbildung in den Einlagerungsorten

Zur Beurteilung der Auswirkung der Gasproduktion in den Einlagerungsorten sind in Tabelle 5.1 die Ergebnisse verschiedener Rechenläufe dargestellt. Neben einem Lauf ohne Gasproduktion wurde in den weiteren Läufen die Gasproduktion so variiert, daß sich Gasfreisetzungsdauern von 2 000 Jahren, 20 000 Jahren und 200 000 Jahren ergeben. Zusätzlich wurden Rechnungen mit unterschiedlich großen Volumina des Gasspeichers durchgeführt. Als Ergebnisse werden die Freisetzung von J-129 aus dem Endlager und die daraus resultierenden Strahlenexpositionen dargestellt.

Tabelle 5.1: Freisetzung und Strahlenexposition durch J-129 für verschiedene Gasproduktionsraten (Dauer der Gasfreisetzung) und verschiedene Anteile des Gasspeichers am Porenvolumen.

Dauer der Gasfreisetzung	Anteil des Gasspeichers am Porenvolumen			
	10%		20%	
	Freisetzung [Bq]	Dosis [Sv/a]	Freisetzung [Bq]	Dosis [Sv/a]
ohne Gasbildung	$8,44 \cdot 10^9$	$1,04 \cdot 10^{-6}$	$8,44 \cdot 10^9$	$1,04 \cdot 10^{-6}$
2 000 a	$9,16 \cdot 10^9$	$1,16 \cdot 10^{-6}$	$9,97 \cdot 10^9$	$1,30 \cdot 10^{-6}$
20 000 a	$9,57 \cdot 10^9$	$1,22 \cdot 10^{-6}$	$10,9 \cdot 10^9$	$1,44 \cdot 10^{-6}$
200 000 a	$9,83 \cdot 10^9$	$1,26 \cdot 10^{-6}$	$11,0 \cdot 10^9$	$1,43 \cdot 10^{-6}$

Man erkennt, daß das zusätzliche Auspressen durch Gasverdrängung die Freisetzung und damit die Dosisbelastung deutlich erhöht.

Zur Verdeutlichung des Effktes ist in Abbildung 5.1 der Laugenstrom aus dem Einlagerungsort DD53L11 über der Zeit aufgetragen. Dabei wurde die Gasproduktionsrate gewählt, die nach 2 000 Jahren zur völligen Umsetzung der Metallteile führt.

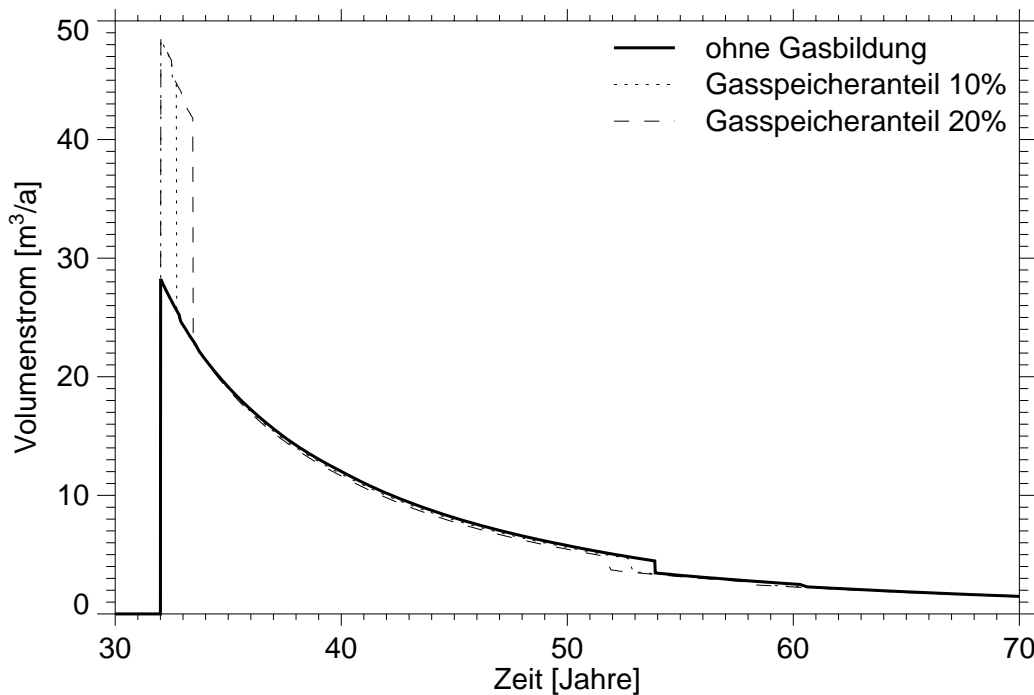


Abb. 5.1: Laugenstrom aus dem Einlagerungsort DD53L11 bei verschiedenen Größen des Gasspeichervolumens.

Der durch die Gebirgskonvergenz verursachte anfängliche Laugenstrom von ca. $28 \text{ m}^3/\text{a}$ erhöht sich um ca. $20 \text{ m}^3/\text{a}$. Der erhöhte Volumenstrom bleibt erhalten, bis das Gasspeichervolumen im Einlagerungsort mit Gas aufgefüllt ist. Dies dauert abhängig von der Größe des Gasspeichervolumens unterschiedlich lang, da der zusätzliche Volumenstrom entsprechend der Modellierung zeitlich konstant ist.

Der erhöhte Laugenstrom aus den Einlagerungsorten führt zu einer erhöhten Freisetzung von Radionukliden aus dem Grubengebäude und damit zu einer erhöhten Dosisbelastung in der Biosphäre. Die Erhöhung der Freisetzung aus dem Grubengebäude ist

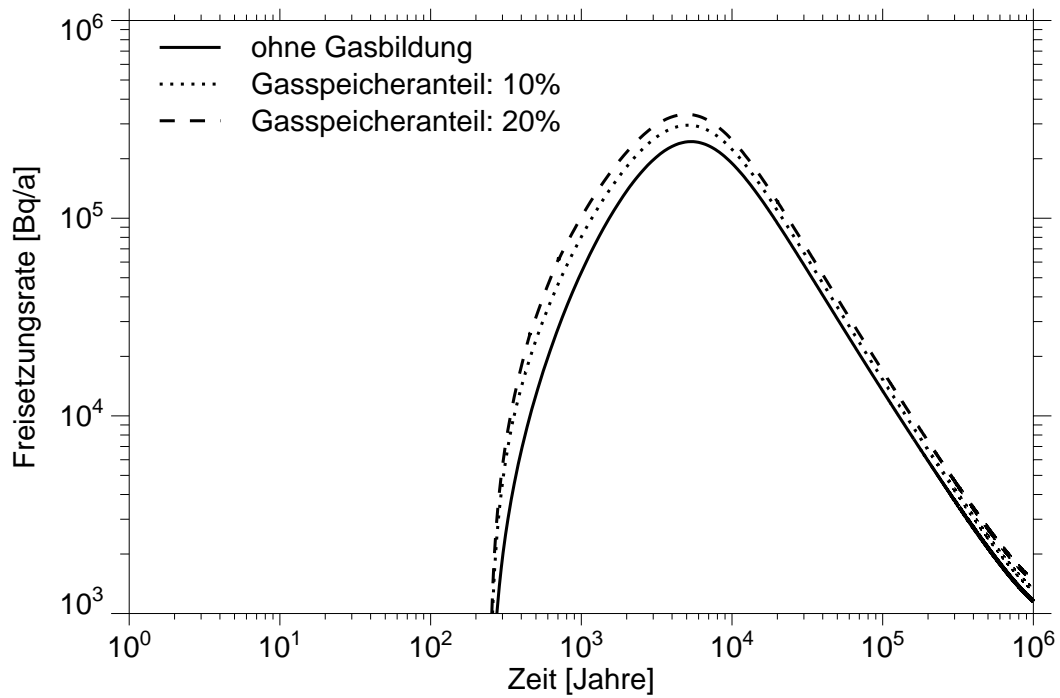


Abb. 5.2: Freisetzung aus dem Grubengebäude bei langsamer Gasbildung.

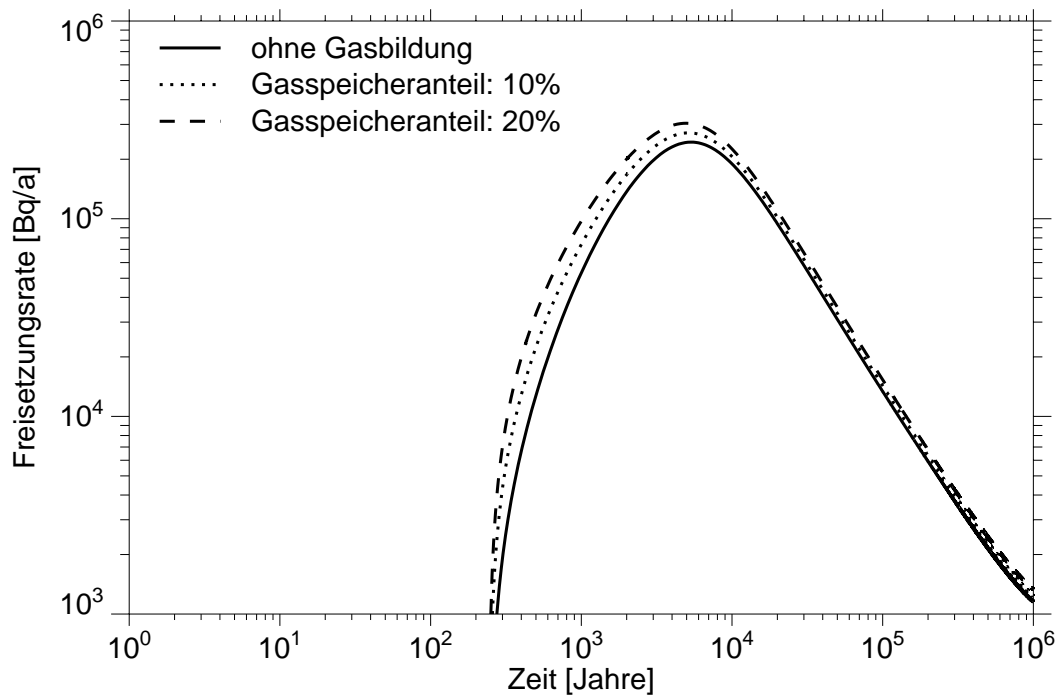


Abb. 5.3: Freisetzung aus dem Grubengebäude bei schneller Gasbildung.

dann besonders ausgeprägt, wenn die Gasbildung langsam ist und sich damit über einen größeren Zeitraum verteilt. Dies ist dadurch zu erklären, daß bei einem frühen, starken zusätzlichen Auspressen die Nuklidkonzentration im Einlagerungsort noch gering ist, da erst wenig Radionuklide mobilisiert sind.

Der erhöhte Laugenstrom aus den Einlagerungsorten führt entlang des gesamten Ausbreitungsweges im Grubengebäude zu einem beschleunigten Transport. Dies wird deutlich, wenn man den zeitlichen Verlauf der Freisetzung aus dem Grubengebäude betrachtet (Abbildungen 5.2 und 5.3). In Abbildung 5.2 ist der Nuklidstrom aus dem Grubengebäude für den Fall aufgetragen, bei dem die Gasbildung 200 000 Jahre andauert. Das Bild zeigt die Fälle ohne Gasproduktion und für Gasspeichervolumina von 10% und 20% des Porenraums. In Abbildung 5.3 sind die gleichen Größen für den Fall einer schnellen Gasbildung (Dauer 2 000 Jahre) dargestellt. Man erkennt in beiden Fällen die Erhöhung der Freisetzung mit der Erhöhung des Gasspeicheranteils am Porenraum. Ebenfalls erkennt man eine geringfügige Verschiebung der Freisetzung zu früheren Zeiten. Diese Verschiebung kann bei Radionukliden mit geringer Halbwertszeit einen großen Einfluß auf die Strahlenexposition haben, wenn das Radionuklid nicht aufgrund eines langen Geosphärentransports weitgehend zerfällt.

5.4.2 Einfluß der Gassammlung außerhalb der Einlagerungsorte

Zur Bewertung der Gassammlung und Laugenverdrängung im Bereich des Zentralteils wurden mehrere Rechnungen durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5.2 zusammengefaßt. Zunächst wurde als Referenz ein Fall ohne Gasbildung betrachtet, dessen Ergebnisse allerdings wegen der Flutung des gesamten Grubengebäudes nach 32 Jahren anders als in Kapitel 5.4.1 sind.

Danach wurde für eine schnelle und eine langsame Gasbildung der Einfluß der Gassammlung im Zentralteil berechnet. Als Ergebnisse werden die Freisetzung von J-129 aus dem Endlager und die daraus resultierenden Strahlenexpositionen angegeben.

Man erkennt, daß sich die Mengen der freigesetzten Radionuklide und damit die Dosisbelastungen durch die Gasbildung um einige Prozente erhöhen, und zwar unabhängig

Tabelle 5.2: Freisetzung und Strahlenexposition durch J-129 für verschiedene Gasproduktionsraten (Dauer der Gasfreisetzung) mit und ohne Gasbildung sowie mit und ohne Gassammlung im Zentralteil.

Dauer der Gasfreisetzung	ohne Gassammlung im Zentralteil		mit Gassammlung im Zentralteil	
	Freisetzung [Bq]	Dosis [Sv/a]	Freisetzung [Bq]	Dosis [Sv/a]
ohne Gasbildung	$2,89 \cdot 10^{10}$	$8,75 \cdot 10^{-6}$	$2,89 \cdot 10^{10}$	$8,75 \cdot 10^{-6}$
2 000 a	$3,00 \cdot 10^{10}$	$9,20 \cdot 10^{-6}$	$3,05 \cdot 10^{10}$	$9,49 \cdot 10^{-6}$
200 000 a	$3,04 \cdot 10^{10}$	$9,37 \cdot 10^{-6}$	$3,02 \cdot 10^{10}$	$9,39 \cdot 10^{-6}$

von der Gasbildungsrate und unabhängig davon, ob die Laugenverdrängung durch Gassammlung im Gasspeichersegment berücksichtigt wird oder nicht. Dieses Ergebnis läßt sich erklären, wenn man die Laugenströme aus dem Einlagerungssegment betrachtet. Sie sind in den Abbildungen 5.4 und 5.5 aufgetragen. Man erkennt im Falle der langsamen Gasbildung (Abbildung 5.4) einen gegenüber der Rechnung ohne Gasbildung geringfügig erhöhten Laugenstrom. Der zusätzliche Volumenstrom wird durch Laugenverdrängung hervorgerufen. Er verschwindet nach ca. 500 Jahren, wenn das Gasspeichervolumen im Einlagerungsort aufgefüllt ist.

Im Falle der schnellen Gasbildung (Abbildung 5.5) ist das Bild deutlich anders. Die Gasverdrängung bewirkt über wenige Jahre einen hohen zusätzlichen Laugenstrom. Danach ist das Gasspeichervolumen mit Gas aufgefüllt und das weiterhin gebildete Gas strömt nach außen. Es sammelt sich im Gasspeichersegment und verdrängt dort Lauge. Der so entstehende zusätzliche Laugenstrom bewirkt am Verschuß am Ausgang des Grubengebäudes einen Druckgradienten, durch den es zu einem Druckanstieg im gesamten Grubengebäude und somit auch im Einlagerungssegment kommt. Dieser Druckanstieg ist so hoch, daß die Gebirgskonvergenz deutlich behindert wird und die Laugenströme im Grubengebäude und insbesondere aus dem Einlagerungsort absinken.

Die Konsequenzen der beschriebenen Laugenströme am Ausgang des Grubengebäudes lassen sich an den Abbildungen 5.6 und 5.7 erläutern. Im Falle langsamer Gasbildung ergibt sich aufgrund der erhöhten Laugenströme ein über die gesamte Zeit erhöhter Nuklidstrom, der auch zu einer erhöhten Dosisbelastung in der Biosphäre führt (siehe

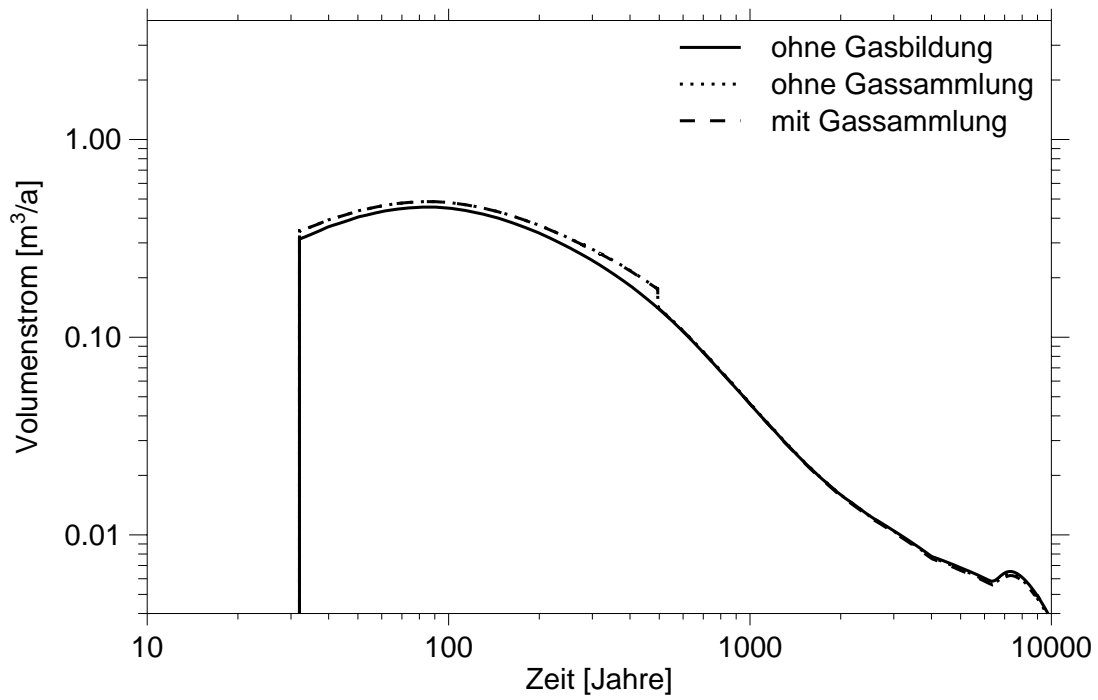


Abb. 5.4: Laugenstrom aus dem Einlagerungsort bei langsamer Gasbildung.

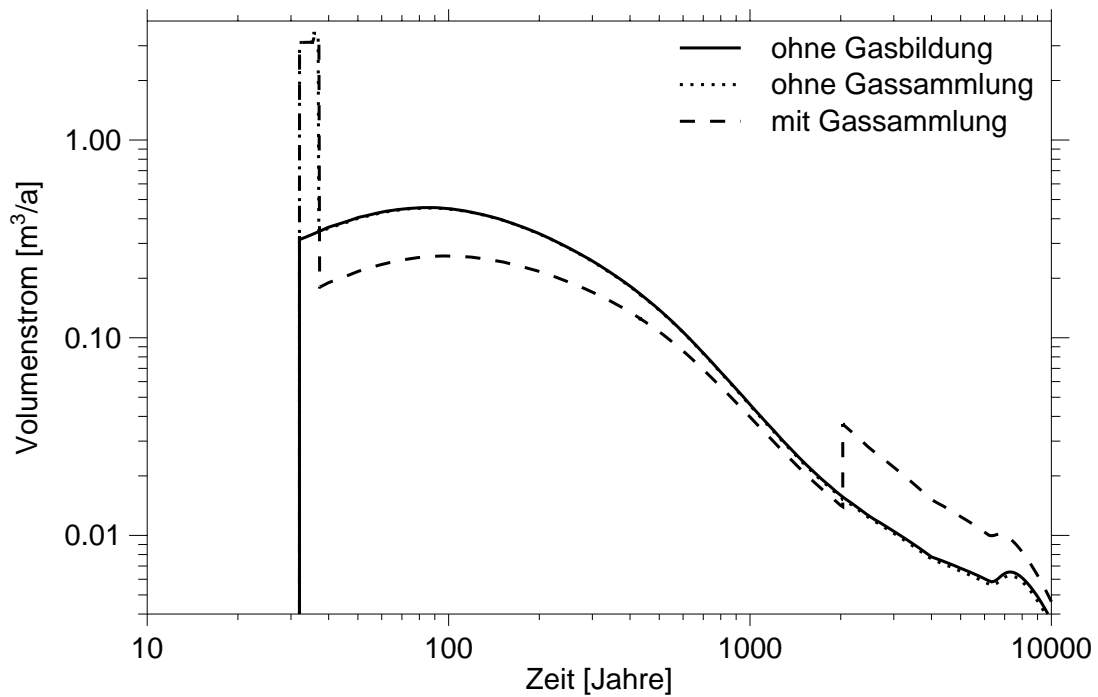


Abb. 5.5: Laugenstrom aus dem Einlagerungsort bei schneller Gasbildung.

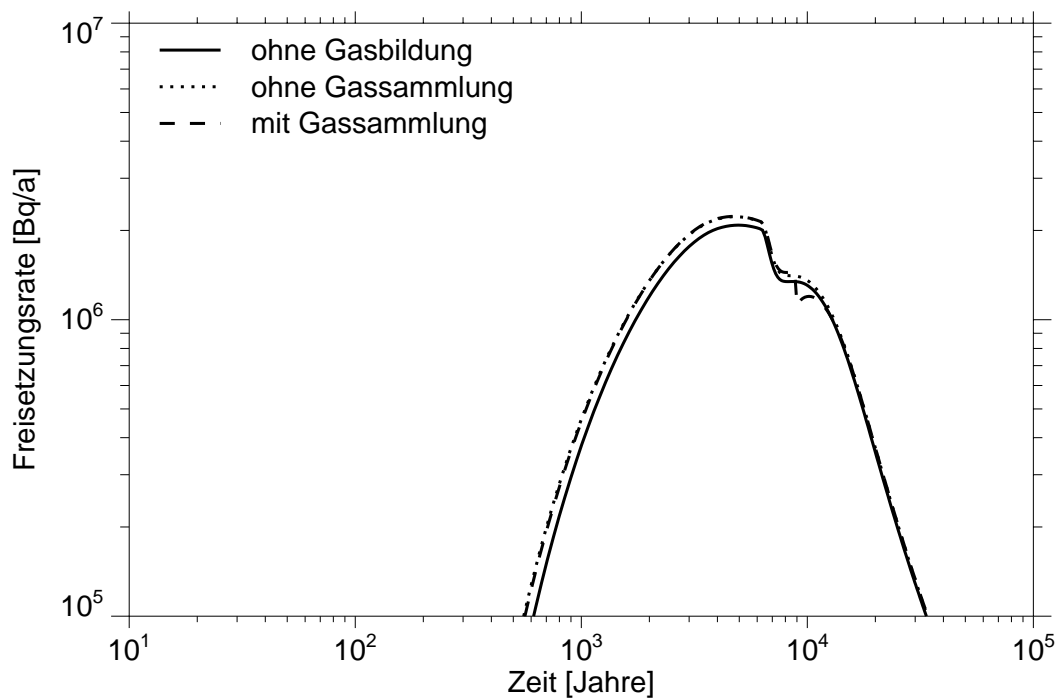


Abb. 5.6: Freisetzung aus dem Grubengebäude bei langsamer Gasbildung.

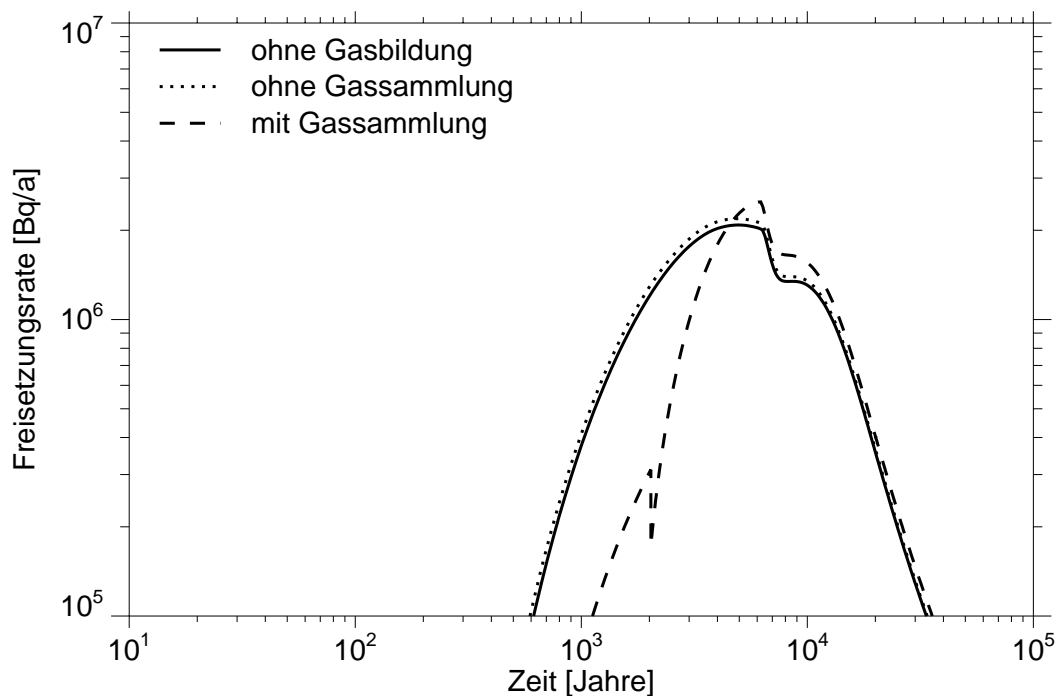


Abb. 5.7: Freisetzung aus dem Grubengebäude bei schneller Gasbildung.

auch Tabelle 5.2). Dabei kommt es nach ca. 7 000 Jahren zu einem Absinken des Radionuklidstroms, weil im Gassammelsegment eine Porosität von 30% erreicht wird, ab welcher in den verwendeten Modellen der Stützdruck des Versatzes gegenüber der Gebirgskonvergenz einsetzt. Dadurch nehmen der konvergenzbedingte Laugenstrom und der Nuklidstrom ab. Nach 9 000 Jahren sinkt der Nuklidstrom im Fall mit Gassammlung nochmals kurzfristig ab, weil der gesamte zur Verfügung stehende Raum mit Gas gefüllt ist und dadurch das zusätzliche Auspressen durch einströmendes Gas entfällt.

Im Fall schneller Gasbildung (Abbildung 5.7) erhält man aufgrund des weniger kontaminierten Laugenstroms zu frühen Zeiten einen deutlich reduzierten Nuklidstrom aus dem Grubengebäude. Zu späten Zeiten, wenn die Behinderung der Gebirgskonvergenz durch den Druckaufbau entfällt, wird der Nuklidstrom aus dem Grubengebäude größer als im Fall ohne Gasbildung. Das Maximum der Strahlenexposition am Ende der Geosphäre ist dann ähnlich hoch wie in dem Fall ohne Laugenverdrängung durch Gasbildung (siehe Tabelle 5.2). Nach 2 000 Jahren nimmt die Freisetzungsrates im Fall mit Gassammlung stark ab und steigt danach wieder an. Dies liegt am Ende der Gasproduktion nach 2 000 Jahren, wodurch der zusätzliche Laugenstrom aufgrund des Auspressens aus dem Gassammelsegment entfällt. Der starke Anstieg danach ist eine Folge der nun im Zentralteil ansteigenden Nuklidkonzentration und des anwachsenden kontaminierten Laugenstroms, da die Konvergenz wegen des wegfallenden Gasdrucks weniger behindert wird.

5.5 Zusammenfassung zum Einfluß der Gasbildung

Die Gasbildung in Einlagerungsorten wurde so modelliert, daß Auswirkungen direkt am Entstehungsort und zusätzlich an einer vorgegebenen Gassammelstelle berücksichtigt werden können. Die durch die Gasbildung verursachte Laugenverdrängung in den Einlagerungsorten führt zu einem früheren Beginn der Nuklidfreisetzung sowie zu einer Erhöhung der Freisetzungsmenge aus dem Grubengebäude und der Dosisbelastungen von einigen Prozenten. Die Maxima der Nuklidströme aus dem Grubengebäude erhöhen sich um etwa einen Faktor 2. Bei Radionukliden mit geringer Halbwertszeit, die in dieser Studie zur Gasbildung nicht untersucht wurden, ist zu erwarten, daß sich die zeitlichen Verschiebungen der Nuklidfreisetzungen stärker auf die Strahlenexpositionen auswirken, wenn die Transportzeiten im Deckgebirge kurz sind.

Die durch Gassammlung im Zentralteil dort verursachte Laugenverdrängung führt ebenfalls zu einer Erhöhung der Freisetzungsmenge und der Dosisbelastungen von einigen Prozenten. Die Auswirkungen des Effekts sind komplex und hängen von der Auslegung des Grubengebäudes und den in der Modellierung verwendeten Parametern ab.

Die Auswirkungen der Gasbildung in einem Endlager sind in hohem Maße endlager-spezifisch, so daß allgemeingültige Aussagen schwer zu treffen sind. In einem Endlager, bei dem die Radionuklide zu frühen Zeiten freigesetzt werden und bei dem der Transport in der Geosphäre nur kurz ist, spielt die Gasbildung eine große Rolle. Dies liegt vor allem daran, daß nach derzeitigen Erkenntnissen der wesentliche Teil der Gasbildung relativ schnell, d. h. innerhalb weniger 1 000 Jahre, abläuft. Dadurch können sich im Vergleich zu einer Analyse ohne Berücksichtigung der Gasbildung die Konsequenzen in der Biosphäre für kurzlebige Radionuklide ändern. Dosiserhöhungen um ein bis 2 Größenordnungen sind denkbar. Bei Endlagern mit lange andauernder Freisetzung und langen Transportzeiten im Deckgebirge ist die Auswirkung der Gasbildung gering, da die anfängliche Erhöhung der Freisetzung durch radioaktiven Zerfall und durch Sorption weitgehend kompensiert wird.

6 Probabilistische Rechnungen

Alle in den vorhergehenden Kapiteln beschriebenen Rechnungen wurden mit festen Werten der Eingangsparameter deterministisch durchgeführt. Da jedoch einige Eingangsdaten mit einer großen Unsicherheit behaftet sind, wurde eine probabilistische Analyse vorgenommen. Dabei sollte vor allem geklärt werden, welchen Einfluß der Zutrittsort für unbegrenzten Laugenzutritt auf die Radionuklidfreisetzung hat, da dieser Parameter in allen bisherigen probabilistischen Rechnungen nicht berücksichtigt wurde. Die Relevanz der anderen unsicheren Parameter, wie Zeitpunkt des Laugenzutritts oder Volumina der zutretenden begrenzten Laugengmengen wurden beispielsweise bereits in den Analysen [10] und [5] untersucht. Das vorliegende Kapitel lehnt sich in der Darstellung an diese Analysen an.

Die durch die Unsicherheit in den Einlagerungsparametern verursachte Bandbreite der berechneten radiologischen Konsequenzen wird mit einer Monte-Carlo-Simulation des Endlagersystems berechnet. Die unsicheren Eingangsparameter werden als Zufallsvariablen behandelt. Es werden Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen definiert, welche die vorhandenen Informationen über die möglichen Parameterwerte wiedergeben. Das System wird für jede Stichprobe von Eingangsdaten ausgewertet – im folgenden Spiel genannt –, so daß man für jeden Zeitpunkt eine empirische Verteilung der Konsequenzen erhält. Diese Verteilungen werden in einer Unsicherheitsanalyse und einer globalen Sensitivitätsanalyse ausgewertet.

6.1 Eingangsdaten für die probabilistischen Rechnungen

Die probabilistische Rechnung wird für das im Kapitel 2 vorgestellte und in Kapitel 4 deterministisch untersuchte Grubengebäude vorgenommen. Die meisten Eingangsparameter, die bei der probabilistischen Rechnung als unabhängige und abhängige Variablen berücksichtigt wurden, sind mit ihrer unteren und oberen Grenze und der Angabe der verwendeten Verteilungsfunktion bereits in Kapitel 2 zusammengestellt worden.

In mehreren vorliegenden Sicherheitsanalysen, siehe beispielsweise [5], wurde die Schnittstelle zwischen Grubengebäude und Deckgebirge im Bereich des Zentralteils

festgelegt. Eine Variation dieses Zutrittsortes war nicht möglich. Das neue Nahbereichsmodul LOPOS erlaubt jedoch die statistische Behandlung dieses Zutrittsortes. Die in Betracht kommenden Lokationen sind in Kapitel 3 aufgezeigt und in Kapitel 4 deterministisch ausgewertet worden. Dort zeigte sich, daß die Lage des Zutrittsortes einen signifikanten Einfluß auf die Strahlenexposition in der Biosphäre hat.

Die Zutrittsorte werden als unabhängige Zufallsvariablen definiert und fortlaufend durchnumeriert. Die Nummern werden aus einer Gleichverteilung über die Anzahl der Zutrittsorte gezogen.

In den probabilistischen Rechnungen sind für das Grubengebäude und das Deckgebirge insgesamt 57 Zufallsvariablen ausgewählt worden, davon 35 für das Grubengebäude. Von diesen 57 Zufallsvariablen wurden 17 Variablen unabhängig variiert, davon 14 für das Grubengebäude. Die restlichen Variablen sind von den unabhängigen Variablen abhängig, wobei die funktionalen Abhängigkeiten in Kapitel 2 angegeben sind. Die Werte für die 17 unabhängigen Variablen werden aus der jeweiligen Grundgesamtheit zufällig gezogen.

Für den Transport in der Geosphäre sind analog zu den deterministischen Rechnungen insgesamt 25 Radionuklide ausgewählt worden, davon 8 Spaltprodukte und 17 Radionuklide aus Zerfallsketten:

- C-14, Ni- 59, Se- 79, Zr- 93, Nb-94, Tc- 99, J-129, Cs-135
- Cm-246, Pu-242, U-238, U-234, Th-230, Ra-226,
Np-237, U-233, Th-229,
Pu-240, U-236, Th-232, U-232
Am-243, Pu-239, U-235, Pa-231

Die radiologischen Konsequenzen werden wie bei den deterministischen Rechnungen für das kombinierte Szenario eines Laugenzutritts über den Hauptanhydrit und über begrenzte Laugeneinschlüsse berechnet. Außerdem wird der gleiche Rechencode wie bei den deterministischen Rechnungen eingesetzt. Eine Szenariendauer von 1 Million Jahren wird für alle Rechnungen angesetzt, da das Maximum der Strahlenexposition in allen Spielen innerhalb dieses Zeitraums erreicht wird. Die berechneten Strahlenexpositionen

werden für alle ausgewählten Radionuklide und für jedes Spiel mit einer Freisetzung an 280 festgelegten Zeitpunkten in einer Datei abgelegt. Mit einem Postprozessor werden mit Hilfe dieser Datei die Unsicherheits- und die Sensitivitätsanalyse durchgeführt.

6.2 Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulation

Insgesamt wurden in der Monte-Carlo-Simulation 1 000 Spiele gerechnet, bei einer Gesamtlaufzeit von 17 Tagen. Die durchschnittliche Rechenzeit für ein Spiel lag bei 25 Minuten auf einer SUN Enterprise 4000, so daß pro Tag etwa 60 Spiele durchgerechnet werden konnten. Einige Spiele wiesen extrem lange Laufzeiten von bis zu 5,5 Stunden auf. Ursache dieser langen Rechenzeiten waren eine feine Zeitdiskretisierung der Freisetzungsberechnung für das Grubengebäude sowie eine feine Zeit- und Ortsdiskretisierung der Transportrechnungen für das Deckgebirge.

Die Tabelle 6.1 gibt eine Ergebnisübersicht der Monte-Carlo-Simulation. Etwa bei jedem dritten Spiel werden Radionuklide aus dem Grubengebäude freigesetzt. Die übrigen Spiele führen zu keiner Strahlenbelastung in der Biosphäre.

Tabelle 6.1: Übersicht der Monte-Carlo-Simulation.

Anzahl der Spiele		Maximum der Strahlenexposition [Sv/a]	
insgesamt	mit Freisetzung	Spannweite	Grenzwert des §45 StrlSchV
1 000	352	$1,8 \cdot 10^{-11} - 9,7 \cdot 10^{-5}$	$3,0 \cdot 10^{-4}$

Die geringe Zahl von Spielen mit einer Strahlenexposition ist eine Folge des komplexen Zusammenspiels von Laugenzutritt in das Grubengebäude und Auspressen kontaminierter Lauge aus dem Grubengebäude. Zunächst verzögern die zahlreichen Barrieren im Grubengebäude den Laugenzutritt und behindern dann den möglichen Transport von Radionukliden. Zusätzlich wirkt die Gebirgskonvergenz, die die verbleibenden Hohlräume im Versatz und in den kompaktierbaren Verschlüssen reduziert, bis eine so geringe Porosität erreicht wird, daß kein Laugentransport mehr möglich ist. In 648 Spielen ist die

zufällige Kombination der Eingangsparameter derart, daß das Grubengebäude an einer entscheidenden Stelle durch die Konvergenz verschlossen ist, bevor kontaminierte Lauge ausgepreßt werden kann.

Die maximalen Strahlenexpositionen variieren über mehrere Größenordnungen. In keinem Spiel wird der Grenzwert der Strahlenschutzverordnung [1] überschritten. Die Maxima der Strahlenexpositionen werden in allen Spielen innerhalb des Zeitintervalls von 1 Million Jahre erreicht, so daß es gerechtfertigt ist, die Spiele generell an diesem Zeitpunkt zu beenden.

Die folgende detaillierte Ergebnisdarstellung gliedert sich in die Untersuchung von charakteristischen Ergebnissen einzelner Spiele, die Unsicherheitsanalyse der maximalen Strahlenexposition und schließlich die Sensitivitätsanalyse bezüglich der Eingangsparameter.

6.2.1 Ergebnisse einzelner Spiele der Monte-Carlo-Simulation

Die Tabelle 6.2 zeigt eine Übersicht der 15 Spiele mit den höchsten Werten der jährlichen Strahlenexposition. Die Reihenfolge ergibt sich aus der abnehmenden maximalen Strahlenexposition. Die Zeitpunkte, an denen die maximalen Strahlenexpositionen auftreten, werden bei der Reihenfolge nicht berücksichtigt. Für jedes Spiel sind die drei Radionuklide mit ihren Dosiswerten angegeben, die zum Zeitpunkt des Maximums der Summendosis am wichtigsten sind.

Die Tabelle 6.3 zeigt nach dem gleichen Ordnungsprinzip wie in der Tabelle 6.2, welche drei Radionuklide bei einem Spiel über die gesamte Dauer von 1 Million Jahre an den meisten der 280 ausgewählten Zeitpunkte am wichtigsten sind. Dabei wird jeweils die relative Häufigkeit angegeben. So ist z.B. im Spiel 665, mit der höchsten Strahlenexposition aller Spiele, Ra-226 in 47,4% aller Zeitpunkte das wichtigste Radionuklid, J-129 in 18,4% das zweitwichtigste und Np-237 mit 14,3% das drittwichtigste Radionuklid. Ein Vergleich der beiden Tabellen 6.2 und 6.3 zeigt, daß nur in einigen Fällen das zum Zeitpunkt des Maximums der Strahlenexposition wichtigste Radionuklid auch das wichtigste über den gesamten Zeitbereich des Dosisverlaufs ist.

Tabelle 6.2: Überblick der Simulationsergebnisse mit nuklidspezifischen Informationen zum Zeitpunkt T_{max} , an dem das Maximum der Strahlenexposition auftritt.

Nummer des Spiels	Summendosis		Wichtigste Nuklide zum Zeitpunkt T_{max}					
	Maximum [Sv/a]	T_{max} [a]	Name	Dosis [Sv/a]	Name	Dosis [Sv/a]	Name	Dosis [Sv/a]
665	$9,7 \cdot 10^{-05}$	$1,5 \cdot 10^{+04}$	C- 14	$9,4 \cdot 10^{-05}$	Tc- 99	$1,3 \cdot 10^{-06}$	J-129	$1,2 \cdot 10^{-06}$
41	$8,4 \cdot 10^{-05}$	$2,7 \cdot 10^{+04}$	Np-237	$8,0 \cdot 10^{-05}$	Ra-225	$1,2 \cdot 10^{-06}$	C- 14	$9,4 \cdot 10^{-07}$
288	$5,7 \cdot 10^{-05}$	$1,6 \cdot 10^{+04}$	Np-237	$5,6 \cdot 10^{-05}$	Ni- 59	$2,0 \cdot 10^{-07}$	Ra-225	$1,1 \cdot 10^{-07}$
15	$5,6 \cdot 10^{-05}$	$7,0 \cdot 10^{+04}$	Np-237	$5,4 \cdot 10^{-05}$	Ra-225	$1,6 \cdot 10^{-06}$	U-233	$2,4 \cdot 10^{-07}$
851	$5,5 \cdot 10^{-05}$	$5,8 \cdot 10^{+04}$	Np-237	$4,9 \cdot 10^{-05}$	Ra-226	$2,9 \cdot 10^{-06}$	Ra-225	$1,7 \cdot 10^{-06}$
416	$4,8 \cdot 10^{-05}$	$5,3 \cdot 10^{+04}$	Np-237	$4,3 \cdot 10^{-05}$	Ra-225	$2,1 \cdot 10^{-06}$	J-129	$9,3 \cdot 10^{-07}$
988	$4,7 \cdot 10^{-05}$	$1,8 \cdot 10^{+05}$	Np-237	$3,9 \cdot 10^{-05}$	Ra-225	$3,7 \cdot 10^{-06}$	Ra-226	$2,8 \cdot 10^{-06}$
535	$4,3 \cdot 10^{-05}$	$2,4 \cdot 10^{+04}$	Np-237	$4,0 \cdot 10^{-05}$	C- 14	$6,3 \cdot 10^{-07}$	Ra-225	$4,5 \cdot 10^{-07}$
362	$3,1 \cdot 10^{-05}$	$2,1 \cdot 10^{+05}$	Np-237	$2,9 \cdot 10^{-05}$	Ra-225	$1,6 \cdot 10^{-06}$	Ra-226	$2,1 \cdot 10^{-07}$
331	$2,9 \cdot 10^{-05}$	$3,7 \cdot 10^{+03}$	J-129	$2,6 \cdot 10^{-05}$	Cs-135	$2,8 \cdot 10^{-06}$	Se- 79	$1,3 \cdot 10^{-07}$
575	$2,4 \cdot 10^{-05}$	$9,6 \cdot 10^{+03}$	C- 14	$2,4 \cdot 10^{-05}$	Ra-226	$1,0 \cdot 10^{-07}$	U-236	$2,3 \cdot 10^{-08}$
359	$2,3 \cdot 10^{-05}$	$3,1 \cdot 10^{+03}$	J-129	$1,7 \cdot 10^{-05}$	Cs-135	$3,4 \cdot 10^{-06}$	Tc- 99	$2,3 \cdot 10^{-06}$
417	$2,3 \cdot 10^{-05}$	$1,2 \cdot 10^{+04}$	C- 14	$2,3 \cdot 10^{-05}$	Ra-225	$1,1 \cdot 10^{-08}$	Ra-226	$7,5 \cdot 10^{-09}$
241	$2,3 \cdot 10^{-05}$	$4,1 \cdot 10^{+04}$	Np-237	$2,2 \cdot 10^{-05}$	Ra-225	$3,2 \cdot 10^{-07}$	Ni- 59	$2,1 \cdot 10^{-07}$
33	$2,3 \cdot 10^{-05}$	$1,1 \cdot 10^{+05}$	Np-237	$1,9 \cdot 10^{-05}$	Ra-225	$1,7 \cdot 10^{-06}$	Ra-226	$1,1 \cdot 10^{-06}$

Tabelle 6.3: Überblick der Simulationsergebnisse mit nuklidspezifischen Informationen über die gesamte Szenariendauer von 1 Million Jahre.

Nummer des Spiels	Summendosis		Wichtigste Nuklide an den meisten Zeitpunkten					
	Maximum [Sv/a]	T_{max} [a]	Name	Anteil [%]	Name	Anteil [%]	Name	Anteil [%]
665	$9,7 \cdot 10^{-05}$	$1,5 \cdot 10^{+04}$	Ra-226	47,4	J-129	18,4	Np-237	14,3
41	$8,4 \cdot 10^{-05}$	$2,7 \cdot 10^{+04}$	Np-237	63,9	J-129	31,6	C- 14	3,4
288	$5,7 \cdot 10^{-05}$	$1,6 \cdot 10^{+04}$	Ra-226	57,5	C- 14	9,6	U-233	8,8
15	$5,6 \cdot 10^{-05}$	$7,0 \cdot 10^{+04}$	Ra-226	34,1	J-129	27,1	Np-237	16,1
851	$5,5 \cdot 10^{-05}$	$5,8 \cdot 10^{+04}$	Np-237	47,0	J-129	20,8	Ra-226	17,0
416	$4,8 \cdot 10^{-05}$	$5,3 \cdot 10^{+04}$	Np-237	59,3	J-129	39,2	Se- 79	1,5
988	$4,7 \cdot 10^{-05}$	$1,8 \cdot 10^{+05}$	Np-237	26,6	Ra-226	25,8	J-129	15,5
535	$4,3 \cdot 10^{-05}$	$2,4 \cdot 10^{+04}$	J-129	48,9	Np-237	47,7	C- 14	3,0
362	$3,1 \cdot 10^{-05}$	$2,1 \cdot 10^{+05}$	J-129	34,4	Ra-225	30,0	Np-237	21,1
331	$2,9 \cdot 10^{-05}$	$3,7 \cdot 10^{+03}$	Ra-226	42,9	Tc- 99	16,5	Ra-225	10,9
575	$2,4 \cdot 10^{-05}$	$9,6 \cdot 10^{+03}$	Ra-226	75,5	C- 14	7,7	J-129	7,7
359	$2,3 \cdot 10^{-05}$	$3,1 \cdot 10^{+03}$	Ra-226	59,3	C- 14	16,4	J-129	9,7
417	$2,3 \cdot 10^{-05}$	$1,2 \cdot 10^{+04}$	Ra-226	57,5	J-129	22,6	C- 14	12,8
241	$2,3 \cdot 10^{-05}$	$4,1 \cdot 10^{+04}$	Ra-226	49,4	J-129	19,0	Np-237	10,6
33	$2,3 \cdot 10^{-05}$	$1,1 \cdot 10^{+05}$	Ra-226	40,5	J-129	22,6	Ra-225	17,1

Die zeitliche Entwicklung der Strahlenexposition in Spiel 665, dem Spiel mit der höchsten Summendosis, ist in Abbildung 6.1 dargestellt. Sie zeigt das typische Muster vieler anderer Rechenläufe. Die Einzelnuklide, die die wichtigsten Beiträge zur Summendosis leisten, sind mit eingezeichnet. Das mit einem vorangestellten “+” gekennzeichnete Radionuklid zeigt den summarischen Beitrag von U-234 und seiner Tochternuklide. Anhand der Abbildung lassen sich die Angaben aus den Tabellen 6.2 und 6.3 für dieses Spiel nachvollziehen.

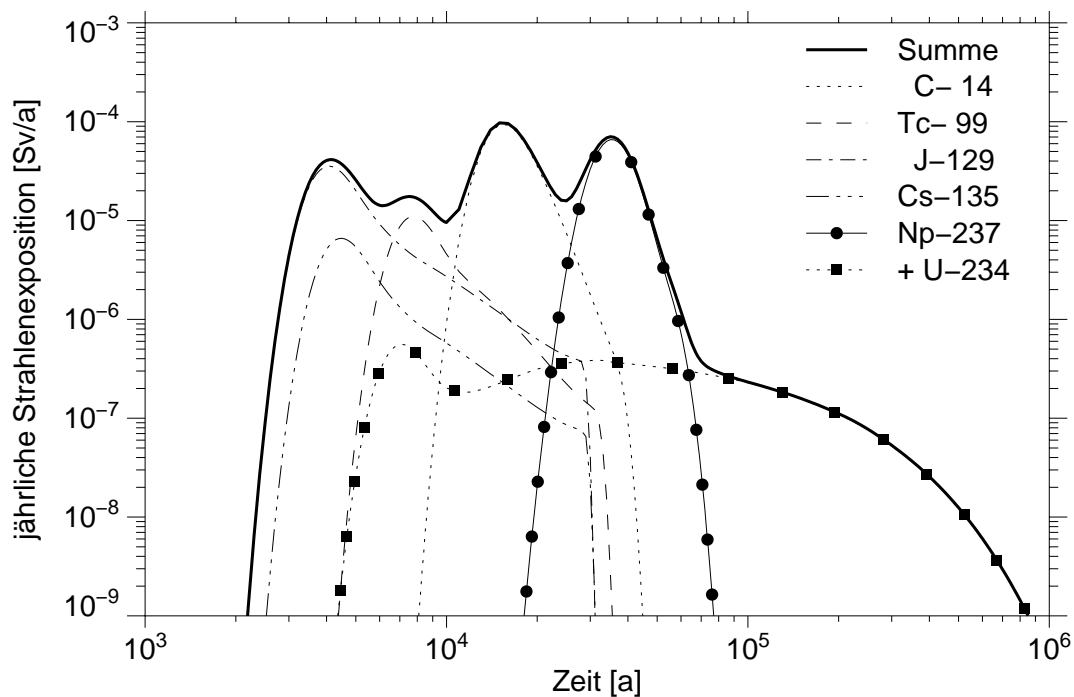


Abb. 6.1: Zeitliche Entwicklung der Strahlenexposition für das Spiel 665.

Die Summendosis wird zu Beginn von den Spaltprodukten verursacht und zu großen Zeiten nur noch von den Aktiniden dominiert. Als konkurrierende Radionuklide um das Maximum der Strahlenexposition sind deutlich C-14, J-129 und Np-237 zu erkennen. Der Dosisverlauf von + U-234, als Summe über die Radionuklide U-234 und seine Töchter, zeigt zunächst ein Maximum, das durch U-234 selbst verursacht wird, danach ein relatives Minimum und schließlich einen Verlauf, der nach 100 000 Jahren von Ra-226 bestimmt wird.

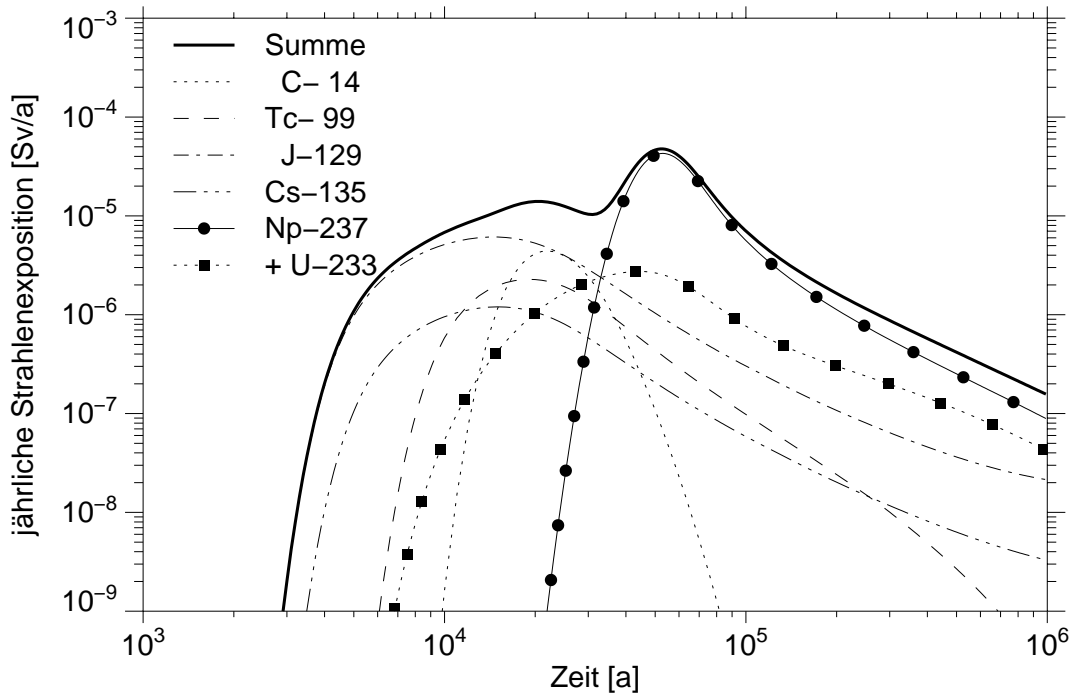


Abb. 6.2: Zeitliche Entwicklung der Strahlenexposition für das Spiel 416.

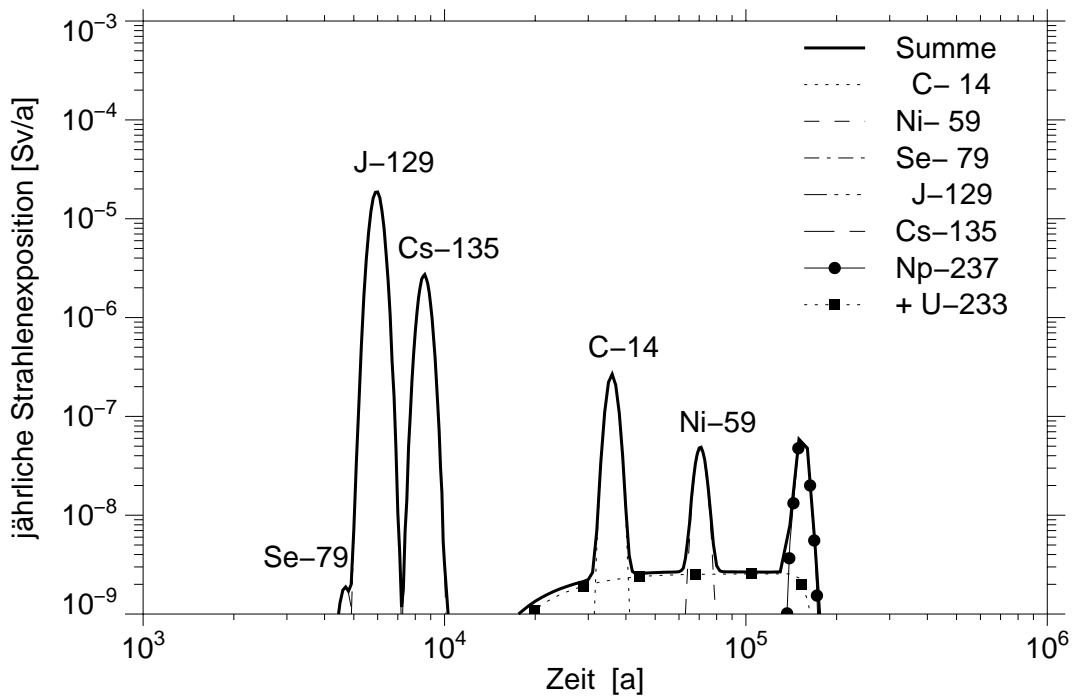


Abb. 6.3: Zeitliche Entwicklung der Strahlenexposition für das Spiel 564.

Die Abbildungen 6.2 und 6.3 zeigen zwei seltenere Strukturen in den Dosisverläufen. Sie sind Ergebnisse der Spiele 416 (6. Rang) und 564 (18. Rang). Der breitere Verlauf und die weniger ausgeprägten Peaks der Summendosis in Spiel 416 deuten auf eine länger anhaltende Freisetzungsdauer aus dem Grubengebäude hin. Das Gegenteil zeigt das Spiel 564, in dem ausgeprägte Peaks auf eine kurze Freisetzungsdauer hinweisen. In diesem letzten Fall sind die unterschiedlichen Laufzeiten der Radionuklide durch das Deckgebirge sehr gut zu beobachten.

6.2.2 Unsicherheitsanalyse

Ein wichtiges Kriterium zur Beurteilung der Langzeitsicherheit eines Endlagers ist der Nachweis, daß die berechneten Strahlenexpositionen die Grenzwerte der Strahlenschutzverordnung nicht überschreiten [1]. Aufgrund der Unsicherheiten in den Eingangsdaten wird die maximale Strahlenexposition nicht in Form einer Zahl, sondern in Form einer Häufigkeitsverteilung angegeben. Die folgende Auswertung berücksichtigt nur die 352 Spiele mit Freisetzung.

Für jedes Spiel mit einer Freisetzung ergibt sich als Ergebnis ein Zeitverlauf der Summendosis, aus dem man insbesondere die maximale Summendosis als charakteristische Größe entnimmt. Man erhält auf diese Weise eine Stichprobe der maximalen Summendosen. Die relative Häufigkeit der Stichprobenwerte (Häufigkeitsdichte) kann als Histogramm dargestellt werden. Dabei wird eine Klassenbildung der Stichprobe vorgenommen. Die zu einer Klasse gehörige absolute Häufigkeit der Stichprobenwerte, d. h. die Anzahl der Stichprobenwerte in der Klasse, dividiert durch die Anzahl der Spiele mit einer Freisetzung ergibt die relative Klassenhäufigkeit. Die Klasseneinteilung erfolgt durch 4 Intervalle pro Dekade über den Wertebereich der maximalen Summendosis (siehe Tabelle 6.1). Die Abbildung 6.4 zeigt das Ergebnis dieser Auswertung. Die maximale Summendosis streut über mehrere Größenordnungen, wobei eine deutliche Konzentration im Bereich $[5,5 \cdot 10^{-7} \text{ Sv/a}, 1,0 \cdot 10^{-5} \text{ Sv/a}]$ zu beobachten ist.

Die statistische Auswertung der Stichprobe der maximalen Summendosis liefert einen Mittelwert von $4,7 \cdot 10^{-6} \text{ Sv/a}$ und liegt damit etwa 2 Größenordnung unter dem Grenzwert der Strahlenschutzverordnung. Der Mittelwert der Stichprobe ist ein Schätzwert der

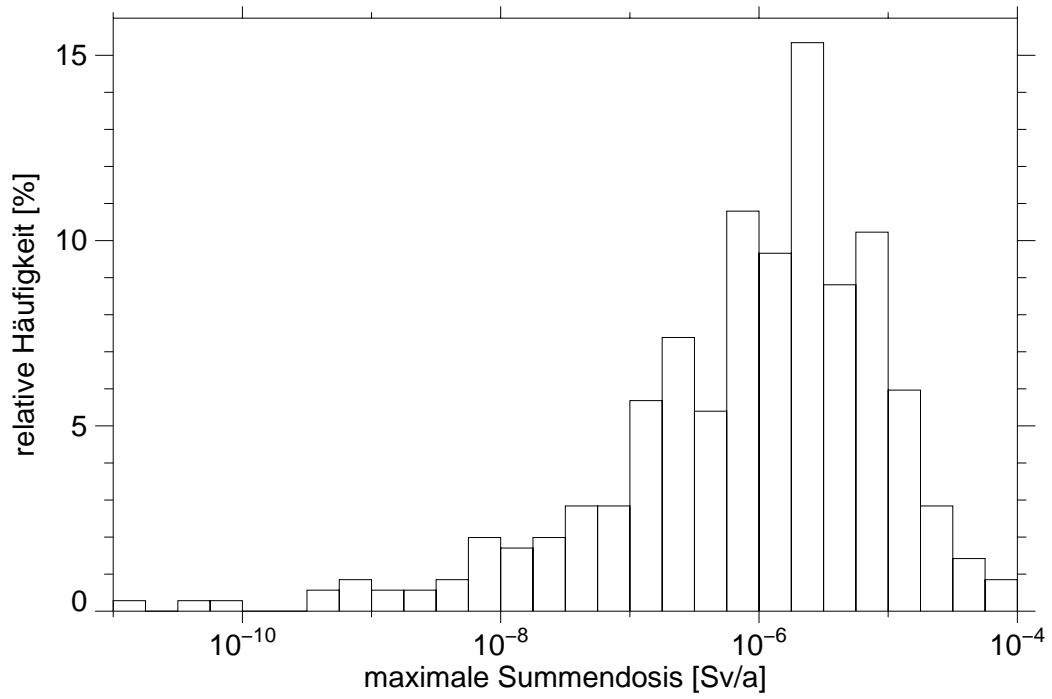


Abb. 6.4: Histogramm der maximalen Summendosis.

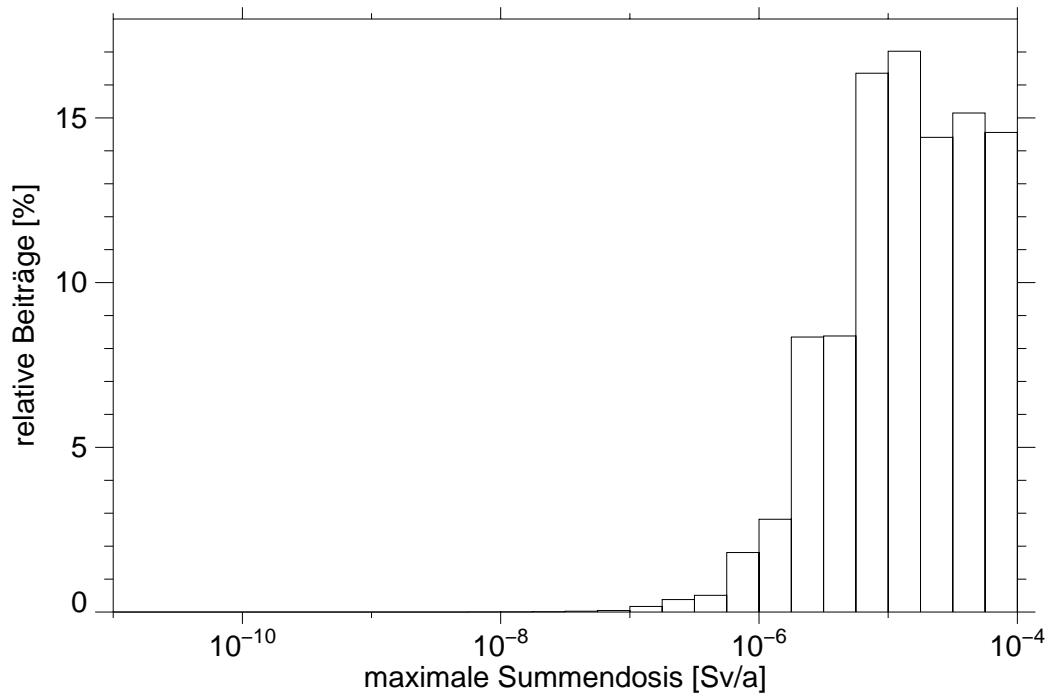


Abb. 6.5: Relative Beiträge der Klassen zum Mittelwert der maximalen Summendosis.

tatsächlich zu erwartenden maximalen Summendosis. Die Güte der Schätzung des Mittelwertes wird durch ein Vertrauensintervall angegeben. Das Vertrauensintervall wird durch die Konfidenzzahl 0,95 festgelegt. Es besteht eine 95%-ige Sicherheit, daß der tatsächlich zu erwartende Mittelwert in dem Vertrauensintervall $[3,2 \cdot 10^{-6} \text{ Sv/a}, 6,1 \cdot 10^{-6} \text{ Sv/a}]$ liegt. Das 95%-Quantil der Häufigkeitsverteilung der maximalen Summendosis liegt bei $7,6 \cdot 10^{-6} \text{ Sv/a}$. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6.4 dargestellt.

Tabelle 6.4: Statistische Kenngrößen, die den Einfluß der Datenunsicherheit auf die maximale Summendosis verdeutlichen.

Parameter	maximale Summendosis
Mittelwert	$4,7 \cdot 10^{-6} \text{ Sv/a}$
Standardabweichung	$1,0 \cdot 10^{-5} \text{ Sv/a}$
obere Konfidenzgrenze	$6,1 \cdot 10^{-6} \text{ Sv/a}$
unter Konfidenzgrenze	$3,2 \cdot 10^{-6} \text{ Sv/a}$
95% Quantil	$7,6 \cdot 10^{-6} \text{ Sv/a}$
Maximalwert	$9,7 \cdot 10^{-5} \text{ Sv/a}$

Die statistische Güte der Mittelwertschätzung kann prinzipiell durch Erhöhung der Anzahl der Spiele gesteigert werden. Die Vorgehensweise stößt jedoch in Anbetracht der Rechenzeiten an praktische Grenzen. Mit den durchgeführten 1 000 Spielen mit 352 Freisetzungen erhält man entsprechend den Angaben in Tabelle 6.4 bereits eine geringe Breite des Vertrauensintervalls für die Schätzung der maximalen Summendosis.

Ein weiteres Kriterium ist die Stabilität der Mittelwertberechnung selbst. Letztere wird durch die relativen Beiträge zum Mittelwert aus den einzelnen Dosisklassen belegt. Aus Abbildung 6.5 kann man entnehmen, daß die Dosisklasse mit den höchsten Dosen zu 14,5% zum Mittelwert beiträgt. Diese Dosisklasse hat nach Abbildung 6.4 eine relative Häufigkeit von 0,9%, das einer Anzahl von 3 Spielen entspricht. Der maximale relative Beitrag eines einzelnen Spiels zur Mittelwertbildung liegt somit bei 5%, so daß bei Durchführung weiterer Simulationen keine erhebliche Veränderung der Mittelwertschätzung zu erwarten ist.

Die Abbildung 6.6 zeigt die Häufigkeitsverteilung mit Konfidenzgrenzen für die maximale Summendosis. Die Konfidenzgrenzen geben den 95%-Vertrauensbereich an, in dem die Häufigkeitsverteilung liegen wird. Die Häufigkeitsverteilung ist hier bezogen auf die Gesamtzahl aller Spiele.

Neben der statistischen Auswertung der maximalen Summendosis können auch die Stichproben der Summendosen für jeden der 280 ausgewählten Zeitpunkte zwischen 100 und 1 Million Jahren nach Ende der Betriebsphase in entsprechender Weise analysiert werden. Die so erhaltenen Zeitverläufe der berechneten statistischen Kenngrößen vermitteln einen weiteren Eindruck von der unter der vorhandenen Datenunsicherheit zu erwartenden Strahlenexposition. Abbildung 6.7 zeigt den Zeitverlauf der statistischen Kenngrößen. Es ist die mittlere Summendosis zusammen mit den unteren und oberen Grenzen des Vertrauensintervalls zu einer Konfidenzzahl 0,95 dargestellt. Zusätzlich sind die Zeitverläufe der maximalen Summendosis und des 95%-Quantils angegeben.

Der Mittelwert der jährlichen Strahlenexposition liegt ab 10 000 Jahren im Bereich von $3 \cdot 10^{-7}$ Sv/a mit leicht fallender Tendenz. Das Vertrauensintervall ist über den gesamten Zeitbereich nach oben hin eng begrenzt. Die Breite des Vertrauensintervalls zwischen oben und unten beträgt über weite Bereich lediglich etwa eine Größenordnung. Nach unten läßt das Vertrauensintervall niedrigere Mittelwertschätzungen bis hin zu gar keiner Strahlenexposition zu.

Die Kurvenform der maximalen Summendosis ist stückweise zusammengesetzt aus Spielen, die über eine gewisse Zeit zur höchsten Strahlenexposition führen. Die Werte des 95%-Quantils liegen nach 3 000 Jahren stets oberhalb der oberen Grenze des Vertrauensintervalls für die Mittelwertschätzung. Damit ist der Mittelwert statistisch stabil vom 95%-Quantil getrennt und einzelne Spiele beeinflussen den Mittelwert nicht mehr merklich.

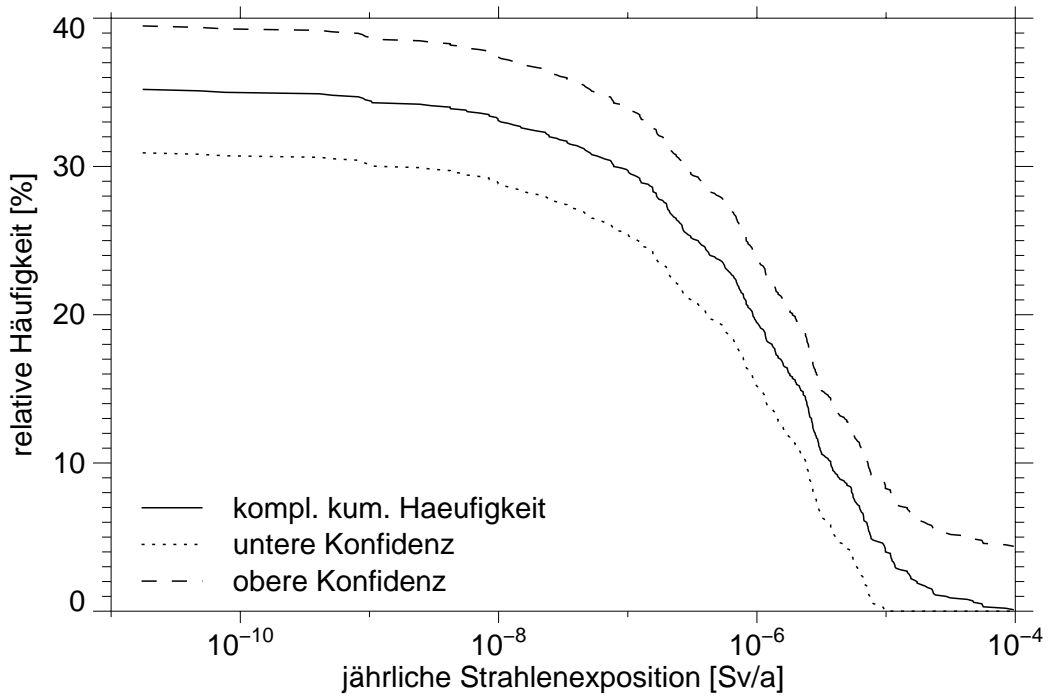


Abb. 6.6: Häufigkeitsverteilung der maximalen Summendosis mit Konfidenzintervall.

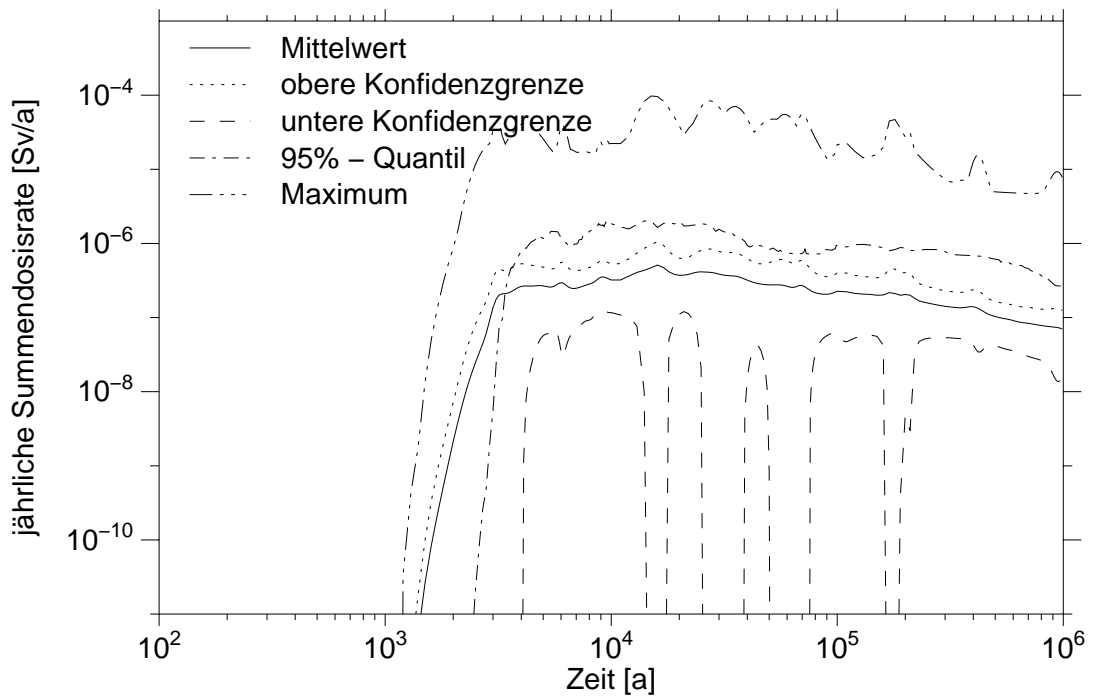


Abb. 6.7: Zeitlicher Verlauf der statistischen Kenngrößen der Summendosis.

6.2.3 Sensitivitätsanalyse

Die Sensitivitätsanalyse beantwortet die Frage, inwieweit die verschiedenen Eingangsparameter zur Unsicherheit der erzielten Ergebnisse beitragen. Dazu wird die Rangfolge der Eingangsparameter bezüglich ihrer Bedeutung auf einen Ausgangsparameter ermittelt.

Die Eingangsparameter sind die unabhängig variierten Parameter, wie beispielsweise die Referenzkonvergenzrate. Der Ausgangsparameter ist zum einen das Maximum der Summendosis unabhängig vom Zeitpunkt seines Auftretens (in den Tabellen als T_{max} bezeichnet) und zum anderen die Summendosis an ausgewählten Zeitpunkten. Als Ergebnisstichproben werden die Summendosen zu den fünf Zeitpunkten 10 000, 20 000, 50 000, 100 000 und 200 000 Jahre nach Ende der Betriebsphase (T_1 bis T_5) ausgewählt.

Um den Grad des Einflusses der Eingangsparameter auf die ermittelten Schadstoffbelastungen zu bestimmen, kommen vier statistische Methoden zum Einsatz. Diese Methoden sind:

- der Spearman-Rang-Korrelationskoeffizient,
- die partielle Rangkorrelation,
- die standardisierte Rangregression,
- der Smirnov-Test.

Für die partielle Rangkorrelation und die standardisierte Rangregression kann durch einen "Modellkoeffizient der Bestimmtheit" die Güte der Auswertungsmethode angegeben werden. Ein Wert von 1 bedeutet, daß die Auswertungsmethode optimal geeignet ist. Typische Werte liegen zwischen 0,4 und 0,7. Je geringer der Wert dieses Koeffizienten ist, desto größere Vorsicht ist bezüglich des Tests angebracht, da der Zusammenhang zwischen Eingangsgröße (= Eingangsparameter) und Ausgangsgröße (= jährliche Strahlenexposition) dann hochgradig nichtlinear ist und die Tests entsprechend ungeeignet sind. Bei beiden Auswertungsmethoden liegen die Gütewerte sowohl für das Maximum der Summendosis als auch für die Summendosen zu den ausgewählten Zeitpunkten bei etwa 0,39. Die Rangfolge und damit die Bedeutung der Eingangsparameter sinkt für

beide Methoden mit abnehmendem Betrag des Rangkorrelationskoeffizienten bzw. des Rangregressionskoeffizienten.

Auch für die Rangfolge der Eingangsparameter nach dem Spearman-Test wird der Rangkorrelationskoeffizient herangezogen. D. h. der einflußreichste Eingangsparameter hat den betragsmäßig höchsten Rangkorrelationskoeffizienten und erhält den Rang 1. Zusätzlich wird ein Hypothesentest durchgeführt, der den Grad des Vertrauens in die Identifizierung eines einflußreichen Eingangsparameters testet. Als Signifikanzzahl wird 5% genommen.

Beim Smirnov-Test ergibt sich die Rangfolge der Eingangsparameter entsprechend dem vertikalen Abstand zweier empirischer Verteilungsfunktionen, die aus den Teilmengen von 10% und 90% der gesamten Stichprobenwerte bestehen. Der Eingangsparameter mit der größten vertikalen Abweichung wird als der einflußreichste mit dem Rang 1 ermittelt. Zusätzlich wird ein Hypothesentest durchgeführt, der den Grad des Vertrauens in die Identifizierung eines einflußreichen Eingangsparameters testet. Als Signifikanzzahl wird 5% genommen.

Eine Aussage, welche statistische Methode die größte Aussagekraft bezüglich der Identifizierung wichtiger Eingangsparameter hat, ist nicht möglich. Dazu bedarf es tiefergehender Untersuchungen an den statistischen Methoden selbst als auch weiterer Simulationen mit größerem und geändertem Stichprobenumfang. Deshalb wurde hier auch, ohne eine Wertung vorzunehmen, nur die Quersumme über die Rangzahlen für die Sortierung der Eingangsparameter verwendet.

Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse nach den oben genannten vier statistischen Methoden sind in Tabelle 6.5 zusammengestellt. Jede Zelle enthält Informationen über die Bedeutung des Parameters entsprechend der angegebenen statistischen Methode. Die sechs Zahlen in einer Zelle stehen für die Bedeutung zu den oben genannten Zeitpunkten. Für den Spearman- und den Smirnov-Test sind die Ränge fett gedruckt, wenn sie die Signifikanzzahl 5% einhalten.

Die Rangfolge ist nur für das Volumen des begrenzten Laugeneinschlusses bei allen Schätzern eindeutig. Diese Bedeutung wurde schon bei den lokalen Parametervariationen in Kapitel 4 erkannt. Die aus den Einschlüssen stammende Lauge ist ein wesentlicher Parameter, der zum Offenhalten von Einlagerungsorten und Verbindungsstrecken führen kann. Je größer das Volumen der Laugeneinschlüsse ist, umso weiter gelangt die Lauge in Richtung zum Ein-/Austrittssegment. Eine weitere wichtige Auswirkung ist die Stützwirkung der Lauge in gefluteten Bereichen und die Konsequenzen für die Konvergenz der Hohlräume im Grubengebäude.

Auch wenn die Lauge aus den Laugeneinschlüssen weit in die Hohlräume der Auffahrungen des Grubengebäudes eindringt, muß erst eine Verbindung zur Schnittstelle mit dem Deckgebirge vorhanden sein, damit eine Strahlenbelastung auftritt. Als weitere wichtige Einflußgrößen sind daher der Zeitpunkt für das Entstehen einer Verbindung zum Deckgebirge (Platz 2) und der Ort der Verbindung (Platz 7) identifiziert worden.

In engem Zusammenhang stehen die an Platz 3, 5 und 6 positionierten Parameter. Sie haben einen direkten Einfluß auf das Konvergenzverhalten der verfüllten Strecken im Grubengebäude, auch wenn sie noch nicht geflutet sind. Die Bedeutung dieser Parameter wird mit Ausnahme der Referenzkonvergenzrate bei den vier statistischen Methoden unterschiedlich eingeschätzt.

Auf Platz 4 rangiert der Exponent in der Permeabilitäts-Porositätsbeziehung. Die Porosität der versetzten Strecken im Grubengebäude nimmt durch die Konvergenz allmählich ab und damit auch die Beweglichkeit der Lauge im Grubengebäude. Beim Transport kontaminierter Laugen hat dies direkten Einfluß auf die radiologischen Konsequenzen.

Erst auf Platz 8 wird ein Eingangsparameter geführt, der sich auf den Schadstofftransport im Deckgebirge bezieht. Die Schätzungen nach den verschiedenen Methoden sind jedoch sehr unterschiedlich, nur beim Smirnov-Test wird der K_d -Wert im Deckgebirge über alle Zeiten als wichtige Einflußgröße bewertet.

Tabelle 6.5: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse und Bedeutung der wichtigsten Parameter. T_x siehe Text.

Rang	Variable	Spearman Test	Partielle Korrelation	Standardisierte Rang- regression	Smirnov-Test
	Zeit	T_{max} $T_1 T_2 T_3 T_4 T_5$	T_{max} $T_1 T_2 T_3 T_4 T_5$	T_{max} $T_1 T_2 T_3 T_4 T_5$	T_{max} $T_1 T_2 T_3 T_4 T_5$
	Güte	-	0,39 0,38 0,38 0,39 0,39 0,40	-	-
1	Laugenvolumen des begrenz- ten Laugeneinschlusses	1 1 1 1 1 1	1 1 1 1 1 1	1 1 1 1 1 1	1 1 1 1 1 1
2	Zutrittszeitpunkt für Lauge aus dem Ein-/Ausgangs	2 2 2 2 2 2	2 2 2 2 2 2	2 2 2 2 2 2	5 4 4 6 8 8
3	Referenzkonvergenzrate	3 3 3 3 3 3	3 3 3 3 3 3	3 3 3 3 3 3	6 5 3 3 3 3
4	Exponent in Permeabilitäts- Porositätsbeziehung	4 4 4 4 4 4	4 4 4 4 4 4	4 4 4 4 4 4	7 3 7 5 10 11
5	Aktivierungsenergie (Salz) / Gaskonstante	8 9 7 7 7 8	8 9 7 6 6 7	8 9 7 6 6 7	11 15 16 15 4 5
6	Reduktionsfaktor für die Kon- vergenz	7 6 5 5 6 6	6 6 6 7 9 8	6 6 6 7 9 8	17 10 17 10 12 17
7	Nummer des Ein-/Austritts- segments	5 7 6 6 5 5	7 10 10 10 10 10	7 10 10 10 10 10	8 12 10 9 9 7
8	K_d -Werte in der Geosphäre (Leitelement C)	11 5 10 10 18 11	11 5 9 11 17 11	11 5 9 11 17 11	2 2 2 2 6 4
9	Dampfermeabilität des Ein-/Ausgangssegments	10 8 9 8 8 7	5 7 5 5 5 5	5 7 5 5 5 5	14 13 18 18 18 18

Tabelle 6.5: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse und Bedeutung der wichtigsten Parameter. T_x siehe Text.

Rang	Variable	Spearman Test	Partielle Korrelation	Standardisierte Rang-regression	Smirnov-Test
	Zeit	T_{max} $T_1 T_2 T_3 T_4 T_5$	T_{max} $T_1 T_2 T_3 T_4 T_5$	T_{max} $T_1 T_2 T_3 T_4 T_5$	T_{max} $T_1 T_2 T_3 T_4 T_5$
10	Diffusionskoeffizient	9 10 8 9 9 9	10 8 8 8 8 9	9 8 8 8 8 9	12 8 15 17 13 15
11	Löslichkeitsgrenzen, sauer (Leitelement Sr)	17 16 18 13 10 10	15 17 11 9 7 6	15 17 11 9 7 6	13 16 11 4 2 2
12	Variationsfaktor: longitudinale Dispersion	6 15 12 11 11 12	9 13 16 18 13 15	10 13 16 18 13 15	3 14 5 13 14 12
13	Verdünnungsfaktor: Variation der Transportzeit	14 11 11 12 14 17	14 14 17 15 18 14	14 14 17 15 18 14	4 7 6 8 11 6
14	Dispersionslänge	15 18 14 14 12 13	17 16 13 12 11 13	17 16 13 12 11 13	10 9 14 10 5 10
15	Mobilisierungsrate Metallteile LWR-Brennelemente	13 12 15 17 16 16	13 11 12 13 12 12	13 11 12 13 12 12	15 11 8 14 16 14
16	Behälterlebensdauer Pollux für LWR-Brennelemente	12 13 13 16 15 14	12 12 14 16 14 16	12 12 14 16 14 16	16 17 9 7 7 9
17	Permeabilität der Dämme im Grubengebäude	16 14 16 15 13 15	18 15 18 17 15 18	18 15 18 17 15 18	9 6 12 12 17 16
18	Mobilisierungsrate Brennstoff LWR-Brennelemente	18 17 17 18 17 18	16 18 15 14 16 17	16 18 15 14 16 17	18 18 13 16 15 13

6.3 Zusammenfassung der Monte-Carlo-Rechnung

Bei der Monte-Carlo-Rechnung mit insgesamt 1 000 Spielen ergaben sich 352 Spiele mit Freisetzung. In keinem Spiel wird der Grenzwert der Strahlenschutzverordnung überschritten. Die Maxima der Strahlenexpositionen werden in allen Spielen innerhalb der Szenariendauer von 1 Million Jahre erreicht.

Die statistische Auswertung der Stichprobe der maximalen Summendosen der 352 Spiele liefert einen Mittelwert von $4,7 \cdot 10^{-6}$ Sv/a. Mit den durchgeführten 1 000 Spielen erhält man bereits eine geringe Breite des Vertrauensintervalls für die Schätzung der maximalen Summendosis. Der Mittelwert wird als statistisch stabil eingeschätzt.

Aus der globalen Sensitivitätsanalyse wurde das Volumen der begrenzten Laugeneinschlüsse eindeutig als Eingangsparameter mit der größten Bedeutung identifiziert. Ebenfalls von großer Bedeutung sind Parametergruppen, die entweder mit der Konvergenz zusammenhängen (Referenzkonvergenzrate), die Beweglichkeit der Lauge beeinflussen (Exponent in der Permeabilitäts-Porositätsbeziehung) oder die Schnittstelle zwischen Grubengebäude und Deckgebirge beeinflussen (Zutrittszeitpunkt, Zutrittsort).

Der Einfluß des Zutrittsortes für unbegrenzten Laugenzutritt auf die Radionuklidfreisetzung, der erstmals als Eingangsparameter in einer Sensitivitätsanalyse einbezogen wurde, wird an siebter Stelle der wichtigsten Parametern geführt. Erst danach tauchen die Parameter des Deckgebirges in der Rangliste der wichtigsten Parameter auf, so daß generell den Eingangsdaten für das Grubengebäude eine wesentlich größere Bedeutung für die Strahlenexposition beizumessen ist.

Aus den Ergebnissen der Spiele mit Freisetzung lassen sich einige Radionuklide ermitteln, die für die Strahlenexposition von herausragender Bedeutung sind. Als die wichtigen Radionuklide sind zu nennen: C-14, J-129, Ra-226 und Np-237.

7 Zusammenfassung

Ein hypothetisches Grubengebäude eines Endlagers im Salinar wurde als netzwerkartiges System von Segmenten modelliert. Die Laugenbewegungen in diesem Segmentensystem und die Freisetzung von Radionukliden wurden mit deterministischen und probabilistischen Verfahren berechnet. Dabei wurden die Auswirkungen unterschiedlicher Zutrittsorte von Lauge aus dem Deckgebirge und die Auswirkungen einer eventuellen Gasbildung untersucht. Als Grundlage für das Grubengebäudemodell wurden Daten aus dem Projekt SPA der Europäischen Union verwendet, bei dem ein Endlager mit ausschließlich direkt endgelagerten abgebrannten LWR-Brennelementen betrachtet wurde.

Die Laugen- und Radionuklidströme der netzwerkartigen Segmentstruktur wurden mit denjenigen verglichen, die mit einer baumförmigen Struktur berechnet wurden. Hierzu wurde als Vergleich das vielfach eingesetzte und verifizierte Rechenprogramm REPOS verwendet. Die Übereinstimmung der Ergebnisse ist sehr gut, d. h. die Netzwerkstruktur wurde korrekt modelliert und das Rechenprogramm LOPOS arbeitete korrekt.

Das Programm LOPOS erlaubte erstmals die Berücksichtigung unterschiedlicher Zutrittsorte für Lauge aus dem Deckgebirge, bei sonst gleicher Modellierung der Segmentstruktur. Es zeigte sich, daß die berechneten Konsequenzen stark von diesem Ort abhängen. Tritt die Lauge nahe bei einem Einlagerungsort zu, so kommt es öfter zu einer Radionuklidfreisetzung, als wenn die Lauge beispielsweise im Zentralteil zutritt. In allen deterministisch berechneten Varianten zur Netzwerkstruktur liegen die Strahlenexpositionen in der Biosphäre weit unter dem gesetzlichen Grenzwert nach der Strahlenschutzverordnung.

Die Auswirkungen der Gasbildung in einem Einlagerungsort und der Gassammlung im Zentralteil des Grubengebäudes wurden an einem einfachen Beispiel untersucht. Beide Effekte führten bei dem langlebigen Radionuklid J-129 zu Veränderungen der Strahlenexposition von einigen Prozent. Obwohl die Laugenbewegung zu frühen Zeiten stark von der Gasbildung beeinflusst wird, sind in dem betrachteten Beispiel die Auswirkungen auch für kurzlebige Radionuklide gering, wie anhand des Radionuklids C-14 untersucht wurde. Dies liegt an der langen Transportzeit im Deckgebirge und wurde in der vorliegenden Arbeit nicht dargestellt. Bei einer komplexeren Geometrie als im hier betrachteten

Beispiel, insbesondere bei mehrsöhligen Grubengebäuden, und bei kurzen Transportzeiten im Deckgebirge sind für kurzlebige Radionuklide größere Auswirkungen durch die Gasbildung als in der vorliegenden Untersuchung zu erwarten.

In einer probabilistischen Analyse wurden mehrere unsichere Eingangsparameter des Nahfeldes und der Geosphäre statistisch variiert. Unter diesen Parametern befand sich zum ersten Mal bei einer Rechnung mit dem Programmpaket EMOS auch der Ort eines externen Zutritts in das Grubengebäude. Es zeigte sich, daß dieser Zutrittsort zu den 7 wichtigsten Parametern gehört, welche die Strahlenexposition beeinflussen. Die übrigen sensitiven Parameter bestätigten die Ergebnisse aus älteren Studien. Wichtigste Parameter sind das Volumen des begrenzten Laugeneinschlusses, der Zeitpunkt des Zutritts externer Lauge und die Referenzkonvergenzrate. In allen Spielen wurde der Grenzwert der Strahlenschutzverordnung eingehalten.

Folgende Schlüsse lassen sich aus den Ergebnissen ziehen:

- Die berechneten Ergebnisse für eine Netzwerkstruktur und eine Baumstruktur stimmen überein, wenn sich die Segmentstruktur in eine Baumstruktur abbilden läßt.
- Wegen des einfacheren und schnelleren Rechenverfahrens ist das Programm REPOS für baumförmige Strukturen empfehlenswert.
- Das Programm LOPOS bietet sich vor allem für komplexe Grubengebäudestrukturen an, die beispielsweise in Endlagern für nichtwärmeproduzierende radioaktive Abfälle anzutreffen sind.
- Die Berücksichtigung variabler Zutrittsorte kann zu neuen Bewertungen von Endlagern führen, wofür das Rechenprogramm LOPOS zur Verfügung steht.
- Die Gasbildung ist in dem betrachteten Szenario von untergeordneter Bedeutung. Sie sollte jedoch für jedes Endlager berücksichtigt werden, da bei anderen geometrischen Verhältnissen größere Auswirkungen zu erwarten sind.
- Das Monte-Carlo-Verfahren hat sich für die probabilistische Bewertung des Endlagers bewährt. Die Relevanz des Zutrittsortes für Lauge wurde mit diesem Verfahren bestätigt.

8 Literatur

- [1] Allgemeine Verwaltungsvorschrift zu §45 Strahlenschutzverordnung: Ermittlung der Strahlenexposition durch die Ableitung radioaktiver Stoffe aus kerntechnischen Anlagen oder Einrichtungen. Erschienen im Bundesanzeiger, Nummer 64a, 1990.

- [2] Baudoin, P.; Gay, D.; Certes, C.; Serres, C.; Alonso, J.; Lührmann, L.; Martens, K. H.; Dodd, D.; Marivoet, J.; Vieno, T.: Spent fuel disposal Performance Assessment - SPA project. Final Report. EC-contract Nr. FI4W-CT96-0018, Brussels 1999, to be published.

- [3] Bechthold, W.; Braun, W.; Brückner, C.; Closs, K. D.; Knapp, U.; Papp, R.: Systemanalyse Mischkonzept, Abschlußbericht Hauptband, KWA 2190 A1, Dezember 1989.

- [4] Buhmann, D.: Das Programmpaket EMOS. Ein Instrumentarium zur Analyse der Langzeitsicherheit von Endlagern. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-159, Braunschweig 1999.

- [5] Buhmann, D.; Nies, A.; Storck, R.: Analyse der Langzeitsicherheit von Endlagerkonzepten für wärmeerzeugende radioaktive Abfälle, GSF-Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit, GmbH. GSF-Bericht 27/91, Mai 1991.

- [6] 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.

- [7] Kühle, T.; Graefe, V.; Hirsekorn, R.-P.: Zweiphasenfluß-Modellrechnungen zur Berücksichtigung der Gasproduktion in Endlagern und Modellansätze für Langzeitsicherheitsanalysen. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, GRS-158, Braunschweig 1999.

- [8] Projekt Sicherheitsstudien Entsorgung (PSE), Abschlußbericht, Fachbände 18 und 19. Herausgegeben von der Projektleitung, Technische Universität Berlin, Januar 1985.
- [9] Schon, T.; Heidendael, M.: Wasserstoffbildung durch Metallkorrosion, Berichte des Forschungszentrums Jülich. Jül-3495, 1998.
- [10] Storck, R.; Aschenbach, J.; Hirsekorn, R.-P.; Nies, A.; Stelte, N.: Performance Assessment of Geological Isolation Systems for Radioactive Waste (PAGIS), Disposal in Salt Formations, EUR 11778 EN. Commission of the European Communities, Brussels-Luxembourg 1988.
- [11] 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.
- [12] Systemanalyse Mischkonzepte, Temperaturberechnungen für die Langzeitsicherheitsanalysen. Deutsche Gesellschaft zum Bau und Betrieb von Endlagern für Abfallstoffe mbH (DBE). DEAB T23, Oktober 1989.
- [13] Telander, M. R.; Westermann, R. E.: Hydrogen Generation by Metal Corrosion in Simulated Waste Isolation Pilot Plant Environments. Final Report. Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, Sand-96-2538, March 1997.
- [14] Wiese, D.: KORIGEN-Abbrandrechnungen. Forschungszentrum Karlsruhe, 1985 und 1997 (private Mitteilungen).
Siehe auch: Hauser, W.; Wenzel, W.: Zusammensetzung, Aktivitäts- und Wärmeinventar einzelner Abfallströme aus LWR- und SBR-Brennstoffkreisläufen. Kernforschungszentrum Karlsruhe, KfK 4633, Oktober 1989.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1	Hypothetisches Grubengebäude eines LWR-Endlagers in einer Salzformation.....	5
Abb. 2.2	Modellierung des 5. Einlagerungsabschnitts und des Zentralteils.....	6
Abb. 2.3	Segmentstruktur des Zentralteils und des 5. Abschnitts für die Analyse mit dem Rechenprogramm LOPOS3.....	8
Abb. 2.4	Temperaturstützstellen im Einlagerungsabschnitt 5.	18
Abb. 2.5	Zeitlicher Verlauf der Temperaturerhöhung im Zentrum und im benachbarten Querschlag des Feldes 2 der Abschnitte 1, 3 und 5.....	18
Abb. 2.6	Zeitlicher Verlauf der Temperaturerhöhung am Rand und im benachbarten Querschlag des Feldes 2 der Abschnitte 1, 3 und 5.....	19
Abb. 2.7	Zeitlicher Verlauf der Temperaturerhöhung in der Flankenstrecke am Feld 2 der Abschnitte 1, 3 und 5.....	19
Abb. 3.1	Umsetzung des hypothetischen Grubengebäudes in eine Baumstruktur.	24
Abb. 3.2	Laugenstrom in das Grubengebäude mit Baumstruktur für REPOS und LOPOS.....	26
Abb. 3.3	Laugenbewegungen im Abschnitt 5 bei erhöhtem Volumen der Laugeneinschlüsse.....	28
Abb. 3.4	Laugenströme in Richtung Ausgang der Grube bei erhöhtem Volumen der Laugeneinschlüsse.....	31
Abb. 3.5	Strahlenexposition bei erhöhtem Volumen der Laugeneinschlüsse.	32
Abb. 3.6	Laugenbewegungen bei erhöhtem Volumen der Laugeneinschlüsse. .	34
Abb. 3.7	Laugenströme in Richtung Ausgang der Grube bei erhöhtem Volumen der Laugeneinschlüsse.....	34
Abb. 3.8	Laugenbewegungen bei einem externen Zufluß in die linke Flankenstrecke des Abschnitts 5 und erhöhtem Volumen der Laugeneinschlüsse.....	36
Abb. 3.9	Jährliche Strahlenexposition bei einem externen Zufluß in die linke Flankenstrecke des Abschnitts 5 und erhöhtem Volumen der Laugeneinschlüsse.....	38
Abb. 3.10	Angenommene Zutrittsstellen für Laugen aus dem Deckgebirge.....	39
Abb. 4.1	Laugenbewegungen im Abschnitt 5 im Referenzfall und 2 Varianten. .	46

Abb. 4.2	Ausgepreßte Laugenmengen in Richtung Zentralteil, bzw. Deckgebirge.....	50
Abb. 4.3	Laugenströme in Richtung Zentralteil, bzw. Deckgebirge.....	50
Abb. 4.4	Vergleich der Laugenbewegungen in den Verbindungsstrecken FDC auf der rechten und linken Seite zwischen dem 4. und 5. Abschnitt. ...	51
Abb. 4.5	Laugenströme aus den Zutrittsorten in den Varianten mit großem Laugenvolumen.	55
Abb. 4.6	Laugenströme aus den Zutrittsorten in den Varianten mit frühem Zutritt.	55
Abb. 4.7	Zeitliche Entwicklung des Laugendrucks für ausgewählte Zutrittsorte.	56
Abb. 4.8	Strahlenexpositionen in den Varianten mit großem Laugenvolumen. ..	57
Abb. 4.9	Strahlenexpositionen in den Varianten mit frühem Laugenzutritt.	57
Abb. 5.1	Laugenstrom aus dem Einlagerungsort DD53L11 bei verschiedenen Größen des Gasspeichervolumens.....	66
Abb. 5.2	Freisetzung aus dem Grubengebäude bei langsamer Gasbildung.	67
Abb. 5.3	Freisetzung aus dem Grubengebäude bei schneller Gasbildung.....	67
Abb. 5.4	Laugenstrom aus dem Einlagerungsort bei langsamer Gasbildung.....	70
Abb. 5.5	Laugenstrom aus dem Einlagerungsort bei schneller Gasbildung.	70
Abb. 5.6	Freisetzung aus dem Grubengebäude bei langsamer Gasbildung.	71
Abb. 5.7	Freisetzung aus dem Grubengebäude bei schneller Gasbildung.....	71
Abb. 6.1	Zeitliche Entwicklung der Strahlenexposition für das Spiel 665.	81
Abb. 6.2	Zeitliche Entwicklung der Strahlenexposition für das Spiel 416.	82
Abb. 6.3	Zeitliche Entwicklung der Strahlenexposition für das Spiel 564.	82
Abb. 6.4	Histogramm der maximalen Summendosis.	84
Abb. 6.5	Relative Beiträge der Klassen zum Mittelwert der maximalen Summendosis.	84
Abb. 6.6	Häufigkeitsverteilung der maximalen Summendosis mit Konfidenzintervall.	87
Abb. 6.7	Zeitlicher Verlauf der statistischen Kenngrößen der Summendosis.	87

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1	Abfallaufkommen und Einlagerungszyklen.....	4
Tabelle 2.2	Namenskonvention für die Segmentstruktur.....	9
Tabelle 2.3	Geometriedaten der Segmente.	10
Tabelle 2.4	Radionuklidinventar eines Pollux-Behälters mit 4,272 t _{SM} , 7 Jahre nach Entladung aus dem Reaktor.	12
Tabelle 2.5	Geometrie eines Pollux-Behälters.	12
Tabelle 2.6	Elementspezifische Inventaranteile eines Brennelementes.	13
Tabelle 2.7	Elementspezifische Löslichkeitsgrenzen im Grubengebäude.	14
Tabelle 2.8	Eingangsdaten zum Grubengebäude.....	15
Tabelle 2.9	Daten zum Deckgebirgspfad.	21
Tabelle 2.10	K_d -Werte der Sorption im Deckgebirge [m ³ /kg].....	21
Tabelle 2.11	Dosiskonversionsfaktoren für Erwachsene in (Sv/a)/(Bq/m ³).	22
Tabelle 3.1	Übersicht der berechneten Konsequenzen in allen Varianten mit Baumstruktur.	26
Tabelle 3.2	Chronik der Segmente für den Referenzfall $T_L = 85$ Jahre. Zutritt über den Zentralteil.	27
Tabelle 3.3	Chronik der Segmente für die Variante $V_L = 225$ m ³	29
Tabelle 3.4	Übersicht der berechneten Konsequenzen beim Vergleich von Baum- und Netzwerkstruktur.	33
Tabelle 3.5	Übersicht der berechneten Konsequenzen aus einer Modellierung nach einer Baum- bzw. Netzwerkstruktur mit verschiedenen Zutrittsorten.....	40
Tabelle 4.1	Übersicht der berechneten Konsequenzen in den Varianten mit Netzwerkstruktur.....	42
Tabelle 4.2	Chronik der Segmente für den Referenzfall $T_L = 85$ Jahre. Zutritt über EXIT01.	43
Tabelle 4.3	Chronik der Segmente für die Variante mit erhöhtem Laugenvolumen. $T_L = 85$ Jahre. Zutritt über EXIT01.....	47
Tabelle 4.4	Chronik der Segmente für die Variante mit Laugenzutritt bei $T_L = 0$ Jahren. Zutritt über EXIT03.	52

Tabelle 5.1	Freisetzung und Strahlenexposition durch J-129 für verschiedene Gasproduktionsraten (Dauer der Gasfreisetzung) und verschiedene Anteile des Gasspeichers am Porenvolumen.....	65
Tabelle 5.2	Freisetzung und Strahlenexposition durch J-129 für verschiedene Gas-produktionsraten (Dauer der Gasfreisetzung) mit und ohne Gasbildung sowie mit und ohne Gassammlung im Zentralteil.....	69
Tabelle 6.1	Übersicht der Monte-Carlo-Simulation.	77
Tabelle 6.2	Überblick der Simulationsergebnisse mit nuklidspezifischen Informationen zum Zeitpunkt T_{max} , an dem das Maximum der Strahlenexposition auftritt.	79
Tabelle 6.3	Überblick der Simulationsergebnisse mit nuklidspezifischen Informationen über die gesamte Szenariendauer von 1 Million Jahre.....	80
Tabelle 6.4	Statistische Kenngrößen, die den Einfluß der Datenunsicherheit auf die maximale Summendosis verdeutlichen.	85
Tabelle 6.5	Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse und Bedeutung der wichtigsten Parameter.	91

**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